

**Dokument-Information:**Autoren: Florian Robineck<sup>1</sup>, Isabel O'Connor<sup>2</sup>,  
Valentina Nesa<sup>2</sup>

Datum: 21. September 2023

Version: 1.0

<sup>1</sup>zirkulit AG, <sup>2</sup>EBP Schweiz AG

# Programmbeschreibung

## Dauerhafte CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in Betongranulat

**Programmentwickler****zirkulit AG**Steinackerstrasse 56  
8302 Kloten[www.zirkulit.ch](http://www.zirkulit.ch)**EBP Schweiz AG**Mühlebachstrasse 11  
8032 Zürich<https://www.ebp.ch>**Kontaktperson****Reto Märki**Breitloostrasse 7  
8154 Oberglatt

Direkt: +41 43 411 28 63

Mobil: +41 79 863 89 23

[reto.maerki@zirkulit.ch](mailto:reto.maerki@zirkulit.ch)**Dr. Isabel O'Connor  
St.V. Valentina Nesa**Mühlebachstrasse 11  
8032 Zürich

Telefon: +41 44 395 16 16

Direkt: +41 44 395 11 46

[Isabel.OConnor@ebp.ch](mailto:Isabel.OConnor@ebp.ch)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ANGABEN ZUM PROGRAMM</b> .....	<b>4</b>
1.1	PROGRAMMZUSAMMENFASSUNG.....	4
1.2	TYP, UMSETZUNGSFORM UND PROGRAMMSTANDORT .....	4
1.2.1	<i>Typ</i> .....	4
1.2.2	<i>Umsetzungsform</i> .....	4
1.2.3	<i>Programmstandort</i> .....	4
1.3	BESCHREIBUNG DES PROGRAMMS.....	5
1.3.1	<i>Ausgangslage</i> .....	5
1.3.2	<i>Programmziel</i> .....	5
1.3.3	<i>Technologie</i> .....	5
1.3.4	<i>Programmspezifische Aspekte</i> .....	6
1.4	REFERENZSZENARIO .....	8
1.5	TERMINE.....	8
<b>2</b>	<b>BERECHNUNG EX-ANTE ERWARTETE SENKENLEISTUNG</b> .....	<b>10</b>
2.1	SYSTEMGRENZE UND EMISSIONSQUELLEN.....	10
2.2	EINFLUSSFAKTOREN.....	12
2.3	LEAKAGE .....	12
2.4	EMISSIONEN DER VORHABEN .....	12
2.5	REFERENZENTWICKLUNG .....	13
2.6	ERWARTETE SENKENLEISTUNG (EX-ANTE).....	13
<b>3</b>	<b>NACHWEIS DER ZUSÄTZLICHKEIT</b> .....	<b>14</b>
3.1	ANALYSE DER ZUSÄTZLICHKEIT.....	14
3.1.1	<i>Wirtschaftlichkeitsanalyse</i> .....	14
3.1.2	<i>Praxisanalyse</i> .....	15
3.2	FINANZHILFEN UND DOPPELZÄHLUNGEN.....	15
<b>4</b>	<b>AUFBAU UND UMSETZUNG DES MONITORINGS</b> .....	<b>16</b>
4.1	BESCHREIBUNG DER GEWÄHLTEN NACHWEISMETHODE.....	16
4.2	EX-POST BERECHNUNG DER ANRECHENBAREN SENKENLEISTUNG .....	16
4.2.1	<i>Formeln zur ex-post Berechnung der erzielten Senkenleistung</i> .....	16
4.3	DATENERHEBUNG UND PARAMETER.....	18
4.3.1	<i>Fixe Parameter</i> .....	18

4.3.2	<i>Dynamische Parameter und Messwerte</i> .....	19
4.3.3	<i>Plausibilisierung der Daten und Berechnungen</i> .....	20
4.4	PROZESS- UND MANAGEMENTSTRUKTUR .....	22
4.4.1	<i>Aufnahme weiterer Vorhaben in das Programm</i> .....	22
4.4.2	<i>Monitoringprozess</i> .....	22
4.4.3	<i>Qualitätssicherung und Archivierung</i> .....	22
4.4.4	<i>Verantwortlichkeiten und institutionelle Vorrichtungen</i> .....	23
<b>5</b>	<b>FREMDÜBERWACHUNG DURCH EBP SCHWEIZ AG</b> .....	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>ANHÄNGE</b> .....	<b>26</b>

