



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Schlussbericht 20.12.2016

Ökobilanzierung des Rückbaus von Windkraftanlagen

Auftraggeber:

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

Auftragnehmer:

Forschungsgruppe Ökobilanzierung
IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen
ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Campus Grüental, Postfach, CH-8820 Wädenswil
<https://www.zhaw.ch/iunr/lca/>

Autoren:

Lea Eymann, ZHAW
Matthias Stucki, ZHAW, matthias.stucki@zhaw.ch

BFE-Bereichsleiter:	Lionel Perret
BFE-Programmleiterin:	Dr. Katja Maus
BFE-Vertragsnummer:	SI/501384-01

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

Zusammenfassung

In der Schweiz wird die Windkraftgewinnung im Rahmen der Energiestrategie 2050 ausgebaut. Werden Windkraftanlagen nach der Nutzung rückgebaut, fallen grosse Materialmengen zur Entsorgung an. Für das Fundament der Anlagen gibt es dabei verschiedene Rückbaumöglichkeiten: Es kann entweder am Standort belassen, teilweise rückgebaut oder gesamthaft entfernt werden. Während feststeht, dass der Rückbau des gesamten Fundaments mit hohen Kosten verbunden ist, wurden die ökologischen Auswirkungen der Rückbauvarianten bisher nicht untersucht. In der vorliegenden Studie werden deshalb die Umweltwirkungen des Rückbaus von Windkraftanlagen und im Speziellen von Anlagefundamenten anhand von Ökobilanzen beurteilt.

Bei der Ökobilanzierung des Rückbaus werden zwei verschiedene Perspektiven eingenommen. Im einen Fall werden nur die Umweltwirkungen miteinbezogen, welche sich auf die Rückbauarbeiten, auf die mit dem Rückbau verbundenen Transporte und auf die Aufwendungen für die Entsorgung und das Recycling der Materialien zurückführen lassen. Im anderen Fall werden zusätzlich Gutschriften für aus dem Recycling gewonnene Wertstoffe berechnet. Damit lässt sich berücksichtigen, dass die Rückführung von Materialien in den Stoffkreislauf zu einem schonenden Umgang mit den natürlichen Ressourcen beiträgt.

Über den gesamten Lebenszyklus einer Windkraftanlage betrachtet ist die Rückbau-Phase für 6-9% der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Der Rückbau des Fundaments trägt maximal 3% zu den Treibhausgasemissionen der Windstromproduktion bei. Das Ökobilanzergebnis der einzelnen Rückbauvarianten hängt dabei stark von der Betrachtungsweise ab: Werden keine Gutschriften für wiederverwertbare Materialien bilanziert, so schneiden diejenigen Varianten am besten ab, bei denen das Fundament nicht oder nur teilweise entfernt wird. Wird hingegen mit Gutschriften gerechnet, ist das Ergebnis für diejenigen Varianten am besten, bei denen das Fundament gesamthaft entfernt und die Materialien wiederverwendet werden. Dabei ist insbesondere die Wiederverwertung von Stahl ökologisch sinnvoll, da durch das Recycling die energieintensive Roheisenherstellung vermieden werden kann.

Unabhängig von der Betrachtungsweise lässt sich festhalten, dass mit der Rückführung zurückgewonnener Materialien in den Stoffkreislauf insbesondere im Falle von Metallen ein Beitrag zur vorteilhaften Umweltbilanz von erneuerbarem Strom aus Windkraftanlagen geleistet wird.

Résumé

En Suisse, le déploiement de la production électrique éolienne jouera un rôle important dans le cadre de la stratégie énergétique 2050. Lors du démantèlement d'éoliennes arrivant en fin d'utilisation, une grosse quantité de déchets à traiter est générée. Concernant les fondations de l'éolienne, il existe différentes possibilités de remise en état: les fondations peuvent soit être laissées en place, soit retirées partiellement, soit retirées complètement. Alors qu'il est clair que le retrait de l'entier des fondations coûte très cher d'un point de vue économique, l'impact écologique des variantes de remise en état n'a pas encore été étudié. La présente étude se penche donc sur l'impact environnemental du démantèlement d'éoliennes et en particulier de leurs fondations par le biais d'écobilan.

Dans le cadre de l'écobilan du démantèlement, deux approches ont été appliquées. La première ne considère que l'impact environnemental du travail de démantèlement et remise en état en incluant le transport nécessaire, les efforts engendrés par le traitement et le recyclage du matériel. La deuxième perspective attribue en plus un crédit environnemental aux matières valorisables récupérées grâce au traitement et recyclage des déchets. Celle-ci permet donc de prendre en considération que la réintroduction de matériaux dans le cycle des matières contribue à la préservation des ressources naturelles.

En considérant l'entier du cycle de vie d'une éolienne, la phase de démantèlement est responsable de 6-9% des émissions de gaz à effet de serre. Le retrait des fondations contribue quant-à-lui à un maximum de 3% des émissions de la production de courant éolien. L'écobilan de chaque variante dépend fortement de l'approche choisie: si aucune valorisation des matériaux recyclés est considérée alors les deux variantes où les fondations ne sont pas ou seulement partiellement retirées présentent un meilleur bilan. Par contre, si la valorisation est considérée, les variantes avec un retrait total de fondations et une réutilisation des matériaux présentent un meilleur bilan. Dans ce cas, il est particulièrement intéressant, d'un point de vue écologique, de réutiliser l'acier, car le recyclage évite la production de fonte brute qui requiert beaucoup d'énergie.

Indépendamment de l'approche choisie, on constate que la réutilisation des matériaux recyclés, particulièrement des métaux, peut encore améliorer le bilan écologique positif de l'énergie éolienne.

Summary

Wind energy production in Switzerland will be expanded as part of the 2050 energy strategy. When wind turbines are dismantled at the end of their life-span, large amounts of materials need to be disposed of. There are various decommissioning options for the foundation of such an installation: it can either be left on the site, partially dismantled or completely removed. While it is clear that dismantling the entire foundation is associated with high costs, the environmental impact of the different decommissioning options has yet to be investigated. Therefore, in this study, the environmental effects of dismantling wind turbines, and more specifically dismantling their foundations, is evaluated using life cycle assessment (LCA).

Two different perspectives are taken into consideration in the life cycle assessment of the decommissioning process. In the first perspective, only the environmental impact which can be attributed to the demolition work, the transport for the decommissioning, and the disposal and recycling of materials are taken into account. In the second perspective, additional credits for the recycling of valuable materials are also included in the calculation. In this way, the second scenario takes into consideration the fact that returning materials to the materials cycle contributes to the prudent use of natural resources.

Viewed over the entire life cycle of a wind turbine, the decommissioning phase is responsible for 6-9% of the greenhouse gas emissions. The dismantling of the foundation is responsible for a maximum of 3% of the greenhouse gas emissions of wind-powered electricity. The results of the LCA for each of the dismantling options are strongly dependant on the point of view taken: if no credit is given for recycling materials, the option where the foundation is not removed or only partially dismantled performed best. If, on the other hand, recycling credits are used in the calculation, the best result was given by for the option where the foundation is completely removed and the materials are reused. The recycling of steel in particular makes sense from an ecological point of view, since recycling does not require energy-intensive production of pig iron.

Regardless of the approach, it can be said that the returning of materials, in particular metals, to the materials cycle, contributes to the favourable environmental balance of wind power.

DANK

Die Autoren bedanken sich beim Bundesamt für Energie (BFE) für die finanzielle Unterstützung dieses Ökobilanz-Projekts. Besonders danken möchten wir zudem Kurt Maegli von der Maegli AG Windenergie, der die Erstellung dieser Studie mit seinem Expertenwissen unterstützt hat. Unser Dank gilt ausserdem Nadine Mounir von der Planair SA für die französische Übersetzung der Zusammenfassung.

INHALT

1	EINLEITUNG	9
2	ZIEL UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN	11
2.1	Ziel der Studie.....	11
2.2	Funktionelle Einheit.....	11
2.3	Systembeschreibung	11
2.3.1	Fundament.....	13
2.3.2	Windkraftanlage	16
2.4	Allokation – Zuteilung des ökologischen Nutzens von Sekundärmaterialien	16
2.5	Bewertungsmethoden.....	18
2.6	Datenquellen.....	18
3	SACHBILANZ	19
3.1	Fundamentrückbau	19
3.1.1	Aufwendungen für den Rückbau	19
3.1.2	Gutschriften für verwertbare Materialien aus dem Fundament.....	22
3.2	Rückbau der Anlage.....	23
3.2.1	Aufwendungen für den Rückbau	23
3.2.2	Gutschriften für verwertbare Materialien aus der Anlage	24
3.3	Rückbau der Elektronik und Kabel	25
3.3.1	Aufwendungen für den Rückbau	25
3.3.2	Gutschriften für die verwertbaren elektronischen Bauteile und Kabel.....	26
3.4	Rückbau von Zufahrtsstrassen	26
3.4.1	Aufwendungen für den Rückbau	27
3.4.2	Gutschriften für verwertbare Materialien aus den Zufahrtsstrassen.....	28
3.5	Bau und Betrieb der Anlage	28

4	WIRKUNGSABSCHÄTZUNG	29
4.1	Umweltwirkungen des Fundament-Rückbaus	29
4.1.1	Umweltwirkungen des Fundament-Rückbaus ohne Gutschriften.....	29
4.1.2	Umweltwirkungen des Fundament-Rückbaus mit Gutschriften	32
4.2	Umweltwirkungen des Rückbaus der gesamten Anlage	34
4.2.1	Umweltwirkungen des gesamten Rückbaus ohne Gutschriften.....	34
4.2.2	Umweltwirkungen des gesamten Rückbaus mit Gutschriften	36
4.3	Treibhausgasemissionen des Rückbaus im Vergleich zum Bau und Betrieb einer Anlage	38
5	DISKUSSION	39
5.1	Unsicherheiten	40
5.2	Empfehlungen	41
	LITERATUR	42
	ANHANG	45

1 EINLEITUNG

In der Schweiz bestehen derzeit 34 Grosswindanlagen, wobei die Windenergie im Rahmen der Energiestrategie 2050 in den kommenden Jahren stark ausgebaut werden soll (EnergieSchweiz, 2015). Windkraftanlagen sind in der Regel für eine Nutzungsdauer von ungefähr 20 Jahren ausgelegt (Wiser et al., 2011). Danach werden die Anlagen abgebaut und die Turbinenelemente recycelt oder entsorgt. Der Abbau eines Windrades ist dabei ähnlich aufwendig wie sein Aufbau (Löffler, 2015).

Die vier in der Schweiz bisher rückgebauten Anlagen wurden im Rahmen des Repowerings am Mont Crosin durch leistungsstärkere Turbinen ersetzt. Die gebrauchten Anlagen wurden verkauft und an einem neuen Standort im Ausland wieder aufgebaut¹. Lässt sich eine Anlage nicht an einem neuen Standort wieder aufbauen, so werden die einzelnen Bestandteile recycelt oder entsorgt (Asendorpf, 2015). Während Windkraftanlagen somit standardmässig ganz oder teilweise recycelt werden, wird die Entsorgung des Fundaments kontrovers diskutiert. Technisch lässt sich das Fundament problemlos rückbauen. Die Rückbaustoffe werden anschliessend entweder deponiert oder wiederverwertet. Es wird jedoch teilweise argumentiert, dass das Fundament aus ökologischen Gründen besser im Boden belassen wird, da der Rückbau den Einsatz von Maschinen und die Nutzung von Energieressourcen erfordert (Milanese, 2009). Ausserdem ist der Fundamentrückbau mit einem erheblichen finanziellen Aufwand verbunden.

Eine Ökobilanzstudie der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften aus dem Jahr 2015 zeigt, dass die Windstromproduktion in der Schweiz sehr geringe Umweltauswirkungen hat (Eymann et al., 2015). Berücksichtigt wird in dieser Studie der gesamte Lebensweg der Stromproduktion, von der Herstellung der Anlagekomponenten über deren Transport, die Montage und den Anlagenbetrieb bis hin zur Entsorgung der Anlagen. Für diese letzte Phase im Lebenszyklus der Windstromproduktion (end-of-life) berücksichtigt die Studie die Aufwendungen und Emissionen der Entsorgung sowie des Transports von zu entsorgenden Anlagekomponenten, nicht jedoch die Aufwendungen für den Rückbau. Auch der Rückbau der Zufahrtsstrassen wird in der Studie vernachlässigt. Für das Fundament geht die Studie davon aus, dass der Beton in einer Inertstoffdeponie entsorgt und das Armierungseisen dem Recycling zugeführt wird. Eine vergleichende Ökobilanz für verschiedene Rückbaumöglichkeiten gibt es nach dem Wissen der Autoren bisher nicht. In der vorliegenden Studie werden deshalb in Ergänzung der von Eymann et al. (2015) erstellten Sachbilanzdatensätze für Schweizer Windenergieanlagen Ökobilanzen für verschiedene Rückbaustrategien erstellt. Die Varianten unterscheiden sich im Umgang mit dem Fundament, welches entweder im Boden belassen, teil-

¹ Persönliche Mitteilung, Kurt Maegli, Maegli AG Windenergie, 16. März 2016

Einleitung

weise rückgebaut oder vollständig entfernt wird und dessen Materialien entweder entsorgt oder recycelt werden. Ziel dabei ist es, die Umweltauswirkungen der Rückbaustrategien zu vergleichen und den Einfluss der end-of-life-Phase auf das Ökobilanzergebnis von Schweizer Windstrom zu analysieren.

2 ZIEL UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN

In diesem Kapitel wird einerseits das Ziel der vorliegenden Studie definiert (Abschnitt 2.1), andererseits werden die Bezugsgrösse der Ökobilanzierung (Abschnitt 2.2) sowie das betrachtete System (Abschnitt 2.3) beschrieben, die verwendeten Allokationsansätze (Abschnitt 2.4) und Bewertungsmethoden (Abschnitt 2.5) aufgeführt sowie die wichtigsten Datenquellen erwähnt (Abschnitt 2.6).