---

## **1 Angaben zum Programm**

### **1.1 Programmmzusammenfassung**

Das Programm erzielt die langfristige Sequestrierung von biogenem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in Betongranulat. Das mit CO<sub>2</sub> angereicherte Betongranulat kann für die Herstellung von Beton aus Sekundärrohstoffen verwendet werden und ersetzt dort die Primärrohstoffe Sand und Kies. Der Einsatz von Betongranulat im Beton ist bereits seit vielen Jahren gängige Praxis. Neu ist die vorgängige Anreicherung des Betongranulats mit CO<sub>2</sub> durch die neu entwickelte Sequestrierungstechnologie. So wird eine zusätzliche Senkenleistung erzielt.

Aktuell können Kompensationsprogramme des Bundes gemäss CO<sub>2</sub>-Gesetz keine Senkenleistung geltend machen, ausgenommen davon ist die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in Holzprodukten (vgl. CO<sub>2</sub>-Verordnung, Anhang 3). Dies hätte mit der Totalrevision des CO<sub>2</sub>-Gesetzes geändert werden sollen, aber aufgrund des negativen Volksentscheids vom 13.06.2021 bleibt dies derzeit nicht möglich. Die Integration von Senken-Projekten in die Kompensationsprojekte wird aktuell vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) geprüft.

Das Programm sollte ursprünglich als Kompensationsprogramm des Bundes gemäss totalrevidiertem CO<sub>2</sub>-Gesetz registriert werden. Da dies wie erwähnt immer noch nicht möglich ist, wurde beschlossen, die aus dem Programm generierten Emissionsreduktionen auf dem freiwilligen CO<sub>2</sub> Markt zu verkaufen. Das Programm wurde jedoch gemäss den Anforderungen der Vollzugsmitteilung des BAFU für die Kompensationsprojekte in der Schweiz entwickelt. Abweichungen von den BAFU-Anforderungen für Kompensationsprojekte und -programme sowie die Rolle der involvierten Akteure bei der Entwicklung und beim Monitoring des Programms sind im Kapitel 5 beschrieben.

### **1.2 Typ, Umsetzungsform und Programmstandort**

#### **1.2.1 Typ**

Bei dem von der zirkulit AG entwickelten Programm handelt es sich um ein Senken-Programm zur langfristigen Sequestrierung von biogenem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) in Betongranulat. Wie in Kapitel 1.1 erläutert, wird dieser Projekttyp derzeit noch nicht als Kompensationsprojekt des Bundes gemäss CO<sub>2</sub>-Gesetz anerkannt, die Anerkennung von Senken-Projekten wird aber aktuell vom BAFU geprüft.

#### **1.2.2 Umsetzungsform**

Es handelt sich hier um ein Programm (vgl. KOP-Mitteilung des BAFU, Kapitel 2.2 und 8.2). Dies umfasst Vorhaben, deren gemeinsamer Zweck die Sequestrierung von CO<sub>2</sub> in Betongranulat ist. Konkret werden als Vorhaben stationäre und mobile Stationen bezeichnet, die mit einer gemeinsamen Technologie CO<sub>2</sub> im Betongranulat binden (vgl. Kapitel 1.3.3).

#### **1.2.3 Programmstandort**

Das Programm besteht aktuell aus einem einzelnen Vorhaben, das als Mustervorhaben dient. Dabei handelt es sich um eine stationäre Anlage im Ebirec, dem Baustoff-Recycling-Zentrum mit integriertem Betonwerk der Eberhard Bau AG (Standortadresse: Oberglattestrasse 17, 8153 Rümlang).

Zukünftig besteht die Möglichkeit einer schweizweiten Umsetzung durch den Einsatz einer oder mehrerer mobiler oder stationärer Anlagen, welche aktuell als Entwurf bestehen. Die Erkenntnisse aus der stationären Anlage in Rümlang (Ebirec) fliessen in die Entwicklung der weiteren Anlagen ein. Mobile und stationäre Anlagen können in Zukunft als Vorhaben des Programms aufgenommen werden, insofern sie die Aufnahmekriterien erfüllen (vgl. Kapitel 1.3.4).

## 1.3 Beschreibung des Programms

### 1.3.1 Ausgangslage

Beton ist einer der am häufigsten verwendeten Baustoffe in der Schweiz. Jeder Beton wird aus einer Mischung von Wasser, Zement und Gesteinskörnungen in verschiedenen Fraktionen hergestellt. Die Gesteinskörnungen können aus Primärrohstoffen (Kies und Sand) oder Sekundärrohstoffen, sogenannte rezyklierte Gesteinskörnungen, bestehen. Rezyklierte Gesteinskörnungen für den Einsatz in hochwertigen Betonen werden vorwiegend aus Betonabbruch hergestellt. Der Betonabbruch wird dazu aufbereitet, das heisst gebrochen und in die verschiedenen Fraktionen gesiebt. Das so entstandene Betongranulat ersetzt bei der Produktion von neuem Beton die Primärrohstoffe.

Der Baustoff Beton ist mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden, welche vorwiegend aus der Herstellung des Zements stammen. Um den hohen Emissionen entgegenzuwirken, werden in der Beton- und Zementindustrie neue Technologien eingesetzt. Eine dieser Technologie ist die dauerhafte Sequestrierung von Kohlenstoffdioxid in Betongranulat, wie von der zirkulit AG entwickelt und im Folgenden weiter beschrieben. Die hier angestrebte Technologie entspricht bisher nicht der üblichen Praxis in der Beton-Branche (vgl. Kapitel 1.3.3).

### 1.3.2 Programmziel

Ziel des Programms ist eine Senkenleistung zu generieren, indem Kohlenstoffdioxid in Betongranulat langfristig sequestriert wird. Dies wird im Rahmen der Aufbereitung von Betonabbruch und anschliessender Produktion von Beton aus rezyklierten Gesteinskörnungen geschehen.

Dieses Programm unterscheidet sich von «klassischen» Kompensationsprogrammen, indem eine Senkenleistung und keine Emissionsverminderung geltend gemacht wird.

### 1.3.3 Technologie

#### Prozessablauf

Kohlenstoffdioxid aus biogener Herkunft wird an der Quelle (Deutschland bis November 2022<sup>1</sup>, danach Schweizer Biogasanlage) abgeschieden (siehe Abbildung 1, Kapitel 2.1). Um das CO<sub>2</sub> transportfähig zu machen, wird es an der Quelle verflüssigt. Per Lastwagen wird das verflüssigte CO<sub>2</sub> ins Betonwerk geliefert. Beim Betonwerk befindet sich ein Tank, in dem das flüssige CO<sub>2</sub> gelagert wird. Durch eine von der zirkulit AG entwickelte Sequestrierungstechnologie wird dann als zusätzlicher Schritt das CO<sub>2</sub> im Betongranulat

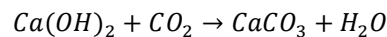
---

<sup>1</sup> Nur teilweise biogene Quellen.

gespeichert. Die auch natürlich ablaufende Karbonatisierung kann so in kurzer Zeit und mit einem höheren Wirkungsgrad umgesetzt werden. Das mit CO<sub>2</sub> angereicherte Betongranulat kann anschliessend als rezyklierte Gesteinskörnung in der Betonproduktion verwendet werden. Die Sequestrierungstechnologie ist so in die Betonproduktion integriert, dass das angereicherte Betongranulat nach der CO<sub>2</sub>-Behandlung an den laufenden Betrieb übergeben wird.

### **Angaben zum chemischen Prozess**

Durch den chemischen Prozess der Karbonatisierung wird Kohlenstoffdioxid im Betongranulat gespeichert. Im Betongranulat, respektive im Zementstein in den Poren des Betongranulats, ist Calciumhydroxid ( $Ca(OH)_2$ ) enthalten, welches unter Zugabe von Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) zu Calciumcarbonat ( $CaCO_3$ , *Kalkstein*) und Wasser ( $H_2O$ ) reagiert.



Durch diese chemische Reaktion ist das Kohlenstoffdioxid durch die Mineralisierung dauerhaft und unter üblichen Einsatzbedingungen irreversibel im Gestein gebunden.<sup>2</sup> Auch eine erneute Aufbereitung des aus dem CO<sub>2</sub>-Betongranulat produzierten Betons, macht die Sequestrierung nicht rückgängig. Bei dieser Reaktion entsteht ausserdem Wasser, das von der Gesteinskörnung aufgenommen wird.

### **1.3.4 Programmspezifische Aspekte**

Jede stationäre oder mobile Anlage wird als Vorhaben im Programm integriert, wenn sie die durch zirkulit AG entwickelte Sequestrierungstechnologie verwendet, um CO<sub>2</sub> angereichertes Betongranulat zu erstellen und somit eine Senkenleistung erzeugt (vgl. Kapitel 1.3.3).