2.1 ZIEL DER STUDIE

Ziel der vorliegenden Studie ist es, anhand von Ökobilanzen die Umweltwirkungen des Rückbaus von Windkraftanlagen aufzuzeigen. Der Fokus liegt dabei auf dem Rückbau des Fundaments, wobei verschiedene Rückbauvarianten miteinander verglichen werden. Die Studie richtet sich damit an alle Akteure, die sich mit dem Rückbau von Windkraftanlagen befassen. Die Resultate der Studie sollen ihnen eine Grundlage bieten, um bei der Planung des Rückbaus ökologische Kriterien zu berücksichtigen.

2.2 FUNKTIONELLE EINHEIT

Als Bezugsgrösse wird der Rückbau von einem Fundament beziehungsweise einer gesamten Windkraftanlage (inkl. Fundament, Zufahrtsstrassen und Netzanschluss) in der Schweiz betrachtet. Der Rückbau wird am Beispiel einer Vestas-Anlage V90 mit einer Nennleistung von 2.0 MW und einer Nabenhöhe von 95 m untersucht. Eine solche Anlage wiegt rund 271 Tonnen, ein entsprechendes Fundament 1050 Tonnen.

2.3 SYSTEMBESCHREIBUNG

Die Ökobilanzierung des Rückbaus erfolgt getrennt für das Fundament (Abschnitt vgl. 2.3.1) und für die Anlage (vgl. Abschnitt 2.3.2). Für das Fundament werden dabei verschiedene Rückbauoptionen berücksichtigt (vgl. Tabelle 2-2 auf Seite 15). Ausserdem werden in dieser Studie zwei unterschiedliche Möglichkeiten für die Ökobilanzierung der Entsorgung angewendet: Im einen Fall werden nur die für die Entsorgung anfallenden Umweltauswirkungen berücksichtigt, im anderen werden Gutschriften für aus dem Recycling beziehungsweise der Entsorgung gewonnene Wertstoffe berechnet. Abbildung 2-1 zeigt für diese beiden Betrachtungsweisen die jeweiligen Systemgrenzen. Die beiden Ansätze werden ausserdem in Abschnitt 2.4 näher beschrieben.

Ziel und Untersuchungsrahmen

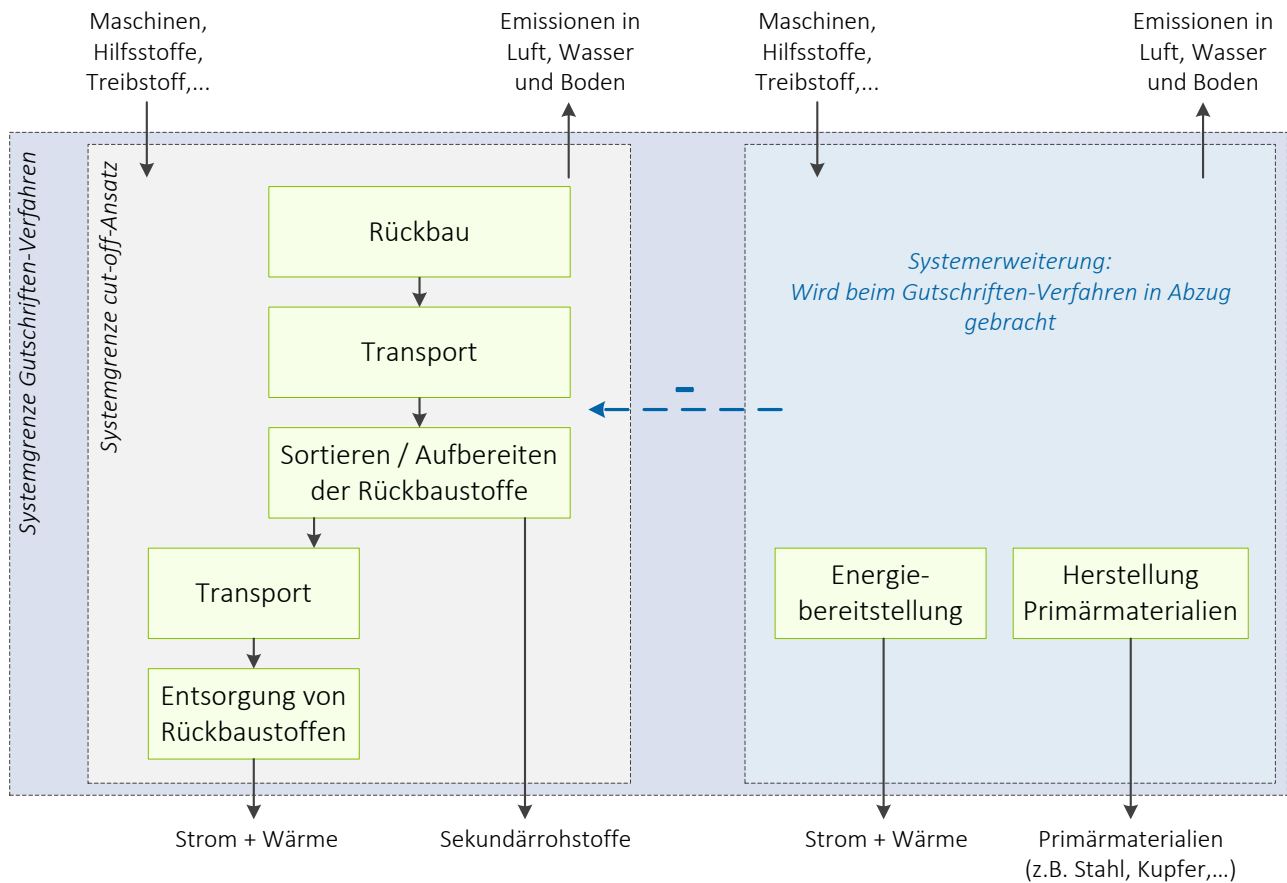


Abbildung 2-1: Systembild für die Ökobilanzierung des Rückbaus

Für die Beurteilung der Umweltwirkungen des Rückbaus von Windkraftanlagen werden der Energieaufwand, die benötigten Hilfsmittel und die Emissionen des Rückbaus, die Transporte der Rückbaustoffe sowie in Abhängigkeit des Materials und der Rückbaustrategie eine Sortierung und eine Aufbereitung oder Entsorgung berücksichtigt (Abbildung 2-1). Vernachlässigt werden die für den Rückbau benötigte Infrastruktur (z.B. Mulden). Tabelle 2-1 fasst die wichtigsten Angaben zu den berücksichtigten Systemgrenzen zusammen.

Tabelle 2-1: In dieser Studie berücksichtigte Systemgrenzen

Systemgrenze	Beschreibung
Zeitlich	Diese Ökobilanzstudie bezieht sich auf heutige Technologien und aktuelle Rückbauoptionen.
Geographisch	Betrachtet wird der Rückbau von Windkraftanlagen in der Schweiz.
Technisch	Die Ökobilanzierung des Rückbaus erfolgt am Beispiel einer Vestas-Anlage V90 (Nennleistung: 2.0 MW; Nabenhöhe: 95 m). In der Schweiz stehen am Standort Mont-Crosin (Abbildung 2-2) insgesamt 12 Anlagen des Typs V90.



Abbildung 2-2: Windpark Mont-Crosin. Bild: © Juvent SA, www.juvent.ch

2.3.1 Fundament

Die Bauart und die Masse von Fundamenten unterscheiden sich je nach Anlage und Standort. Der Materialbedarf für ein Fundament hängt entsprechend von der Anlagengrösse und dem Anlagentyp sowie von den standortbedingten Bodenverhältnissen ab. Die Fundamentfläche liegt in der Grössenordnung von 200-400 m² (Hau, 2008, S. 621). Die Fundamenttiefe ist davon abhängig, in welcher Tiefe genügend feste Bodenschichten vorgefunden werden. Liegen die festen Bodenschichten in grösseren Tiefen, ist eine Tiefgründung erforderlich. Dabei wird die Tragfähigkeit des Fundaments durch Pfähle gewährleistet (Hau, 2008, S.500ff). Bei den bisher in der Schweiz gebauten Windkraftanlagen war keine Tiefgründung notwendig².

Beim Bau der Fundamente von Windkraftanlagen wird der Beton in eine Baugrube mit einer zuvor geflochtenen Stahlarmierung gegossen (Abbildung 2-3)(Hau, 2008, S.500ff). Der Rückbau der Fundamente (Abbildung 2-4) erfolgt normalerweise mit einem Bagger mit Spitzhammer². Die auf den Rückbau spezialisierte Firma Hagedorn setzt dafür in der Regel einen Hydraulikbagger des Typs CAT 336 ein³. Sprengungen sind nur in Sonderfällen eine Option (Schaumann & Marten, 2005). Das rückgebaute Material kann zu einer Aufbereitungsanlage transportiert oder vor Ort mit einem mobilen Brecher zerkleinert und direkt wieder für den Bau von Plätzen und Strassen eingesetzt werden². Die Bewehrung kann gewinnbringend dem Recycling zugeführt werden (Masherova, 2015; Nordex, 2011).

² Persönliche Mitteilung, Kurt Maegli, Maegli AG Windenergie, 16. März 2016

³ Persönliche Mitteilung, Ralf Vosschenrich, Unternehmensgruppe Hagedorn, 26.04.2016



Abbildung 2-3: Bewehrung eines Fundaments für eine Windkraftanlage in Schonungen (Deutschland). Bild: Wikipedia Commons



Abbildung 2-4: Fundament-Rückbau. Bild: Hagedorn Unternehmensgruppe

Ziel und Untersuchungsrahmen

In der vorliegenden Studie wird ein Fundament betrachtet, wie es auf dem Mont Crosin für die Installation der Vestas-Anlagen des Typs V90 im Rahmen des ersten Repowerings gebaut wurde. Für dieses Fundament werden die in Tabelle 2-2 aufgeführten Rückbauvarianten betrachtet, welche drei grundsätzlich verschiedene Rückbaumöglichkeiten abdecken: Bei Variante 1 wird das Fundament am Standort belassen, bei Variante 2 erfolgt ein teilweiser Rückbau und bei den Varianten 3a, 3b und 3c wird das Fundament gesamthaft entfernt (Tabelle 2-2). Ein Rückbau des Fundaments bis in eine Tiefe von 1 m (Variante 2) soll es ermöglichen, die Fläche wieder seiner ursprünglichen Nutzung zuzuführen und gleichzeitig die Aufwendungen für den Rückbau zu minimieren.

Tabelle 2-2: Rückbauvarianten für das Fundament

Variante	Rückbau Fundament	Entsorgung
1	Kein Rückbau des Fundaments	Keine Entsorgung nötig
2	Rückbau von 1 m Fundament	Stahl und Beton werden rezykliert
3a	Rückbau des gesamten Fundaments	Stahl wird rezykliert, Beton deponiert
3b	Rückbau des gesamten Fundaments	Stahl und Beton werden rezykliert
3c	Rückbau des gesamten Fundaments	Stahl wird rezykliert, Beton wird für das Auffüllen der Baugrube verwendet

Abbildung 2-5 zeigt, von welchen Massen bei der Ökobilanzierung des Rückbaus des runden Fundaments ausgegangen wird (s. auch Bauplan auf Seite 46). Das Volumen eines entsprechenden Fundaments beträgt 426 m^3 (vgl. Berechnung⁴). Die eingesetzte Stahlmenge für die Bewehrung liegt bei 120 kg pro Kubikmeter Fundament⁵. Es wird vernachlässigt, dass der Stahlbedarf im Bereich des Ankerkorbs⁶ grösser ist. Ausgehend von einer Beton-Dichte von $2'385 \text{ kg/m}^3$ (Kellenberger et al., 2007, S. III-30) und einer Stahl-Dichte von $7'850 \text{ kg/m}^3$ (KBOB, 2009) ergeben sich damit folgende Materialmengen für den Bau eines Fundaments:

- **Beton:** 1'000 Tonnen / 420 m^3
- **Eisen:** 51 Tonnen / 6.5 m^3

$${}^4 V = \left(\frac{5.2 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot (2.67 \text{ m} - 1.0 \text{ m}) + \left(\frac{18.3 \text{ m}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 1 \text{ m} + \left(\left(\frac{18.3 \text{ m}}{2}\right)^2 - \left(\frac{5.22 \text{ m}}{2}\right)^2\right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (2.05 \text{ m} - 1.0 \text{ m}) = 425.6 \text{ m}^3$$

⁵ Persönliche Mitteilung, Kurt Maegli, Maegli AG Windenergie, 16. März 2016

⁶ Der Ankerkorb ist die Verbindung zwischen Turm und Fundament. Es handelt sich dabei um eine Stahlkonstruktion, die einbetoniert wird

Wird nur der oberste Meter des Fundaments entfernt (dunkelgrau eingefärbte Fläche in Abbildung 2-5), so entspricht dies folgenden Beton- und Eisenmengen:

- **Beton:** 75 Tonnen / 32 m³
- **Eisen:** 4 Tonnen / 0.5 m³

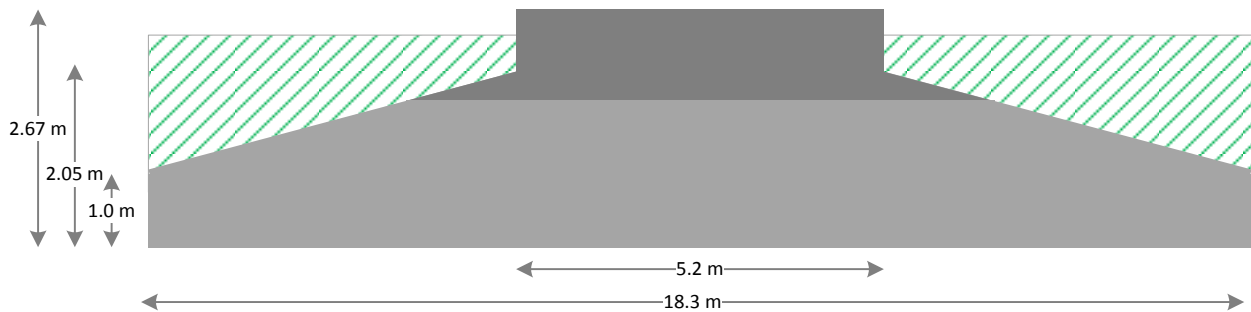


Abbildung 2-5: In der vorliegenden Studie berücksichtigte Fundament-Abmessungen (basierend auf Bauplan, siehe Anhang S. 46)

2.3.2 Windkraftanlage

Der Rückbau der gesamten Windkraftanlage wird am Beispiel einer Anlage des Typs Vestas V90 betrachtet. Das Materialinventar für die entsprechende Anlage ist im Schlussbericht „Ökobilanzierung von Schweizer Windenergie“ aufgeführt (Eymann et al., 2015). Es wird davon ausgegangen, dass die Materialien nach dem Rückbau entweder recycelt oder entsorgt werden und die Anlage somit nicht gesamthaft an einem neuen Standort aufgebaut wird.