Sobald eine Anlage mit der Produktion von CO<sub>2</sub> angereichertem Betongranulat beginnt und unter der Prämisse, dass die Aufnahmekriterien erfüllt sind, wird sie als Vorhaben in das Programm aufgenommen. Die Vorhaben werden in der Regel durch Lizenznehmer der zirkulit AG betrieben. In einem Lizenzvertrag wird der Umgang mit der erzielten Senkenleistung geregelt. In Kapitel 4.4.1 wird das Vorgehen zur Aufnahme weiterer Vorhaben in das Programm beschrieben.

---

<sup>2</sup> Vgl. Seidemann, Müller, Ludwig: Weiterentwicklung der Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton (2. Phase: Prozessoptimierung im Labormaßstab und Technologieentwurf), Werkstoffe des Bauens, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Deutschland, 2015.

Für das Programm gelten folgende Aufnahmekriterien:

<b>Aufnahmekriterium</b>	<b>Anwendung</b>	<b>Art des Beleges</b>
Die Sequestrierungstechnologie findet in der Schweiz statt.	<i>Erfüllt / nicht erfüllt</i>	<i>Standort des Vorhabens</i>
Das Vorhaben befindet sich nicht in einem von der CO <sub>2</sub> -Abgabe befreiten Unternehmen.	<i>Erfüllt / nicht erfüllt</i>	<i>Unternehmensangabe</i>
Erzielte Senkenleistungen werden nicht anderweitig geltend gemacht (Vermeidung von Doppelzählungen).	<i>Erfüllt / nicht erfüllt</i>	<i>Überwachung im Monitoring</i>
Die durch die Vorhaben erzielten Senkenleistungen werden an die Programmträgerschaft übertragen.	<i>Erfüllt / nicht erfüllt</i>	<i>Lizenzvertrag</i>
Das Vorhaben produziert CO <sub>2</sub> angereichertes Betongranulat anhand der durch die zirkulit AG entwickelten Sequestrierungstechnologie.	<i>Erfüllt / nicht erfüllt</i>	<i>Lizenzvertrag</i>
Die für die Berechnung der durch das Vorhaben erzielten Senkenleistungen notwendigen Parameter können gemessen bzw. (bei Wirkungsmodellen) mit Messungen plausibilisiert werden.	<i>Erfüllt / nicht erfüllt</i>	<i>Chargenprotokoll der CO<sub>2</sub>-Behandlung und Berechnung im Monitoring</i>
Der Umsetzungsbeginn des Vorhabens liegt nicht vor dem Antrag auf Aufnahme in das Programm.	<i>Erfüllt / nicht erfüllt</i>	<i>Lizenzvertrag</i>
Das Vorhaben erfüllt die Kriterien der Zusätzlichkeit.	<i>Erfüllt / nicht erfüllt</i>	<i>Prüfung der Zusätzlichkeit des einzelnen Vorhabens vor der Aufnahme in das Programm</i>
Die Zuständigkeiten des Vorhabens sind definiert und eine Kontaktperson ist benannt.	<i>Erfüllt / nicht erfüllt</i>	<i>Prozessbeschreibung mit Zuständigkeiten jedes Vorhabens</i>
Das Vorhaben erhält keine Finanzhilfen.	<i>Erfüllt / nicht erfüllt</i>	<i>Unternehmensangabe</i>

## 1.4 Referenzszenario

Die CO<sub>2</sub>-Behandlung von Betongranulat ist ein zusätzlicher Schritt, welcher in die Produktion von Beton aus rezyklierten Gesteinskörnungen einbezogen werden kann. Auch ohne die Anwendung einer CO<sub>2</sub>-Sequestrierungstechnologie wird heute Betonabbruch aufbereitet und wieder in der Betonproduktion verwendet. Das Referenzszenario ist hier also die Aufbereitung von Betonabbruch wie bisher ohne die zusätzliche CO<sub>2</sub>-Sequestrierungstechnologie. Eine Senkenleistung während der Aufbereitung von Betonabbruch ohne die Umsetzung des Programms kann nicht erreicht werden, da der Prozess zurzeit zu unwirtschaftlich ist (vgl. Kapitel 3).

## 1.5 Termine

### Programm

Der Umsetzungsbeginn des Programms wird dem Datum des Beginns der Produktion von CO<sub>2</sub> angereichertem Betongranulat des ersten Vorhabens entsprechen. Der Wirkungsbeginn entspricht hier dem Umsetzungsbeginn. Das Programm hat eine unbefristete Dauer.

### Vorhaben

Der Umsetzungsbeginn eines Vorhabens entspricht dem Datum des Produktionsbeginns von CO<sub>2</sub> angereichertem Betongranulat der Anlage. Dies unterscheidet sich von Kompensationsprojekten des Bundes gemäss CO<sub>2</sub>-Gesetz, bei denen der Umsetzungsbeginn in der Regel mit der ersten finanziellen Verpflichtung zusammenfällt. Auch für die Vorhaben entspricht der Wirkungsbeginn dem Umsetzungsbeginn. Die Dauer eines Vorhabens entspricht der Nutzungsdauer der Produktionsanlage (normalerweise: 10 Jahre).

Die stationäre Anlage in Rümlang ist das erste und aktuell einzige Vorhaben des Programms. Der Baubeginn der Anlage in Rümlang lag im Jahr 2020. Es folgte die Entwicklung des Sequestrierungsprozesses mit der Skalierung auf den industriellen Massstab. Die Anlage steht wegen der Unwirtschaftlichkeit seit mehreren Monaten still und wird die Produktion erst im Mai 2022 aufnehmen, wenn die Möglichkeit gesichert ist, die generierten Zertifikate zu verkaufen. Der Wirkungsbeginn liegt also im Mai 2022 und fällt mit dem Beginn des Monitorings zusammen.

Termine	Datum	Spezifische Bemerkungen
Umsetzungsbeginn des Programms:	01.05.2022	<i>Datum des Beginns der Produktion von CO<sub>2</sub> angereichertem Betongranulat des ersten Vorhabens.</i>
Umsetzungsbeginn des ersten Vorhabens (Ebirec in Rümlang):	01.05.2022	<i>Datum des Beginns der Produktion von CO<sub>2</sub> angereichertem Betongranulat.</i>



Wirkungsbeginn des ersten Vorhabens (Ebirec in Rümlang):	01.05.2022	
----------------------------------------------------------	------------	--

	Anzahl Jahre	Spezifische Bemerkungen
Dauer des Programms:	unbefristete	
Wirkungsdauer der Vorhaben:	10 Jahre (üblicherweise)	<i>Nutzungsdauer der Produktionsanlage</i>

## 2 Berechnung ex-ante erwartete Senkenleistung

### 2.1 Systemgrenze und Emissionsquellen

Die gewählte Systemgrenze beinhaltet alle im Vergleich zum Referenzszenario zusätzlich anfallenden Prozessschritte.