2.4 ALLOKATION – ZUTEILUNG DES ÖKOLOGISCHEN NUTZENS VON SEKUNDÄRMATERIALIEN

Werden die Materialien einer Windkraftanlage nach der Nutzungsphase einem Recycling zugeführt, so stehen sie nach einer entsprechenden Aufbereitung für eine erneute Nutzung zur Verfügung. Durch die Rückführung der Materialien in den Stoffkreislauf können dabei die Primärressourcen geschont werden, denn durch das Recycling von Altmetallen und anderen Materialien zu Sekundärrohstoffen werden weniger Primärrohstoffe benötigt. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten, wie sich der ökologische Vorteil des Recyclings in Ökobilanzen berücksichtigen lässt. Grundsätzlich stellt sich die Frage, ob die Vorzüge des Recyclings demjenigen Produktsystem angerechnet werden sollen, welches wiederverwertbare Stoffe für das Recycling bereitstellt, oder demjenigen, welches Recyclingstoffe statt Primärrohstoffe nutzt. Damit in Verbindung steht auch die Entscheidung, in welchem System die Umweltwirkungen der Materialtransporte,

Ziel und Untersuchungsrahmen

der Aufbereitung und des Recyclings berücksichtigt werden sollen (vgl. z.B. Klöpffer und Grahl (2009, S. 111ff)). In der vorliegenden Studie werden in diesem Zusammenhang zwei verschiedene Betrachtungsweisen eingenommen. Diese werden in Tabelle 2-3 anhand eines Beispiels erklärt. Die gleichen zwei Betrachtungsweisen werden auch bei der Energiegewinnung in Kehrichtverbrennungsanlagen angewendet.

Tabelle 2-3: In dieser Studie verwendete Ansätze zur Berücksichtigung des Recyclings bei der Ökobilanzierung des Rückbaus von Windkraftanlagen

	Cut-off-Ansatz	Gutschriften-Verfahren (avoided burden)
Erklärung	Beim sogenannten cut-off-Ansatz werden die Aufwendungen der Primärproduktion dem ersten Nutzer angerechnet, während zusätzlich anfallende Aufwendungen für die Aufbereitung eines Materials dem Sekundärrohstoff zugeschrieben werden. Es werden keine ökologischen Gutschriften für die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen berechnet.	Wird ein Material recycelt, können mit dem gewonnenen Sekundärrohstoff Primärmaterialien ersetzt werden. Die somit vermiedenen Umweltauswirkungen werden abgezogen.
Beispiel	<p>Das Fundament einer Windkraftanlage enthält im Wesentlichen Stahl und Beton. Stahl lässt sich verlustfrei und ohne Qualitätsverluste recyceln und somit zu einem beliebigen neuen Stahlprodukt verarbeiten (Stahl-Zentrum, 2016), der Beton kann gebrochen und beispielsweise im Strassenbau eingesetzt werden. Wichtig ist es, für die Materialien den sogenannten „point of substitution“ zu definieren, an dem ein Material ohne weitere Aufarbeitung ein anderes Produkt ersetzen kann. Das verbreitetste Verfahren der Rohstahlproduktion ist das Linz-Donawitz-Verfahren. Dabei wird flüssiges Roheisen zusammen mit Stahlschrott und einem Schlackebildner (z.B. Kalk) in einem Konverter zu Blasstahl verarbeitet (Geiss, 2015). Beton, welcher in Form von Schotter im Strassenbau eingesetzt werden soll, muss zuerst gebrochen werden. Entsprechend kann der „point of substitution“ beim Stahl vor dem Schmelzen im Stahlwerk und beim Beton nach dem Brechen definiert werden.</p> <p>Der glasfaserverstärkte Kunststoff der Rotoren wird in einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) entsorgt. Alle KVA der Schweiz nutzen die Verbrennungswärme zur Erzeugung von Energie (BAFU, 2015).</p> <p>Mit dem Cut-off-Ansatz werden die Aufwendungen für den Abbruch, das Sortieren der Materialien, deren Transport zu einer Recyclingstätte, das Brechen des Betons sowie die Entsorgung der Kunststoffe bilanziert. Gutschriften werden keine berücksichtigt.</p>	<p>Mit dem Gutschriften-Verfahren werden die gleichen Aufwendungen bilanziert wie beim Cut-off-Ansatz. Zusätzlich werden die Umweltauswirkungen von ersetzttem konventionellem Strassenschotter, Roheisen, Kupfer und Aluminium sowie in einer KVA produziertem Strom und Wärme abgezogen.</p>

2.5 BEWERTUNGSMETHODEN

Zur Bewertung der Sachbilanzdaten werden die Klimawirkung, die Gesamtumweltbelastung nach der Methode der ökologischen Knappheit (2013) sowie der kumulierte Energieaufwand untersucht. Die drei Bewertungsmethoden sind in Tabelle 2-4 beschrieben

Tabelle 2-4: In dieser Studie verwendete Indikatoren und Wirkungsabschätzungsmethoden

Indikator	Methode	Beschreibung
Klimawandel	IPCC (2013), GWP 100a	Die Wirkungskategorie Klimawandel nach IPCC 2013 berücksichtigt alle Emissionen, die zum Klimawandel beitragen. Die potenzielle Klimawirkung eines Treibhausgases wird dabei mit den Klimawirkungen von CO ₂ verglichen und in CO ₂ -Äquivalenten ausgedrückt.
Gesamtumweltbelastung (UBP)	Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht et al., 2013)	Die Methode der ökologischen Knappheit gewichtet die Emissionen und Ressourcenverbräuche anhand der politischen Zielwerte. Das Ergebnis wird dabei in Umweltbelastungspunkten (UBP) ausgedrückt.
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	Frischknecht et al. (2007b)	Der kumulierte Energieaufwand gibt den Verbrauch erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Energieressourcen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts an. Dabei wird sowohl der direkte als auch der indirekte (graue) Energieaufwand berücksichtigt. Als Einheit werden MJ-Äquivalente verwendet.

2.6 DATENQUELLEN

Die Ökobilanzmodelle orientieren sich an der bestehenden Studie zu den Umweltwirkungen der Schweizer Windenergie (Eymann et al., 2015). Zusätzlich werden Informationen und Fundament-Baupläne, welche durch die *Maegli AG Windenergie* zur Verfügung gestellt wurden, genutzt. Ausserdem werden diverse Literaturquellen verwendet. Die verwendeten Hintergrunddaten stammen aus dem ecoinvent Datenbestand v2.2 (ecoinvent Centre, 2010) mit Anpassungen gemäss LC-inventories (2012). Die Modellierung der Sachbilanzen und die Wirkungsabschätzung erfolgen in der SimaPro Software 8.1 von Pré Consultants (PRé Consultants, 2016).

3 SACHBILANZ

Diese Ökobilanzstudie umfasst den Rückbau der Anlage, des Fundaments, der Elektronik und der Kabel für den Netzanschluss sowie der Zufahrtsstrassen (Abschnitte 3.1 bis 3.4). Um die Umweltwirkungen des Rückbaus mit denjenigen der gesamten Windstromproduktion zu vergleichen, wird in Abschnitt 3.5 zudem auf die Sachbilanzierung des Baus und Betriebs einer Windkraftanlage eingegangen.

3.1 FUNDAMENTRÜCKBAU

Für den Fundamentrückbau werden einerseits die Aufwendungen für die Abbrucharbeiten bilanziert (Abschnitt 3.1.1) und andererseits Gutschriften für die zurückgewonnenen Materialien separat erfasst (Abschnitt 3.1.2).

3.1.1 Aufwendungen für den Rückbau

Für den Fundamentrückbau wird einerseits der Energieaufwand für die Entfernung des Fundaments berücksichtigt, andererseits werden in Abhängigkeit der Rückbauvariante die Entsorgung der Materialien und der Transport zu den Entsorgungsstätten bilanziert. Grundlage für die Sachbilanzierung des Fundamentrückbaus bildet der ecoinvent-Datensatz für die Behandlung von bewehrtem Beton in einer Sortieranlage⁷. Dieser Datensatz berücksichtigt den Energiebedarf für den Rückbau von Stahlbeton, den Transport des Materials zu einer Sortieranlage, den Energieaufwand für den Brecher und die übrigen Maschinen und Transporter der Sortieranlage, die Infrastruktur und Maschinen der Sortieranlage, die Deponierung des Betons sowie die Partikelemissionen des Rückbaus (Doka, 2003). Der Energieaufwand des Rückbaus ist je nach Quelle sehr unterschiedlich (Tabelle 3-1). Der im Datensatz von Doka (2003) bilanzierte Dieserverbrauch wird basierend auf Angaben der Hagedorn-Unternehmensgruppe auf das Doppelte erhöht (vgl. Tabelle 3-1). Ausserdem werden die berücksichtigten Aufwendungen für die Deponierung eines Teils des Betons und der entsprechenden Transporte in Abhängigkeit der Entsorgungsvariante adaptiert. Gemäss Doka (2003) kann dabei von einer Transportdistanz von 17.7 km vom Standort zu einer Sortieranlage und von 15 km von der Sortieranlage zu einer Deponie ausgegangen werden. Bei der Entsorgungsvariante, bei welcher sämtlicher Beton deponiert wird, wird der Strombedarf des Brechers abgezogen.

⁷ ecoinvent v2.2-Datensatz „Entsorgung, Gebäude, bewehrter Beton, in Sortieranlage“ (Doka, 2003)

Sachbilanz

Tabelle 3-1: Energieaufwand für den Rückbau des bewehrten Fundamentbetons gemäss verschiedenen Quellen

Quelle	Energieaufwand	Bemerkung
Doka (2003, S. 11)	141 MJ/m ³	Die Angabe bezieht sich allgemein auf den Stahlbetonabbruch, nicht spezifisch auf den Fundament-Rückbau
Lünser (1999, S. 232)	632 MJ/m ³	Die Angabe bezieht sich allgemein auf den Stahlbetonabbruch, nicht spezifisch auf den Fundament-Rückbau; Ausgehend von einer Diesel-Dichte von 0.84 kg/l und einem Heizwert von 42.8 MJ/kg umgerechnet;
Vorliegende Studie	287.6 MJ/m ³	Das auf Rückbauarbeiten spezialisierte Unternehmen Hagedorn setzt für den Fundamentrückbau in der Regel einen Hydraulikbagger vom Typ CAT 336 ein (40 t-Klasse). Ein solcher Bagger benötigt 15-20 Minuten pro m ³ Fundament (für das Stemmen und anschliessende Pulverisieren) und weist einen Dieserverbrauch von rund 28 l/h auf ⁸ . Für Diesel wird mit einer Dichte und einem Heizwert von 0.84 kg/l bzw. 42.8 MJ/kg gerechnet.

⁸ Persönliche Mitteilung, Ralf Vosshenrich, Hagedorn GmbH, Deutschland, 26. April.2016

Sachbilanz

Tabelle 3-2: Entsorgung von 1 kg Stahlbeton für zwei Entsorgungsvarianten. Die Sachbilanzierung basiert auf Doka (2003) mit Anpassungen (gemäss Text) und beinhalten auch den Aufwand für die Abbrucharbeiten und die Materialtransporte

Verwendete Datensätze / Elementarflüsse	Bemerkung	Ein- heit	Entsorgung,	Entsorgung,	Entsorgung, be-
			bewehrter Beton, Depo- nierung des Betons	bewehrter Beton, Recycling des Betons	wehrter Beton, Wiederverwen- dung des Betons vor Ort
	Variante		3a	2 / 3b	3c
			kg	kg	kg
Diesel, burned in building machine/GLO	Energiebedarf des Rückbaus gemäss Tabelle 3-1. Die Fundament-Dichte liegt gemäss den Angaben auf S. 15 bei 2'470 kg/m ³ .	MJ	0.117	0.117	0.117
Excavation, hydraulic dig- ger/RER	Für Sortieranlage gemäss Doka (2003)	m ³	0.000483	0.000483	0.000483
Electricity, low voltage, at grid/CH	Basierend auf Doka (2003, S. 17). Bei Variante 3a exkl. Strombedarf des Brechers, bei Variante 3c: Strombedarf des Brechers einer Sortieranlage über- nommen	kWh	0.00218	0.0037	0.00152
Transport, lorry >28t, fleet average/CH	17.7 km zu Sortieranlage, 15 km zu Deponie	tkm	0.0319	0.0177	0.00086
Sorting plant for construc- tion waste/CH	Infrastruktur gemäss Doka (2003), bei Variante mit Beton-Verwendung vor Ort vernachlässigt	p	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹⁰	-
Particulates, <2.5um	Partikelemission gemäss Doka (2003)	kg	0.0000166	0.0000166	0.0000166
Particulates, >2.5 um, <10um	Partikelemission gemäss Doka (2003)	kg	0.0000634	0.0000634	0.0000634
Particulates, >10um	Partikelemission gemäss Doka (2003)	kg	0.0000835	0.0000835	0.0000835
Heat, waste	Aus Sortieranlage gemäss Doka (2003)	MJ	0.0133	0.0133	-
Disposal, concrete, 5% water, to inert landfill/CH	Entsorgung von Beton in einer Inert- stoffdeponie	kg	0.952	-	-

Bei der Variante 1 fallen keine Aufwendungen für den Rückbau an. Da das Fundament jedoch am Standort bestehen bleibt, wird die Landnutzung in die Sachbilanz aufgenommen. Dabei wird eine Nutzungsdauer von 500 Jahren bilanziert. Es wird davon ausgegangen, dass während dieser Zeit keine Schadstoffe aus dem Fundament ausgewaschen werden.