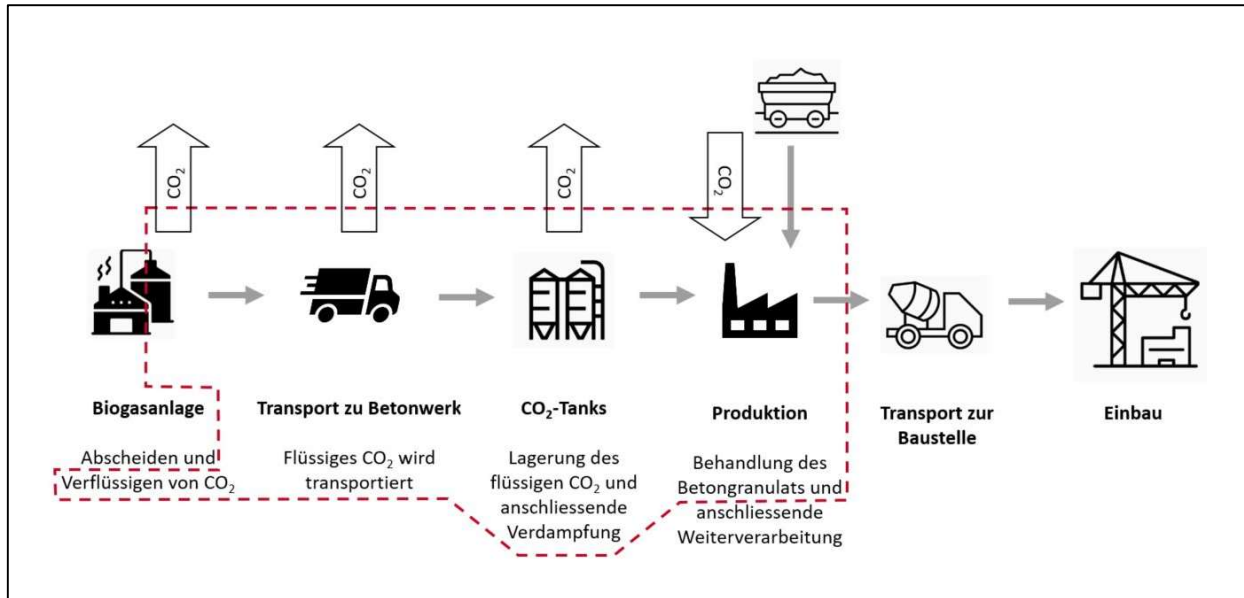


Abbildung 1: Systemgrenze und Emissionsquellen

Die zusätzlich anfallenden Prozessschritte sind insbesondere das Verflüssigen, der Transport, die Lagerung und die Verdampfung des CO<sub>2</sub>, sowie dessen Speicherung im Betongranulat. Das heutige marktübliche Vorgehen ist das Abscheiden des CO<sub>2</sub> an der Biogasanlage in die Atmosphäre ohne weitere Verwendung. Durch die Verflüssigung an der Quelle (Biogasanlage) wird das Kohlenstoffdioxid transportfähig und kann für weitere Anwendungen eingesetzt werden. Die Lagerung an der Produktionsanlage erfolgt in Flüssiggastanks, welche je nach Wetter beheizt oder gekühlt werden. Durch eine Verdampfungsanlage wird das CO<sub>2</sub> wieder gasförmig und kann weiterverarbeitet werden.

**Direkte und indirekte Emissionsquellen**

	Quelle	Gas	Enthalten	Begründung / Beschreibung
Emissionen der Vorhaben	Verflüssigen	CO <sub>2</sub>	Ja	<b>Indirekte Emissionsquelle</b> <i>Emissionen durch die Verflüssigung des CO<sub>2</sub> an der Quelle.</i>
	Transport	CO <sub>2</sub>	Ja	<b>Indirekte Emissionsquelle</b> <i>Emissionen durch den Transport des CO<sub>2</sub>.</i>
	Lagerung	CO <sub>2</sub>	Ja	<b>Direkte Emissionsquelle</b> <i>Emissionen durch Kühlen und Heizen des Flüssiggastanks.</i>
	Verdampfung	CO <sub>2</sub>	Ja	<b>Direkte Emissionsquelle</b> <i>Emissionen für die Verdampfungsanlage.</i>
	Senke (Speicherung im Betongranulat)	CO <sub>2</sub>	Ja	<b>Emissionssenke</b> <i>Sequestrierte Menge CO<sub>2</sub>.</i>
	Diverse	CO <sub>2</sub>	Nein	<i>Alle übrigen Emissionen sind analog wie in der Referenzentwicklung und fallen daher weg.</i>
Referenzentwicklung des Vorhabens	Senke (Speicherung im Betongranulat)	CO <sub>2</sub>	Ja	<b>Emissionssenke</b> <i>Bei der Referenzentwicklung beträgt jedoch die Senkenleistung 0 t CO<sub>2</sub>-eq.</i>
	Diverse	CO <sub>2</sub>	Nein	<i>Alle übrigen Emissionen sind analog wie im Programmszenario und fallen daher weg.</i>

## 2.2 Einflussfaktoren

Durch eine Revision des CO<sub>2</sub>-Gesetzes könnte die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in Betongranulat für ein Kompensationsprojekt gemäss BAFU zulässig werden. Sollte dies der Fall sein, wird zu gegebener Zeit das weitere Vorgehen geprüft und festgelegt. Die diesbezüglich getroffenen Entscheidungen werden dann im Monitoringbericht erläutert.

## 2.3 Leakage

Häufig steht der Begriff der Karbonatisierung auch mit der Bindung von Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre während der Nutzungsphase von Beton in Verbindung. Bei dieser Art der CO<sub>2</sub>-Aufnahme ist der natürliche Vorgang gemeint, welcher bei jedem Beton über einen grossen Zeitraum abläuft. Die Karbonatisierung während der Nutzungsphase kann in der Ökobilanz als negatives Treibhausgaspotenzial geltend gemacht werden. Es stellt sich somit die Frage, ob die zirkulit Sequestrierungstechnologie einen Einfluss auf diese Art der Karbonatisierung hat und somit ein negatives Treibhausgaspotenzial lediglich von der Nutzungs- in die Produktionsphase verschiebt. Für die Durchführung des CO<sub>2</sub>-Speicherprozesses wird Betonabbruch verwendet, welcher schon einen Lebenszyklus hinter sich hat. Dieser Betonabbruch wird dann aufbereitet und direkt vor der Produktion von neuem Beton weiter mit CO<sub>2</sub> angereichert. Bei der Betonproduktion kommt zusätzlich zum angereicherten Betongranulat wieder Zement zum Einsatz. Die Karbonatisierungsreaktion läuft nur aufgrund der alkalischen Anteile im Zementstein ab, welche nach der Produktion im neuen Beton wieder zur Verfügung stehen. Die zirkulit Sequestrierungstechnologie führt demnach zu einer Sequestrierung zusätzlich zur Karbonatisierung während der Nutzungsphase und sorgt für weiteres negatives Treibhausgaspotenzial. Die Technologie hat somit keinen Einfluss auf den natürlichen Vorgang der Karbonatisierung während der Nutzungsphase.

Eine Leakage, welche zur Erhöhung oder Verringerung der Emissionen der Vorhaben führen würde, liegt also nicht vor.

## 2.4 Emissionen der Vorhaben

Bei dem entwickelten Programm kommt der zusätzliche Prozessschritt der CO<sub>2</sub>-Behandlung des Betongranulats hinzu. Dieser verursacht zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Emissionen der Vorhaben ergeben sich nach obiger Systemgrenze (vgl. Kapitel 2.1) und können in drei Gruppen festgehalten werden:

- Emissionen für Verflüssigen des CO<sub>2</sub> an der Biogasanlage.
- Emissionen für den Transport des flüssigen CO<sub>2</sub> zum Betonwerk.
- Emissionen für die Lagerung und Verdampfung des CO<sub>2</sub> im Betonwerk.

Die Berechnungsformel für die Emissionen der Vorhaben ist in Kapitel 4.2 zu finden. Die Berechnung der ex-ante erwarteten Emissionen der Vorhaben beruht auf Daten, die im Rahmen einer Ökobilanz für das erste Vorhaben (Ebirec in Rümlang) durchgeführt wurde (Anhang 1 und 1.1). Folgende Annahmen wurden für hier übernommen:

- Es wurde bei Erstellung der Ökobilanz von einer jährlichen Produktion von CO<sub>2</sub>-Betongranulat von rund 15'000 Tonnen ausgegangen. Die Emissionen aus der Ökobilanz für den Sequestrierungsprozess

werden für abgeänderte Produktionsmengen linear als Emissionsfaktoren an die neue Produktionsmenge angepasst (vgl. Kapitel 4.2.1). Da der Flüssiggastank unabhängig von der Produktionsmenge ganzjährig im Einsatz ist, ist der Elektrizitätsbedarf des Tanks für eine kleine Produktionsmenge pro Tonne produziertem Material höher als für eine grosse Menge. Die Kühl- und Heizaktivitäten für den Tank und eine Sensitivitätsanalyse für die Produktionsmenge wurden in der Ökobilanz modelliert (vgl. Kapitel 4.3).

- Die Transportdistanz für das flüssige CO<sub>2</sub> wurde in der Ökobilanz mit 35 km angenommen. Das CO<sub>2</sub> stammt in der Praxis noch aus teilweise biogenen Quellen und wird aktuell aus Deutschland bezogen (Transportweg 247,75 km). Biogene CO<sub>2</sub>-Quellen sind in der Schweiz aktuell noch nicht ausreichend verfügbar. Voraussichtlich ab November 2022 ist eine Biogasanlage in der Schweiz erschlossen, was den Transportweg des flüssigen CO<sub>2</sub> verringert. Bis zu diesem Zeitpunkt wird mit einem angepassten Emissionsfaktor für den Transportweg gerechnet, so dass dieser in den Emissionen der Vorhaben angemessen berücksichtigt wird (vgl. Kapitel 4.3).
- Eine wirtschaftliche Allokation führt zu der Annahme, dass Methanreste im CO<sub>2</sub> aus der Biogasanlage vernachlässigt werden können. Dies stützt sich auf der Tatsache, dass aktuell das an der Biogasanlage anfallende CO<sub>2</sub> einen wirtschaftlich deutlich geringeren Wert hat als das Hauptprodukt Methan.