Bei den Rückbauvarianten 2, 3a, 3b und 3c (vgl. Tabelle 2-2) wird zusätzlich zu den Aufwendungen für die Abbrucharbeiten, die Materialtransporte und die Entsorgung berücksichtigt, dass die Baugrube nach der teilweisen oder gesamthaften Entfernung des Fundaments wieder zugeschüttet werden muss. Bei den Rückbauvarianten 2, 3a und 3b wird die Sachbilanz des Auffüllmaterials durch den ecoinvent-Datensatz für Kies angenähert. Für das Auffüllmaterial wird mit einer Transportdistanz von 20 km gerechnet. Die benötig-

Sachbilanz

te Menge des Auffüllmaterials wird über das frei gewordene Volumen (vgl. Seite 15) und eine Materialdichte von 2000 kg/m^3 (gemäss KBOB (2011)) berechnet.

Die Variante 3c (vgl. Tabelle 2-2) geht davon aus, dass für das Auffüllen der Baugrube der Beton aus dem Fundament verwendet wird. Dabei wird die Annahme getroffen, dass der Beton nach dem Rückbau vor Ort gebrochen wird und der dazu benötigte Energieaufwand demjenigen des Brechers in einer Sortieranlage entspricht. Ausserdem wird davon ausgegangen, dass das gebrochene Material die gleiche Dichte aufweist wie Kies (2000 kg/m^3 gemäss KBOB (2011)). Aus den 1000 Tonnen Beton aus dem Fundament entstehen somit 500 m^3 Schotter. Davon werden 426 m^3 für das Auffüllen der Baugrube genutzt. Für die verbleibenden 74 m^3 werden keine weiteren Transporte oder Verarbeitungsschritte bilanziert.

Die Sachbilanzen der fünf Rückbauvarianten sind in Tabelle 3-3 zusammengestellt. Die Werte ergeben sich aus den Materialmengen gemäss Seite 15 und den im Text beschriebenen Annahmen.

Tabelle 3-3: Sachbilanzierung des Fundamentrückbaus

Verwendete Datensätze	Bemerkung	Einheit	Kein Rückbau des Fundaments	Entsorgung von 1m des Fundaments, Recycling von Beton und Stahl	Entsorgung, Fundament, Deponierung des Betons	Entsorgung Fundament, Recycling von Beton und Stahl	Entsorgung Fundament, Wiederverwendung des Betons vor Ort
			v1 p	v2 p	v3a P	v3b P	v3c p
Occupation, industrial area, built up	Landnutzung, Annahme: über 500 a, $A = (2.61\text{m})^2 \cdot \pi$	m^2a	10'700	-	-	-	-
Entsorgung, bewehrter Beton, Deponierung des Betons	Menge: siehe S. 15	t	-	-	1'051	-	-
Entsorgung, bewehrter Beton, Recycling des Betons	Menge: siehe S. 15	t	-	79.3	-	1'051	-
Entsorgung, bewehrter Beton, Wiederverwendung des Betons vor Ort	Menge: siehe S. 15	t	-	-	-	-	1'051
Gravel, crushed	Annäherung für Aushub	t	-	64.2	851	851	-
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH	Annahme: Transport des Auffüllmaterials über 20 km	tkm	-	1'280	17'000	17'000	-

3.1.2 Gutschriften für verwertbare Materialien aus dem Fundament

Werden die Materialien, die nach dem Rückbau anfallen, dem Recycling zugeführt, so können damit Primärrohstoffe ersetzt werden. In der vorliegenden Arbeit wird in den Recycling-Varianten 2, 3b und 3c da-

Sachbilanz

von ausgegangen, dass in einem Brecher zerkleinerter Beton Kies ersetzt. Für die rückgebauten Armierungseisen kann davon ausgegangen werden, dass damit Roheisen in einem Stahlwerk ersetzt wird (vgl. Bergsma & Sevenster (2013, S. 24) und Tabelle 2-3). Während in den Rückbauvarianten 2 und 3b für den gesamten Fundament-Beton eine Gutschrift angerechnet werden, entspricht die Gutschrift in der Variante 3c der Kiesmenge, die nach dem Auffüllen der Baugrube noch übrigbleibt (74 m³ oder 149 t, vgl. Abschnitt 3.1.1). Tabelle 3-4 gibt eine Übersicht über die bilanzierten Gutschriften für die verschiedenen Rückbauvarianten.

Tabelle 3-4: Sachbilanzierung der Gutschriften für die Materialien aus dem Fundament

Verwendete Datensätze	Bemerkung	Einheit	Gutschrift, kein Rückbau des Fundaments	Gutschrift, Entsorgung von 1m des Fundaments, Recycling von Beton und Stahl	Gutschrift, Entsorgung, Deponierung des Betons	Gutschrift, Entsorgung Fundament, Recycling von Beton und Stahl	Gutschrift, Entsorgung Fundament, Wiederverwendung des Betons vor Ort
	Variante		1 p	2 p	3a P	3b P	3c p
Pig iron, at plant	Gutschrift für Stahl, welcher rezykliert wird, Menge: s. S. 15	t	-	-3.9	-51.1	-51.1	-51.1
Gravel, crushed	Gutschrift für Beton, welcher rezykliert wird, Menge: s. S. 15 und Text	t	-	-75.4	-	-1'000	-149

3.2 RÜCKBAU DER ANLAGE

Wie beim Fundamentrückbau werden auch für den Rückbau der Anlage einerseits die Aufwendungen des Rückbaus bilanziert (Abschnitt 3.2.1) und andererseits Gutschriften für die zurückgewonnenen Materialien separat erfasst (Abschnitt 3.2.2).

3.2.1 Aufwendungen für den Rückbau

Der Zeitaufwand für den Abbau einer Anlage entspricht ungefähr demjenigen des Aufbaus (ca. 1-5-2 Tage)⁹. Aus diesem Grund werden (wie auch in Milanese (2009, S. 23)) für den Rückbau die gleichen Aufwendungen bilanziert wie für den Aufbau. Für eine Anlage des Typs Vestas V90 entspricht dies einem Energieaufwand von 1'300 MJ (Eymann et al., 2015). Für Metalle werden der Transport sowie die Aufwendungen für

⁹ Persönliche Mitteilung, Kurt Maegli, Maegli AG Windenergie, 16. März 2016

Sachbilanz

das Sortieren und Pressen berücksichtigt¹⁰. Für Kunststoffe und Glasfasern werden die Entsorgung in einer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) und der Transport der Materialien zur KVA bilanziert. Gemäss Frischknecht et al. (2007a) wird dafür mit einer Transportdistanz von 10 km gerechnet.

Die Art und Mengen der Materialien in einer Anlage des Typs Vestas V90 werden von Eymann et al. (2015) übernommen. Für die Metalle werden die Aufwendungen für das Sammeln, Sortieren und Pressen des Materials bilanziert, nicht jedoch der Recyclingprozess (cut-off). Die resultierende Sachbilanz ist in Tabelle 3-5 aufgeführt.

Tabelle 3-5: Sachbilanzierung Entsorgung einer Anlage des Typs V90

Verwendete Datensätze	Bemerkung	Einheit	Entsorgung Turbine, Vestas V90 p
diesel, burned in building machine	Energieaufwand Rückbau	MJ	$1.30 \cdot 10^3$
transport, lorry >28t, fleet average	10 km für in KVA entsorgte Materialien	tkm	301
iron scrap, at plant	Aufwendungen für das Sammeln, Sortieren und Pressen; für alle Metalle übernommen	t	238
disposal, glass, 0% water, to municipal incineration		kg	$1.92 \cdot 10^4$
disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration		kg	$7.60 \cdot 10^3$
disposal, polypropylene, 15.9% water, to municipal incineration		kg	$2.93 \cdot 10^3$
disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to municipal incineration		kg	362

3.2.2 Gutschriften für verwertbare Materialien aus der Anlage

Wie beim Fundament (vgl. Abschnitt 3.1.2) wird auf für die Anlage eine Gutschrift für die verwertbaren Materialien berechnet (Tabelle 3-6). Bei Metallen wird eine Gutschrift für das ersetzte Material berechnet, für Kunststoffe, welche in einer Kehrichtverbrennungsanlage entsorgt werden, werden der produzierte Strom und die Wärme berücksichtigt. Gemäss Kägi & Dinkel (2013) werden in Schweizer Kehrichtverbrennungsanlagen bei der Entsorgung von Kunststoffen pro MJ Input im Durchschnitt 0.16 MJ Strom und 0.26 MJ Wärme produziert. Für Polyethylen wird gemäss Doka (2008) mit einem Heizwert von 42.5 MJ/kg gerechnet, für Polypropylen mit 32.8 MJ/kg und für Polyvinylchlorid mit 21.5 MJ/kg. Für den produzierten Strom wird als Gutschrift der Schweizer Strommix verrechnet, für die Wärme wird ein Mix aus 54% Heizöl und 46% Erdgas berücksichtigt (vgl. Tabelle 3-6). Dies entspricht dem Verhältnis von Erdölprodukten und

¹⁰ ecoinvent-Datensatz „iron scrap“

Sachbilanz

Erdgas beim Endenergieverbrauch der Verbrauchergruppen Haushalte, Industrie und Dienstleistungen in der Schweiz im Jahr 2014 (BFE, 2015)

Tabelle 3-6: Sachbilanzierung der Gutschriften für die Materialien aus der Anlage des Typs V90

Verwendete Datensätze	Bemerkung	Einheit	Gutschrift, Entsorgung Turbine, Vestas V90
			p
Pig iron, at plant	Für Stahl, Chromstahl, Gusseisen	kg	$-2.32 \cdot 10^5$
Aluminium, primary, liquid, at plant	-	kg	$-4.75 \cdot 10^3$
Copper, primary, at refinery	-	kg	$-1.95 \cdot 10^3$
Electricity, low voltage, at grid / CH	Für Strom aus KVA	MJ	$-6.83 \cdot 10^4$
Heat, light fuel oil, at industrial furnace / CH	Für Wärme aus KVA	MJ	$-6.01 \cdot 10^4$
Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW/RER	Für Wärme aus KVA	MJ	$-5.08 \cdot 10^4$

3.3 RÜCKBAU DER ELEKTRONIK UND KABEL

In diesem Kapitel wird die Sachbilanzierung des Rückbaus von Netzanschlüssen und Elektronik beschrieben. Die Kabel im Turm werden in der Sachbilanz des Anlage-Rückbaus berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.2.1). Es wird mit 114 kg Elektronik, einer anteilmässigen Menge von 670 kg für den zentralen Transformator und einem 550 m langen Netzanschluss gerechnet (Eymann et al., 2015). Die Sachbilanzierung erfolgt getrennt für die Aufwendungen des Rückbaus (Abschnitt 3.3.1) und für die Gutschriften für rezyklierbare Materialien (Abschnitt 3.3.2).

3.3.1 Aufwendungen für den Rückbau

Zum Energieaufwand für die Entfernung von Rückbau und Elektronik stehen keine Daten zur Verfügung. Es wird angenommen, dass der Energieaufwand vernachlässigbar ist. Für die Sachbilanzierung der Entsorgung und des Transports der Materialien wird gleich wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben vorgegangen. Die resultierende Sachbilanz ist in Tabelle 3-7 gegeben.

Sachbilanz

Tabelle 3-7: Sachbilanzierung Entsorgung der Kabel und Elektronik einer Anlage des Typs V90

Verwendete Datensätze	Bemerkung	Einheit	Entsorgung Kabel und Elektronik p
transport, lorry >28t, fleet average	10 km für in KVA entsorgte Materialien	tkm	2.64
iron scrap, at plant	Aufwendungen für das Sammeln, Sortieren und Pressen; für alle Metalle übernommen	kg	959
disposal, glass, 0% water, to municipal incineration		kg	4.46
disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration		kg	151
disposal, electronics for control units		kg	114
disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to municipal incineration		kg	109

3.3.2 Gutschriften für die verwertbaren elektronischen Bauteile und Kabel

Für rezyklierbare Materialien (Metalle) und für Wärme und Strom, welche bei der Entsorgung von Kunststoffen in einer Kehrichtverbrennungsanlage produziert werden kann, wird eine Gutschrift berechnet. Das Vorgehen zur Berechnung der Gutschriften für Strom und Wärme ist in Abschnitt 3.2.2 beschrieben. Die resultierende Sachbilanzierung ist in Tabelle 3-8 aufgeführt.

Tabelle 3-8: Sachbilanzierung der Gutschriften für die Materialien aus Kabeln und der Elektronik

Verwendete Datensätze	Bemerkung	Einheit	Gutschrift, Entsorgung Turbine, Vestas V90 p
Pig iron, at plant	Für Stahl, Chromstahl, Gusseisen	kg	- 393
Aluminium, primary, liquid, at plant	-	kg	- 308
Copper, primary, at refinery	-	kg	- 259
Electricity, low voltage, at grid / CH	Für Strom aus KVA	MJ	$-1.40 \cdot 10^3$
Heat, light fuel oil, at industrial furnace / CH	Für Wärme aus KVA	MJ	$-1.23 \cdot 10^3$
Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW/RER	Für Wärme aus KVA	MJ	$-1.04 \cdot 10^3$

3.4 RÜCKBAU VON ZUFAHRTSSTRASSEN

Ob und in welchem Ausmass beim Bau einer Windkraftanlage Zufahrtsstrassen erstellt werden müssen, ist standortabhängig. Entsprechend hängt auch der Rückbau der Zufahrtsstrassen von den lokalen Gegebenheiten ab. Grundsätzlich wird beim Bau versucht, bestehende Strassen zu nutzen oder solche zu bauen, die

im Anschluss weiterhin genutzt werden können¹¹. Nichtsdestotrotz bestehen je nach Standort Auflagen, die gebauten Zufahrtsstrassen zu entfernen. In der vorliegenden Studie wird davon ausgegangen, dass ein Strassenstück von 500 m Länge und 4.4 m Breite rückgebaut werden muss. Die Materialmengen werden ausgehend von einer Nutzungsdauer der Strasse von 20 Jahren und einem Aufbau gemäss Spielmann et al. (2007, vgl. S. 75ff) für eine Strasse dritter Klasse berechnet. Die Aufwendungen für den Rückbau der Strasse werden in Abschnitt 3.4.1 beschrieben. In Abschnitt 3.4.2 werden Gutschriften für die rezyklierbaren Materialien bilanziert.

3.4.1 Aufwendungen für den Rückbau

Die betrachtete Strasse (gemäss Spielmann et al. (2007)) besteht aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Lebensdauern. Während die oberste Deckschicht während der angenommenen Nutzungsphase von 20 Jahren einmalig ersetzt werden muss, weisen die unteren Schichten eine Lebensdauer von 40-100 Jahren auf (Spielmann et al., 2007). Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Lebensdauer der Schichten und dem Strassenaufbau gemäss Spielmann et al. (2007) ergeben sich für den Rückbau damit ein Volumen von 2.2 m³ und eine Materialmenge von 5.1 Tonnen pro Meter Strasse (vgl. Anhang Seite 47). Es wird davon ausgegangen, dass die Materialien über 20 km zu einer Aufbereitungsstätte transportiert werden und der Asphalt dort gebrochen wird, damit eine Wiederverwendung des Materials möglich ist. Ausserdem wird berücksichtigt, dass für das Auffüllen der Baugrube Material benötigt wird, für welches ebenfalls mit einem Transport über 20 km zum Standort gerechnet wird¹². Die benötigte Menge des Auffüllmaterials wird über das entfernte Volumen bestimmt, wobei für das Füllmaterial mit der Dichte von Kies gerechnet wird (2000 kg/m³ gemäss KBOB (2011)). Damit ergibt sich die in Tabelle 3-9 gegebene Sachbilanz.

¹¹ Persönliche Mitteilung, Kurt Maegli, Maegli AG Windenergie, 16. März 2016

¹² Für das Auffüllmaterial wird mit dem ecoinvent-Datensatz für Kies gerechnet

Sachbilanz

Tabelle 3-9: Sachbilanzierung der Entsorgung pro Meter Zufahrtsstrassen

Verwendete Datensätze	Bemerkung	Einheit	Entsorgung Zufahrtsstrasse 500 m
Excavation, skid-steer loader/RER	Energieaufwand für Entfernung von Asphalt und Schotter	m ³	1'122
Crushing, rock/RER U	Für entfernten Asphalt	t	805
Gravel, crushed, at mine/CH U	Auffüllmaterial (2.2m ³ /m·500m·2000 kg/m ³)	t	2'244
Transport, lorry >28t, fleet average/CH	Transport des entfernten Materials und des Materials, das zum Auffüllen der Baugrube verwendet wird	tkm	96'280

3.4.2 Gutschriften für verwertbare Materialien aus den Zufahrtsstrassen

In der Schweiz werden Materialien aus dem Strassenbau weitgehend wiederverwendet. Die zurückgewonnenen Materialien ersetzen Kies in diversen Anwendungen (Spielmann et al., 2007). In der vorliegenden Studie wird deshalb eine Gutschrift für Kies berechnet (Tabelle 3-10).

Tabelle 3-10: Sachbilanzierung der Gutschriften für die Materialien aus einem Meter Zufahrtsstrasse

Verwendete Datensätze	Bemerkung	Einheit	Gutschrift, Entsorgung Turbine, Vestas V90 500m
Gravel, crushed, at mine/CH	-5.14 t/m · 500m	t	- 2'570

3.5 BAU UND BETRIEB DER ANLAGE

Um abzuschätzen, wie gross der Anteil des Rückbaus an den gesamten Umweltwirkungen der Windstromproduktion ist, müssen auch der Bau und der Betrieb einer Anlage berücksichtigt werden. Dazu wird das Beispiel einer Anlage des Typs Vestas V90 betrachtet. Die entsprechenden Sachbilanzen werden weitgehend von Eymann et al. (2015) übernommen. Für den Zweck der vorliegenden Studie wird hingegen für den Bau des Fundaments mit den auf Seite 15 gegebenen Materialmengen gerechnet (und nicht mit dem in Eymann et al. (2015) gegebenen Mengen). Anders als bei Eymann et al. (2015) werden ausserdem der Rückbau der Zufahrtsstrassen, der Energieaufwand für den Rückbau sowie die Aufwendungen für das Sortieren rezyklierbarer Metalle berücksichtigt. Für den Rückbau wird von der Rückbauvariante v3a ausgegangen (Entfernung des gesamten Fundaments mit Deponierung des Betons).

4 WIRKUNGSABSCHÄTZUNG

In diesem Kapitel werden die Treibhausgasemissionen, die Gesamtumweltbelastung und der kumulierte Energieaufwand des Rückbaus einer Windkraftanlage aufgezeigt. In einem ersten Schritt werden dabei die fünf Rückbauvarianten für das Fundament betrachtet (Abschnitt 4.1). In einem zweiten Schritt werden die Umweltwirkungen des gesamten Rückbaus (inkl. Windkraftanlage, Zufahrtsstrassen, Netzanschluss und Elektronik) beschrieben (Abschnitt 4.2). Ausserdem werden die Treibhausgasemissionen des Rückbaus mit denjenigen des Anlagebaus und –betriebs verglichen (Abschnitt 4.3). Informationen zu den ausgewerteten Umweltindikatoren finden sich in Abschnitt 2.5.

4.1 UMWELTWIRKUNGEN DES FUNDAMENT-RÜCKBAUS

Die Umweltwirkungen des Fundaments werden zuerst nur für die Aufwendungen des Rückbaus gezeigt (Abschnitt 4.1.1). In einem zweiten Schritt werden die Resultate bei Erteilung von Gutschriften für wiederverwertbare Materialien ausgewiesen (Abschnitt 4.1.2).

4.1.1 Umweltwirkungen des Fundament-Rückbaus ohne Gutschriften

Werden nur die Aufwendungen des Rückbaus betrachtet, so verursachen die Rückbauvariante 1 (kein Rückbau) und die Rückbauvariante 2 (Rückbau des obersten Meters) die geringsten Umweltauswirkungen (Abbildung 4-1). Die Rückbauvariante 1 verursacht keine Treibhausgasemissionen, ist mit keinem Energieaufwand verbunden und weist nur eine geringe Gesamtumweltbelastung auf, welche auf die Landnutzung zurückzuführen ist. Wird der oberste Meter des insgesamt 2.7 m tiefen Fundaments rückgebaut (Variante 2) entstehen ebenfalls nur geringe Umweltauswirkungen. Dies hängt mit der Geometrie des Fundaments zusammen: Da das Fundament im oberen Bereich schmaler ist (vgl. Abbildung 2-5), muss bei dieser Variante nur ein kleiner Anteil des Materials entfernt und aufbereitet oder entsorgt werden.

Wird das Fundament gesamthaft entfernt, sind die Treibhausgasemissionen und die Gesamtumweltbelastung des Rückbaus vom Entsorgungsweg der einzelnen Materialien abhängig. Am grössten sind die Umweltauswirkungen, wenn der Fundamentbeton in einer Deponie entsorgt wird (Variante 3a). Die Deponierung des Betons verursacht 22% der Treibhausgasemissionen, 15% der Gesamtumweltbelastung und 29% des kumulierten Energieaufwands der Rückbauvariante 3a. Die Bereitstellung und der Transport des Materials für das Auffüllen der Baugrube sind für ca. 21% der Treibhausgasemissionen, 43% der Gesamtumweltbelastung und 26% des kumulierten Energieaufwands verantwortlich. Die hohe Gesamtumweltbelastung des Auffüllens der Baugrube hängt damit zusammen, dass mit Kies als Auffüllmaterial gerechnet wird. Die

Wirkungsabschätzung

Nutzung der Ressource Kies trägt bei einer Bewertung nach der Methode der ökologischen Knappheit massgeblich zur hohen Gesamtumweltbelastung bei.

Wird der Beton in einer Sortieranlage gebrochen und wiederverwendet (Variante 3b), entfallen die Umweltauswirkungen der Deponierung. Entsprechend fallen die Umweltwirkungen im Vergleich zu Variante 3a tiefer aus. Wird der Beton vor Ort gebrochen und zum Auffüllen der Baugrube verwendet (Variante 3c), so können einerseits die Transporte des Betons vom Standort zu einer Sortieranlage und andererseits die Bereitstellung und der Transport des Materials zum Auffüllen der Baugrube eingespart werden. Im Vergleich zur Rückbauvariante 3a können die Treibhausgasemissionen, die Gesamtumweltbelastung und der kumulierte Energieaufwand damit um 63%-72% reduziert werden (Abbildung 4-1).

Wirkungsabschätzung

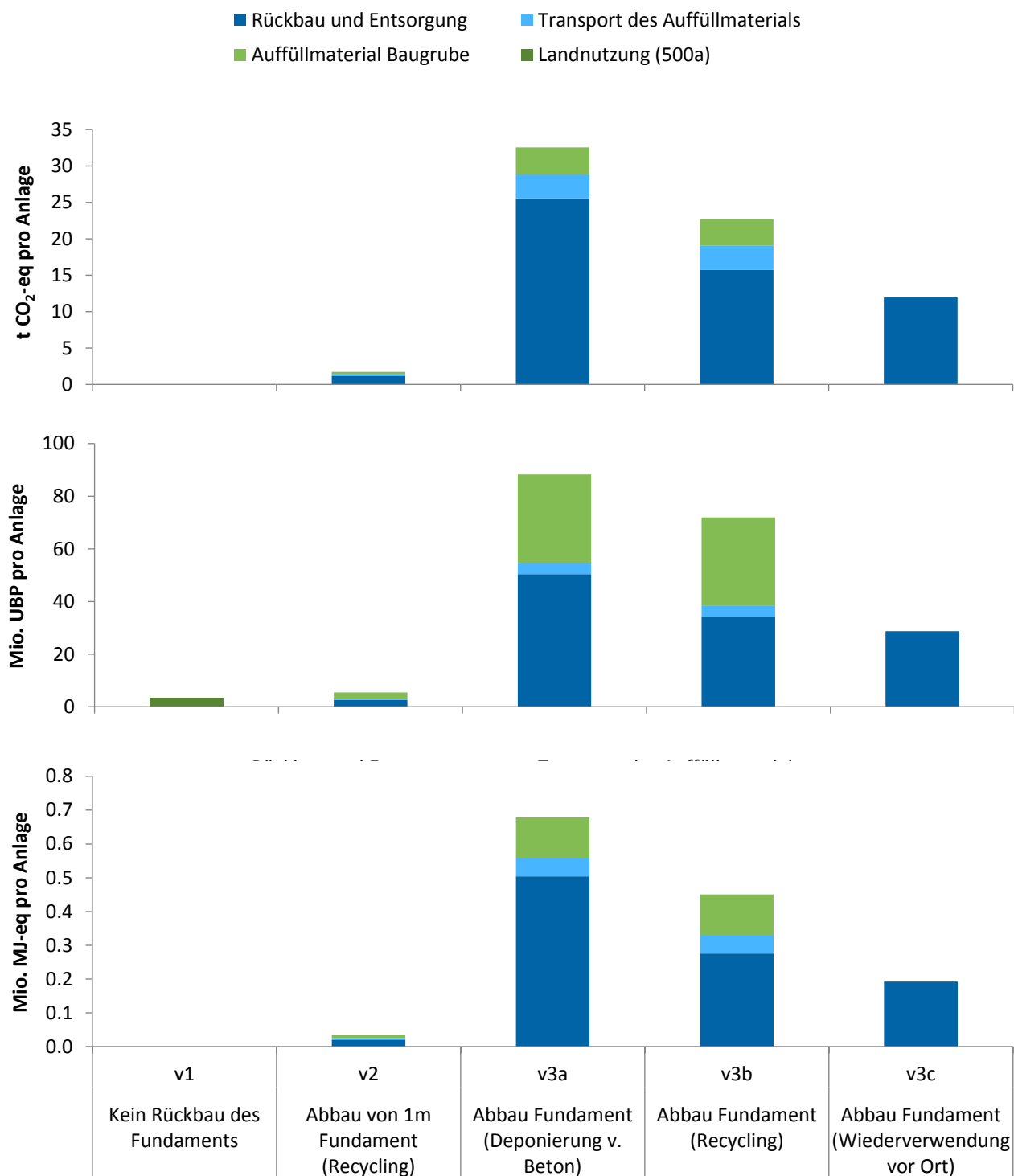


Abbildung 4-1: Treibhausgasemissionen (oben), Gesamtumweltbelastung (Mitte) und kumulierter Energieaufwand (unten) der fünf Rückbauvarianten für das Fundament einer Windkraftanlage (ohne Gutschriften für wiederverwertbare Materialien)

4.1.2 Umweltwirkungen des Fundament-Rückbaus mit Gutschriften

Abbildung 4-2 zeigt die Treibhausgasemissionen, die Gesamtumweltbelastung und den kumulierten Energieaufwand des Fundamentrückbaus, wenn für die wiederverwertbare Rückbaustoffe eine Gutschrift erteilt wird (vgl. dazu Abschnitt 2.4). Ausser bei der Rückbauvariante 1, bei der das Fundament am Standort belassen wird und somit keine Wertstoffe zurückgewonnen werden, ist die Höhe der Gutschrift bei allen Rückbauvarianten und bei allen Umweltindikatoren (Treibhausgasemissionen, Gesamtumweltbelastung und kumulierter Energieaufwand) grösser als die durch den Rückbau verursachten Umweltwirkungen. Die Rückgewinnung und Wiederverwendung des Stahls ist aus Sicht der Umwelt besonders wertvoll (Abbildung 4-2).

Im Gegensatz zur Betrachtung ohne Gutschriften schneiden gemäss Abbildung 4-2 diejenigen Rückbauvarianten gut ab, bei denen das gesamte Fundament entfernt und somit am meisten Materialien zurückgewonnen werden. Die Rückbauvariante 3a unterscheidet sich dabei insofern von den Varianten 3b und 3c, als dass der Beton nicht wiederverwendet wird. Entsprechend entfällt die Gutschrift für ersetzten Kies. Bei einer Wiederverwendung des Betons vor Ort (Variante 3c) wird zwar auch nur eine geringe Gutschrift für überschüssiges Kies erteilt, im Gegensatz zu Variante 3a fallen aber auch keine Aufwendungen für das Auffüllen der Baugrube an. Entsprechend sind die Treibhausgasemissionen, die Gesamtumweltbelastung und der kumulierte Energieaufwand der Variante 3c netto nahezu gleich wie bei der Variante 3b. Das geringfügig bessere Resultat für die Rückbauvariante 3c geht darauf zurück, dass bei einer direkten Wiederverwendung des Betons vor Ort der Transportaufwand reduziert werden kann (Abbildung 4-2).

Wirkungsabschätzung

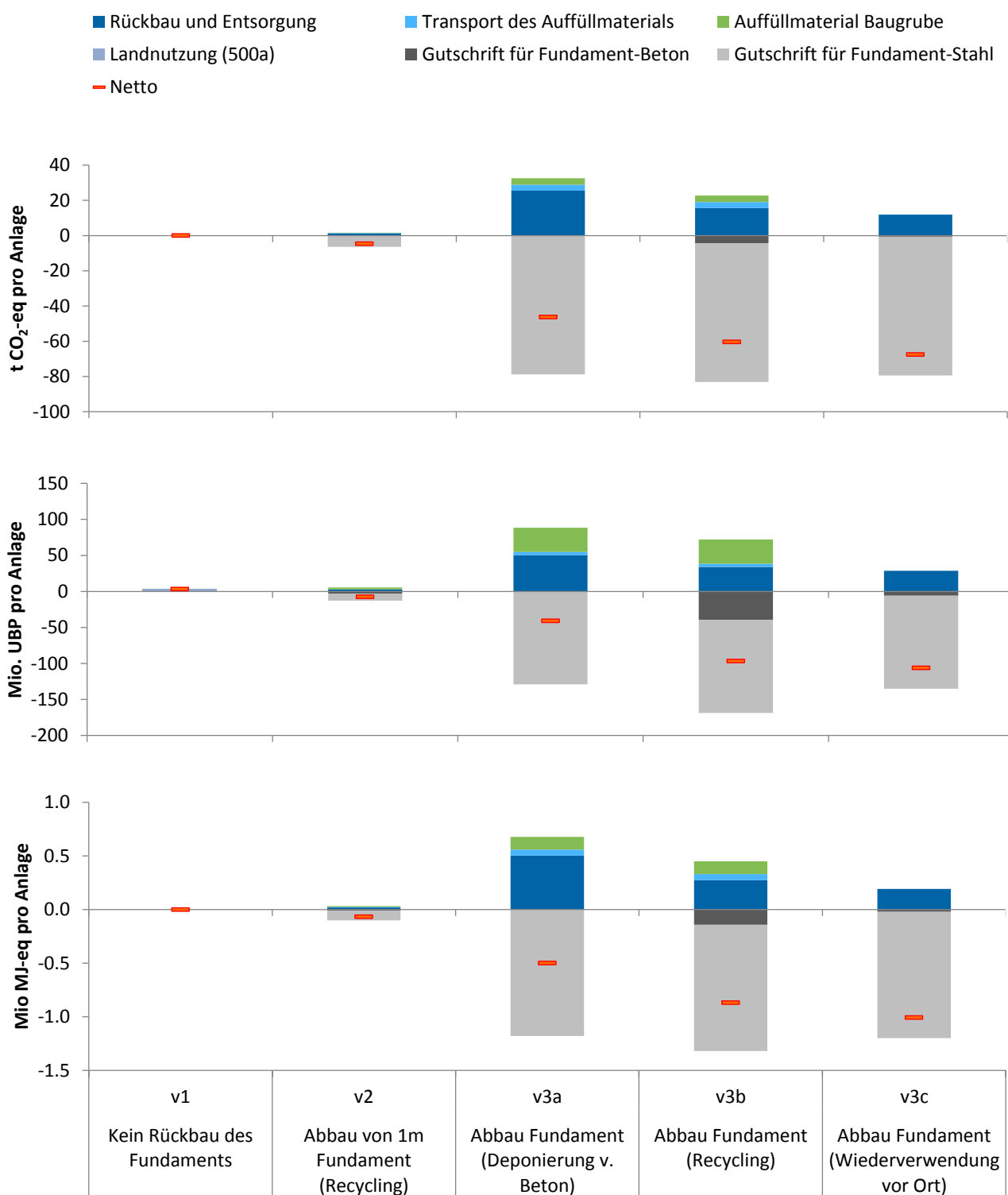


Abbildung 4-2: Treibhausgasemissionen (oben), Gesamtumweltbelastung (Mitte) und kumulierter Energieaufwand (unten) der fünf Rückbauvarianten für das Fundament einer Windkraftanlage mit Gutschriften für wiederverwertbare Materialien

4.2 UMWELTWIRKUNGEN DES RÜCKBAUS DER GESAMTEN ANLAGE

Der Rückbau der gesamten Anlage umfasst neben dem Rückbau des Fundaments auch die Entfernung und Entsorgung der Windkraftanlage, des Netzanschlusses, der Elektronik und der Zufahrtsstrassen. Die entsprechenden Umweltwirkungen werden sowohl ohne (Abschnitt 4.2.1) als auch mit (Abschnitt 4.2.2) Gutschriften für wiederverwertbare Materialien und zurückgewonnene Energie betrachtet.

4.2.1 Umweltwirkungen des gesamten Rückbaus ohne Gutschriften

Abbildung 4-3 zeigt die Treibhausgasemissionen, die Gesamtumweltbelastung und den kumulierten Energieaufwand des gesamten Rückbaus. Die Umweltwirkungen der gezeigten Varianten unterscheiden sich nur bezüglich des Fundament-Rückbaus, während der Rückbau der Strassen, der Elektronik und Kabel sowie der Windkraftanlage bei allen Varianten gleich berücksichtigt wird.

Die Treibhausgasemissionen des Rückbaus werden durch den Abbau und die Entsorgung der Anlage, durch den Rückbau der Strasse und – je nach Rückbauvariante – durch die Entfernung und Entsorgung des Fundaments dominiert (Abbildung 4-3, oben). Beim Rückbau der Windkraftanlage verursacht dabei vor allem die Entsorgung von Kunststoffen in einer Kehrichtverbrennungsanlage Treibhausgasemissionen. Die Treibhausgasemissionen des Strassenrückbaus gehen zu mehr als der Hälfte auf Transporte zurück.

Die Gesamtumweltbelastung des Rückbaus ist zu 43%-66% auf den Rückbau der Zufahrtsstrassen zurückzuführen (Abbildung 4-3, Mitte). Dabei fällt insbesondere die Nutzung der Ressource Kies ins Gewicht, welche für das Auffüllen der Baugrube bilanziert wird. Die Gesamtumweltbelastung der Entsorgung der Windkraftanlage ist zu 67% auf die Entsorgung von Kunststoff und glasfaserverstärktem Kunststoff in einer Kehrichtverbrennungsanlage und zu 31% auf das Sammeln, Sortieren und Pressen von Altmetallen zurückzuführen.

Beim kumulierten Energieaufwand des Rückbaus fallen vor allem der Rückbau der Strasse und – je nach Rückbauvariante – der Rückbau des Fundaments ins Gewicht (Abbildung 4-3, unten). Die graue Energie des Strassenrückbaus geht grösstenteils auf die Materialtransporte (41%) und das Auffüllmaterial (58%) zurück. Weil als Auffüllmaterial mit Kies gerechnet wird, trägt der Strombedarf des Kieswerks rund 40% zum kumulierten Energieaufwand des Strassenrückbaus bei.

Wirkungsabschätzung

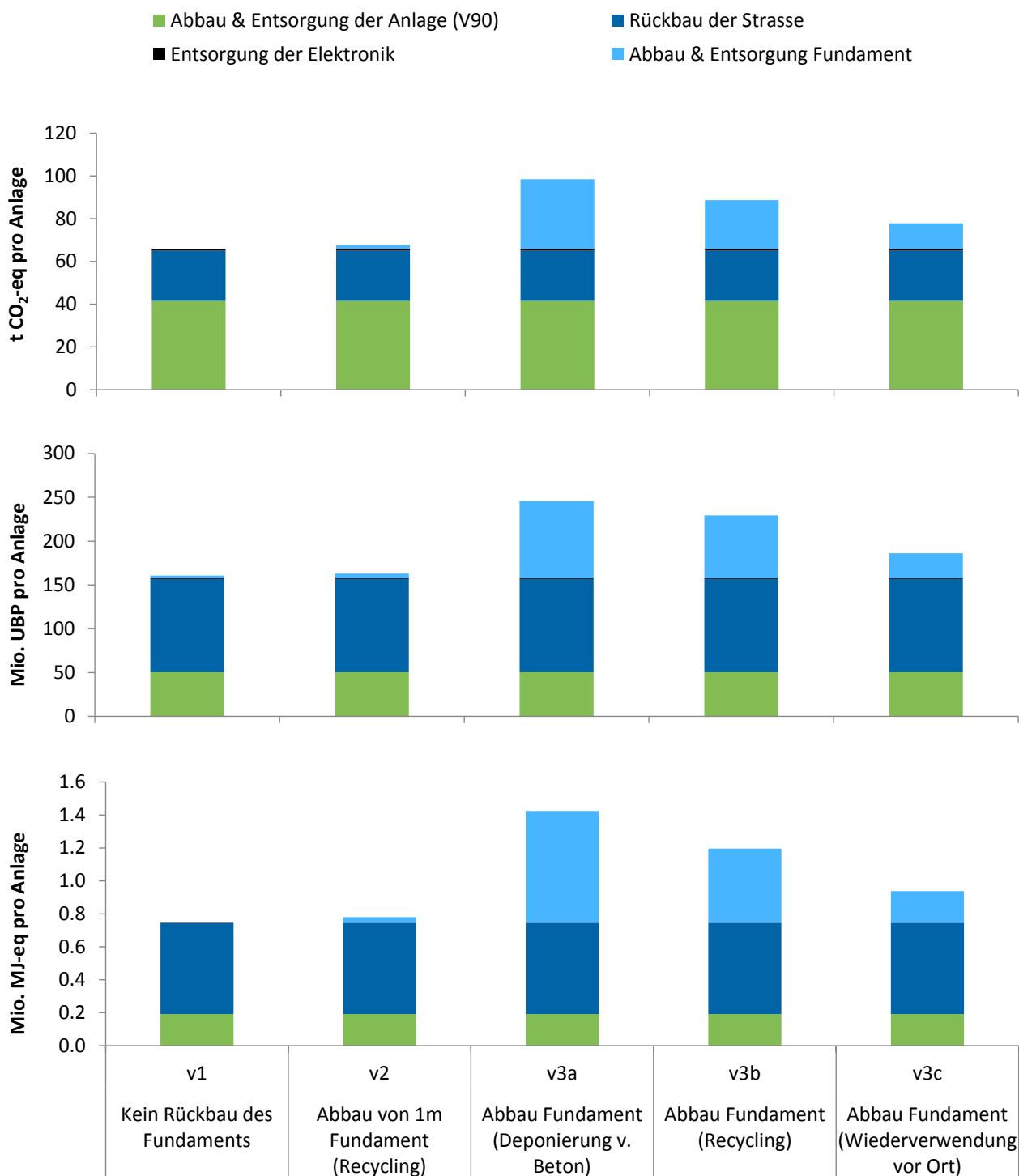


Abbildung 4-3: Treibhausgasemissionen (oben), Gesamtumweltbelastung (Mitte) und kumulierter Energieaufwand (unten) des Rückbaus der gesamten Windkraftanlage (inkl. Zufahrtsstrassen und Netzanschluss) in Abhängigkeit der betrachteten Fundament-Rückbauvarianten (ohne Gutschriften für wiederverwertbare Materialien)

4.2.2 Umweltwirkungen des gesamten Rückbaus mit Gutschriften

Die Treibhausgasemissionen, die Gesamtumweltbelastung und der kumulierte Energieaufwand des Rückbaus mit Gutschriften für wiederverwertbare Materialien und in einer Kehrichtverbrennungsanlage zurückgewonnene Energie sind in Abbildung 4-4 dargestellt. Ausschlaggebend sind bei allen Umweltindikatoren die Gutschriften für die wiederverwertbaren Materialien aus der Windkraftanlage. Dabei ist bei den Treibhausgasemissionen und dem kumulierten Energieaufwand die Gutschrift für den zurückgewonnenen Stahl deutlich am grössten, bei der Gesamtumweltbelastung ist zusätzlich die Gutschrift für die Materialien aus Kupfer relevant. Dies hängt damit zusammen, dass bei der Kupfergewinnung aus Kupfererzen die Luft stark mit Schadstoffen belastet wird. Entsprechend fällt bei der Gesamtumweltbelastung die Gutschrift hoch aus, wenn durch das Kupferrecycling weniger Primärkupfer produziert werden muss. Die Energie, die bei der Verbrennung der Kunststoffe zurückgewonnen werden kann, macht 3% der Treibhausgas-Emissionen, 1% der Gesamtumweltbelastung und 5% des kumulierten Energieaufwands der Gutschriften für die Windkraftanlage aus. Insgesamt übersteigt der ökologische Gewinn durch die Rückführung der gebrauchten Materialien in den Stoffkreislauf (Gutschrift) die Umweltwirkungen, welche durch den Energie- und Ressourcenaufwand des Rückbaus anfallen (Abbildung 4-4).

Wirkungsabschätzung

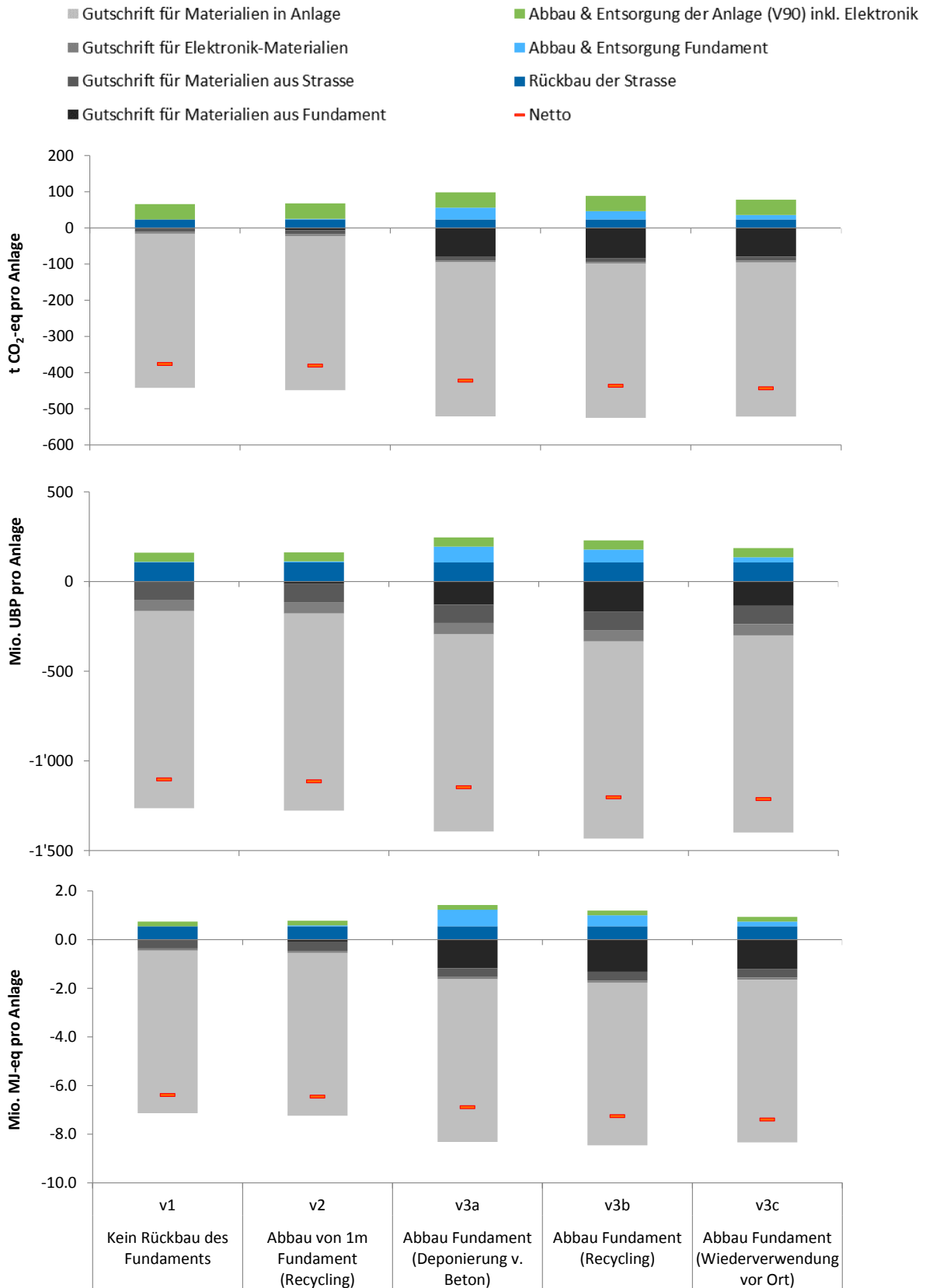


Abbildung 4-4: Treibhausgasemissionen (oben), Gesamtumweltbelastung (Mitte) und kumulierter Energieaufwand (unten) des Rückbaus der gesamten Windkraftanlage (inkl. Zufahrtsstrassen und Netzanschluss) in Abhängigkeit der betrachteten Fundament-Rückbauvarianten mit Gutschriften für wiederverwertbare Materialien

4.3 TREIBHAUSGASEMISSIONEN DES RÜCKBAUS IM VERGLEICH ZUM BAU UND BETRIEB EINER ANLAGE

Über den gesamten Lebenszyklus einer Windkraftanlage betrachtet ist der Rückbau der vollständigen Anlage (inkl. Zufahrtsstrassen) für knapp 9% der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Fundament gesamthaft entfernt und der rückgebaute Beton entsorgt wird (Rückbauvariante 3a). Bei den anderen Rückbauvarianten ist der Anteil der Rückbauphase an der gesamten Klimawirkung einer Windkraftanlage entsprechend geringer (6-8%). In der End-of-life Phase verursachen sowohl der Rückbau der Anlagekomponenten und des Fundaments als auch die Entfernung der Zufahrtsstrassen relevante Treibhausgasemissionen (vgl. Abschnitt 4.2.1). Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus der Windstromproduktion macht der Rückbau des Fundaments bei der Rückbauvariante 3a knapp 3% der Treibhausgasemissionen aus.

Der grösste Teil der Treibhausgasemissionen einer Windkraftanlage geht auf die Erstellung der Anlage zurück. Dabei ist insbesondere die Herstellung des Stahls für den Bau der Anlagekomponenten mit Treibhausgasemissionen verbunden. Der Betrieb der Anlage macht 16% der Treibhausgasemissionen aus, wobei die Klimawirkung des Anlagebetriebs durch SF₆-Emissionen verursacht wird. Schwefelhexafluorid (SF₆) ist ein starkes Treibhausgas, welches für gasisolierte Schaltanlagen eingesetzt wird. Der Transport der Anlage zum Standort erfolgt mehrheitlich per Schiff und ist daher nur mit geringen Treibhausgasemissionen verbunden (Abbildung 4-5).

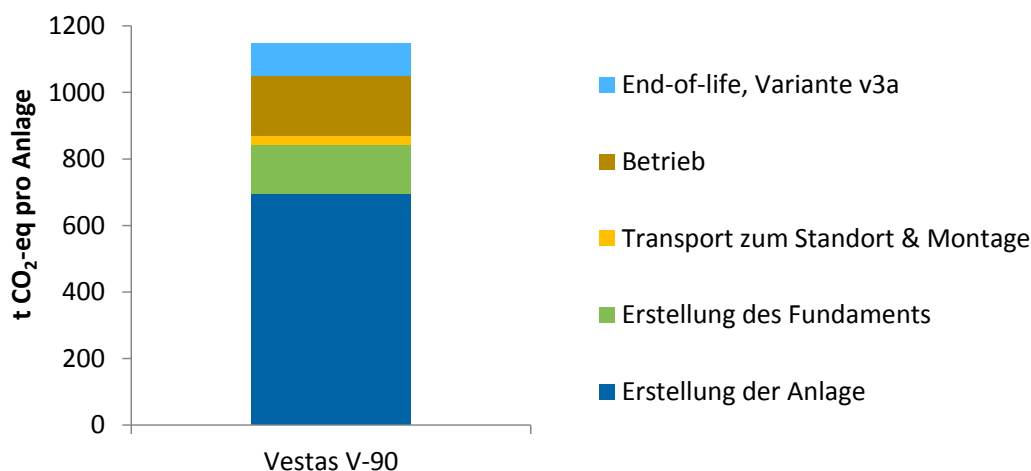


Abbildung 4-5: Treibhausgasemissionen des Baus, Betriebs und Rückbaus (end-of-life) einer Windkraftanlage des Typs Vestas V90 bei Deponierung des gesamten Fundamentbetons (Rückbauvariante 3a).

5 DISKUSSION

Der gesamte Rückbau einer Anlage verursacht – je nach Rückbauvariante – Treibhausgasemissionen von 66-98 t CO₂-eq. Über den Lebenszyklus einer Windkraftanlage (inklusive Bau, Transport und Montage und Betrieb) ist die end-of-life-Phase damit für 6-9% der Treibhausgasemissionen einer Anlage verantwortlich. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von Lago et al. (2009, S. 315), wonach die Rückbauphase im Lebenszyklus der Windstromproduktion je nach Umweltindikator 3-14% der Umweltauswirkungen ausmacht. Der Rückbau des Fundaments trägt maximal 3% zu den Treibhausgasemissionen der Windstromproduktion bei.

Der Vergleich der verschiedenen Rückbauvarianten für das Fundament zeigt, dass die Betrachtungsperspektive eine wichtige Rolle spielt: Berücksichtigt man die Aufwendungen des Rückbaus, wird deutlich, dass eine gesamthafte Entfernung des Fundaments im Vergleich zu einer teilweisen Entfernung (oberster Meter) je nach Rückbauvariante und Umweltindikator zwischen 5- und 20-Mal höhere Umweltauswirkungen verursacht. Die Umweltauswirkungen gehen dabei vor allem auf den Transport und die Entsorgung der entfernten Materialien und die Aufwendungen für das Auffüllen der Baugrube zurück. Entsprechend schliessen in der Ökobilanz die Rückbauvarianten 1 und 2, bei denen das Fundament nicht oder nur teilweise entfernt wird, am besten ab. Die andere Betrachtungsperspektive, welche Gutschriften für wiederverwertbare Materialien berücksichtigt, führt gerade zum gegenteiligen Schluss: Je mehr Materialien aus dem Fundament zurückgewonnen und wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden, desto grösser sind die Gutschriften und desto besser entsprechend das Ergebnis. Auf die Frage, ob in Ökobilanzen Gutschriften für wiederverwertbare Materialien angerechnet werden sollen, gibt es keine eindeutige und objektive Antwort (vgl. Frischknecht (2010). Frischknecht & Stucki (2010) schlagen vor, in Ökobilanzen, welche als Grundlage für politische Entscheidungsprozesse auf regionaler oder nationaler Ebene dienen, einen Berechnungsansatz zu verwenden, welcher es erlaubt, die ökologischen Konsequenzen von Beschlüssen aufzuzeigen. Als Allokationsansatz wird für diesen Fall das Gutschriftenverfahren empfohlen (Frischknecht & Stucki, 2010).

Ein Nachteil des Gutschriftenverfahrens ist die grosse Abhängigkeit davon, wie die Gutschriften bestimmt werden. So gibt es beispielsweise für rückgebauten Beton diverse Verwendungsmöglichkeiten. Entsprechend ersetzt das Recyclingmaterial auch verschiedene Primärmaterialien. Je nach dem, mit welchem Material gerechnet wird, fällt die Gutschrift unterschiedlich hoch aus.

Betrachtet man den gesamten Rückbau, so wird das Ökobilanzergebnis stark vom Abbau und der Entsorgung der Anlage (und den entsprechenden Gutschriften) beeinflusst, während die Bedeutung des Fundaments, der Elektronik und der Zufahrtsstrassen geringer ist. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass in der vorliegenden Studie davon ausgegangen wird, dass die Anlage zerlegt und die einzelnen Materialien entsorgt oder rezykliert werden. Oft werden jedoch die Anlagen gesamthafte an einem neuen Standort wieder

aufgebaut. Eine solche direkte Wiederverwendung einer Windkraftanlage wird in der vorliegenden Studie nicht ökobilanziert, stellt aber aufgrund der eingesparten Aufwendungen für Recycling- und Herstellungsprozesse die umweltfreundlichste Option dar. Je länger die Betriebsdauer einer Windkraftanlage, desto tiefer sind die Umweltauswirkungen pro produzierte kWh Windenergie.

Diese Studie beschränkt sich auf die Betrachtung der ökologischen Aspekte des Rückbaus. Die ökonomischen Herausforderungen, die sich aus der kompletten Entfernung des Fundaments ergeben, werden bewusst ausgeklammert. Fest steht, dass der finanzielle Aufwand für den Rückbau des gesamten Fundaments gross ist.

5.1 UNSICHERHEITEN

In der Schweiz gibt es derzeit elf Windkraft-Standorte, die eine installierte Nennleistung von >1 MW aufweisen. Diese Standorte unterscheiden sich stark voneinander, sowohl hinsichtlich der Lage und der lokalen Bodenverhältnisse als auch in Bezug auf die installierten Anlagentypen. Diese Faktoren beeinflussen unter anderem die Fundamentgrösse, die Länge, Beschaffenheit und Bauweise der Zufahrtsstrassen und die Distanz für Materialtransporte. Somit ist auch die Ökobilanz für den Bau und Rückbau von Windkraftanlagen stark standortabhängig. Während in der Studie von Eymann et al. (2015) standortspezifische Faktoren berücksichtigt wurden, liegt der Fokus der vorliegenden Studie auf der Abbildung einer durchschnittlichen Situation. Entsprechend können sich für einen spezifischen Standort relevante Unterschiede ergeben. So haben beispielsweise die Distanz vom Standort zu Deponien und Aufbereitungsanlagen für die rückgebauten Materialien, die Distanz, über welche das Material zum Auffüllen der Baugrube transportiert werden muss sowie Aufbau und Länge der Zufahrtsstrasse einen relevanten Einfluss auf das Ökobilanzergebnis. Auch bestehen standortabhängig unterschiedliche Vorgaben von Seiten der Behörden. Für einen konkreten Standort stehen deshalb unter Umständen nicht alle Rückbauvarianten, welche in dieser Studie betrachtet werden, zur Option.

Neben den Unsicherheiten, die sich aus der Standortabhängigkeit ergeben, bestehen auch Unsicherheit im Zusammenhang mit den Sachbilanz-Modellen. So wird beispielsweise in der vorliegenden Studie die Sachbilanz für das Material zum Auffüllen der Baugrube nach Entfernung des Fundaments durch den ecoinvent-Datensatz für Kies angenähert. Gerade bei der Bestimmung der Gesamtumweltbelastung nach der Methode der ökologischen Knappheit beeinflusst dies das Ergebnis stark, weil diese Methode die Nutzung der Ressource Kies bewertet. Entsprechend fällt das Resultat anders aus, wenn anstelle von Kies mit einem anderen Auffüllmaterial gerechnet wird.

5.2 EMPFEHLUNGEN

Das Ökobilanzergebnis hängt von der Betrachtungsperspektive ab, weshalb sich auf die Empfehlungen entsprechend unterscheiden:

Fokus auf Windkraftanlage: Liegt der Schwerpunkt auf der Beschreibung der Umweltwirkungen, die in der Gegenwart oder der nahen Zukunft im Zusammenhang mit dem Bau, Betrieb und Rückbau von Windkraftanlagen anfallen, so wird die Verwendung des cut-off-Ansatzes empfohlen. Entsprechend wird geraten, das Fundament nicht oder nur teilweise zurückzubauen, um den Einsatz von Baumaschinen und die Aufwendungen für den Abtransport und die Entsorgung von Rückbaumaterial möglichst gering zu halten. Die im Boden belassenen Materialien sind für die kommenden Generationen nicht verloren und können auch zu einem späteren Zeitpunkt noch rückgebaut werden. Die Unsicherheiten der Ökobilanzergebnisse sind bei diesem Ansatz verhältnismässig gering.

Fokus auf Gesamtsystem: Bei einer umfassenden Sichtweise werden nicht nur die Umweltwirkungen einberechnet, die in direktem Zusammenhang mit der Windstromproduktion stehen, sondern es wird zusätzlich berücksichtigt, dass durch die Rückgewinnung und Aufbereitung von Baumaterialien nach der Nutzungsphase Umweltauswirkungen in einem anderen Produktsystem vermieden werden können (Gutschriften-Verfahren). So gelangt beispielsweise durch das Recycling des Stahls aus einer Windkraftanlage umweltfreundlicher Sekundärstahl auf den Markt, welcher für die Produktion neuer Stahlprodukte verwendet werden kann. Damit werden sowohl die Rohstoffe als auch die Energieressourcen geschont. Weil nicht bei jedem Material eindeutig festgelegt werden kann, welches Produkt nach der Altstoffaufbereitung ersetzt wird, sind die Unsicherheiten der Ökobilanzergebnisse bei diesem Ansatz verhältnismässig hoch. Am besten schliessen bei Verwendung des Gutschriften-Verfahrens die Rückbauvarianten 3b und 3c, bei welchen sämtliche Fundamentmaterialien wiederverwendet werden, ab. Entsprechend wird empfohlen, die gesamte Windkraftanlage samt Fundament nach der Nutzungsdauer vom Standort zu entfernen und dem Recycling zuzuführen.

Mit Windkraftanlagen lässt sich erneuerbarer Strom mit einer geringen Umweltbelastung produzieren. Beim Rückbau der Anlagen ist es aus ökologischer Sicht empfehlenswert, rückgewonnene Materialien wie Stahl oder Kupfer zu rezyklieren und damit in den Stoffkreislauf zurückzuführen.

LITERATUR

- Asendorpf, D. (2015,). Recycling von windkraftanlagen. *Deutschlandradio Kultur*
- BAFU. (2015). Indikator Energiegewinnung bei der Abfallverbrennung. <http://www.bafu.admin.ch/umwelt/indikatoren/08484/08493/index.html?lang=de>, 2016/04/12
- Bergsma, G., & Sevenster, M. (2013). *End-of-life best approach for allocating recycling benefits in LCAs of metal packaging*. Delft. CE Delft.
- BFE. (2015). *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2014*. Bern. Bundesamt für Energie BFE.
- Doka, G. (2003). *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Part V: Building Material Disposal*. ecoinvent report No. 13 Dübendorf. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Doka, G. (2008). *Calculation Tool for waste disposal in Municipal Solid Waste Incinerators MSWI*. Excel-Tool v2.1
- ecoinvent Centre. (2010). ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No. 1-25. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- EnergieSchweiz. (2015). Alle Schweizer Windenergieanlagen auf einen Blick. <http://www.energieschweiz.ch/de-ch/utilities/ueber-energieschweiz/news/2015/alle-schweizer-windenergieanlagen-auf-einen-blick.aspx>, 2016/02/23
- Eymann, L., Stucki, M., Fürholz, A., & König, A. (2015). *Ökobilanzierung von Schweizer Windenergie*. Wädenswil. Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften; Im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE.
- Frischknecht, R., Büsser Knöpfel, S., Flury, K., Stucki, M., & Ahmadi, M. (2013). *Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz*. Umwelt-Wissen Nr. 1330 Bern. Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hirschler, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., & Spielmann, M. (2007a). *Overview and Methodology*. ecoinvent report No. 1, v2.0 Dübendorf, CH. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

Literatur

- Frischknecht, R. (2010). LCI modelling approaches applied on recycling of materials in view of environmental sustainability, risk perception and eco-efficiency. *Int J LCA*, 15(7), 666-671.
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H. -J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., Hellweg, S., Hirschier, R., Humbert, S., Margni, M., & Nemecek, T. (2007b). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods*. ecoinvent report No. 3, v2.0 Dübendorf, CH. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Frischknecht, R., & Stucki, M. (2010). Scope-dependent modelling of electricity supply in life cycle assessments. *Int J LCA*, 15(8), 806-816.
- Geiss, R. (Ed.). (2015). *Chemie entdecken und verstehen. Band 1: Die Verwandlung der Stoffe* (Version 6.6 ed.)
- Hau, E. (2008). *Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit* (4., vollständig neu bearbeitete Auflage ed.) Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-540-72151-2
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kägi, T., & Dinkel, F. (2013). *LCA von Kunststoff-Recycling. Verwertungsvarianten im Vergleich*. Carbotech.
- KBOB. (2009). *Ökobilanzdaten im Baubereich*. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik.
- KBOB, eco-bau, & IPB. (2011). *Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand Januar 2011, Empfehlung Nachhaltiges Bauen 2009/1*. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik.
- Kellenberger, D., Althaus, H. -J., Jungbluth, N., Künniger, T., Lehmann, M., & Thalmann, P. (2007). *Life Cycle Inventories of Building Products*. CD-ROM No. ecoinvent report No. 7, v2.0 Dübendorf, CH. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Klöpffer, W., & Grahl, B. (2009). In WILEY VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (Ed.), *Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf* (3rd ed.). Weinheim
- Lago, C., Prades, A., Lechón, Y., Oltra, C., Pullen, A., & Auer, H. (2009). Wind energy - the facts. Part V: Environmental issues. In European Wind Energy Association EWEA (Ed.), *Wind Energy - The Facts: A Guide to the Technology, Economics and Future of wind power* (pp. 307-411) Earthscan.

Literatur

- LC-inventories. (2012). *Corrections, updates and extensions of ecoinvent data v2.2*. ESU-services Ltd.
- Löfker, J. O. (2015,). Ausgediente Windräder: Sprengen und verbrennen. *Spiegel Online*
- Lünser, H. (1999). *Ökobilanzen im Brückenbau: Eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung*. Springer Basel AG.
- Masherova, A. (2015, #12/2015). Rätselraten um Rückbaukosten. Eine Kalkulation für neue Windparks problematisch. *4initia Newsletter*, 2-4.
- Milanese, A. (2009). *Recyclability of Wind Turbines, Current and Future: Technical, Econommic and Environmental* (Master of Science in Renewable Energy and Resource Management).
- Nordex. (2011). *Rückbauaufwand für Windenergieanlagen*. No. K0801_025550_DE Hamburg. Nordex Energy GmbH.
- PRé Consultants. (2016). *SimaPro 8.1*. Amersfoort, NL.
- Schaumann, P., & Marten, F. (2005). *Auch der Rückbau kostet Geld. Ein Vergleich der Rückbaukosten von verschiedenen WEA-Tragstrukturen*. Universität Hannover. Institut für Stahlbau.
- Spielmann, M., Roberto Dones, Bauer, C., & Tuchschnid, M. (2007). *Life Cycle Inventories of Transport Services*. CD-ROM No. ecoinvent report No. 14, v2.0 Dübendorf, CH. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Stahl-Zentrum. (2016). Stahlrecycling: Aus Alt wird Neu. <http://www.stahl-online.de/index.php/themen/energie-und-umwelt/recycling/>, 2016/04/12
- Wiser, R., Yang, Z., Hand, M., Hohmeyer, O., Infield, D., Jensen, P. H., Nikolaev, V., O'Malley, M., Sinden, G., & Zervos, A. (2011). Wind energy. In O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickenmeier, G. Hansen, S. Schlömer & C. von Stechow (Eds.), *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (pp. 535-607) Cambridge University Press.

ANHANG

A1 BAUPLAN FUNDAMENT

Abbildung A 1 zeigt den Bauplan eines Fundaments für eine Anlage des Typs Vestas V90. Die im Plan eingezeichneten Masse dienen als Grundlage für die Sachbilanzierung des Fundamentrückbaus.

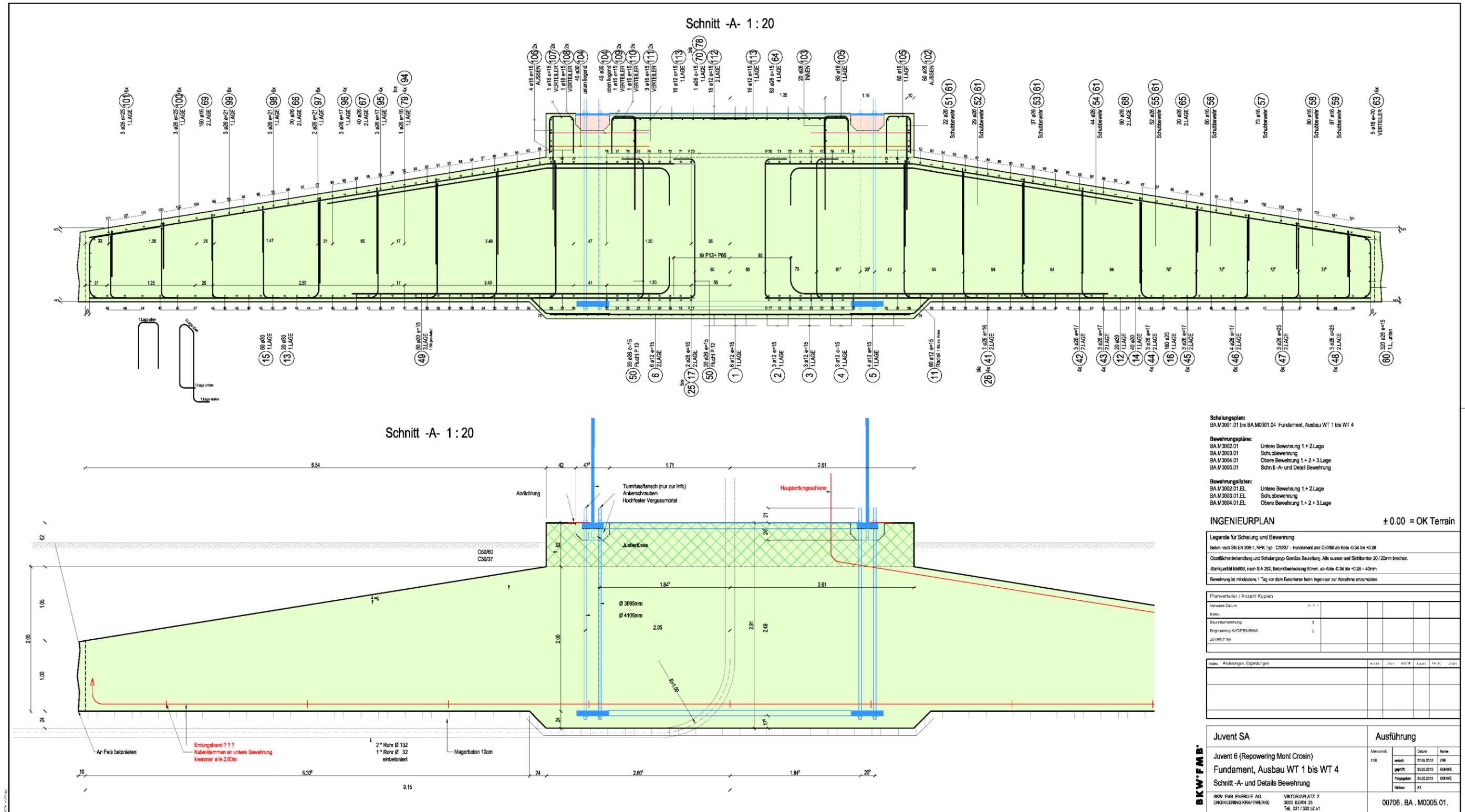


Abbildung A 1: Plan eines Fundaments einer Vestas V90 am Standort Mont Crosin

Anhang

A2 STRASSENRÜCKBAU

In Abschnitt 3.4.1 sind die Materialmengen aufgeführt, die beim Rückbau der Strassen anfallen. Tabelle A 1 enthält die Für die Berechnung notwendigen Grundlagen. Es wird dabei von einer Strassenbreite von 4.4 Meter ausgegangen.

Tabelle A 1: Anfallende Materialmengen und –volumina beim Strassenrückbau

Schicht	Belag (surfacing)			Fundament (road foundation)			Unterbau (subgrade)			Total
	Lebensdauer	15 Jahre	40 Jahre	100 Jahre	Schichtdicke (m)	Bitumen (t/m)	Kies (t/m)	Schichtdicke (m)	Bitumen (t/m)	
Lebensdauer		15 Jahre	40 Jahre	100 Jahre						-
Anzahl Erneuerungen in 20 Jahren		1	0	0						-
Mengen und Masse gemäss Spielmann et al. (2007)	Schichtdicke (m)	Bitumen (t/m)	Kies (t/m)	Schichtdicke (m)	Bitumen (t/m)	Kies (t/m)	Schichtdicke (m)	Bitumen (t/m)	Kies (t/m)	-
	0.03	0.02	0.28	0.1	0.05	0.96	0.35	0	3.53	-
Total entferntes Volumen bei 4.4 m Breite (m ³ /m)		0.26	0.44	1.5						2.2
Total entfernte Menge bei 4.4 m Breite (t/m)		0.6	1.0	3.5						5.1