Zur Berechnung der Programmmissionen wurde die Produktionskapazität und Anzahl der Vorhaben über einen Zeitraum von 7 Jahren anhand der aktuellen Marktsituation geschätzt. Es wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der Vorhaben in diesem Zeitraum von eins auf fünf steigt (vgl. Anhang 2). Die Programmmissionen ergeben sich aus der Summe der Emissionen pro Vorhaben und wurden mit der Ökobilanz für das erste Vorhaben als Grundlage berechnet. Insgesamt belaufen sich die erwarteten Programmmissionen für einen Zeitraum von 7 Jahren auf ██████ t CO<sub>2</sub>-eq. (vgl. Kapitel 2.6).

## 2.5 Referenzentwicklung

Die Produktion von Betongranulat würde weiterhin stattfinden, jedoch ohne Umsetzung der CO<sub>2</sub>-Sequestrierungstechnologie. Somit unterscheidet sich das Programmszenario von der Referenzentwicklung nur durch den zusätzlich umgesetzten CO<sub>2</sub>-Sequestrierungsschritt. In der Referenzentwicklung findet keine Senkenleistung statt.

## 2.6 Erwartete Senkenleistung (ex-ante)

Gleichzeitig zu den Emissionen der Vorhaben wird CO<sub>2</sub> im Betongranulat sequestriert. Die Sequestrierung übersteigt die Emissionen, was erlaubt, eine Senkenleistung beim Programm zu erzielen.

Die zusätzliche Senkenleistung des Programms ergibt sich aus der gesamten Senkenleistung aller Vorhaben abzüglich der Programmmissionen (vgl. Kapitel 4.2). Die gesamten Senkenleistung aller Vorhaben hängt von der Menge des produzierten CO<sub>2</sub> angereicherten Betongranulats ab. Die Berechnungsformel ist in Kapitel 4.2 zu finden. Die Berechnung der ex-ante erwarteten gesamten Senkenleistung beruht auf Schätzwerten. Die jährliche Produktionsmenge von CO<sub>2</sub> angereichertem Betongranulat für alle Vorhaben wurde zu Beginn mit ██████ Tonnen angenommen. Diese steigt sich durch neu hinzukommende Vorhaben innerhalb von 4 Jahren

auf [REDACTED] Tonnen. Zur Berechnung der Senkenleistung wurde eine durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Speicherung pro Tonne Betongranulat angenommen und die Emissionen, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, berechnet. Die Herleitung der Zahlen und Berechnungen sind in Anhang 2 zu finden.

Kalender-jahr	Anzahl der Vorhaben im Programm	Erwartete gesamte Speicherleistung [t CO <sub>2</sub> -eq.]	Erwartete Programm-emissionen [t CO <sub>2</sub> -eq.]	Schätzung Leakage [t CO <sub>2</sub> -eq.]	Erwartete zusätzliche Senkenleistung [t CO <sub>2</sub> -eq.]
2022	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	0,00	[REDACTED]
2023	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	0,00	[REDACTED]
2024	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	0,00	[REDACTED]
2025	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	0,00	[REDACTED]
2026	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	0,00	[REDACTED]
2027	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	0,00	[REDACTED]
2028	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	0,00	[REDACTED]
<b>Total</b>	[REDACTED]	[REDACTED]	[REDACTED]	<b>0,00</b>	[REDACTED]

### 3 Nachweis der Zusätzlichkeit

#### 3.1 Analyse der Zusätzlichkeit

Für die Umsetzung des Programms wird eine Erweiterung der bestehenden Produktionsanlage jedes Vorhabens erforderlich (vgl. Kapitel 1.4 und 3.1.2). Konkret muss in neue Infrastruktur, wie Flüssiggastank und Verdampfungsanlage investiert werden. Ohne die Erweiterung der Produktionsanlage und den damit verbundenen Investitionen wird keine zusätzlich zur Referenzentwicklung anfallende Senkenleistung erzielt (vgl. Kapitel 2.5). Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt auf, dass das Programm ohne den Erlös der freiwilligen Zertifikate unwirtschaftlich ist und nicht umgesetzt werden würde (vgl. Kapitel 3.1.1). Die Praxisanalyse zeigt zudem, dass die angewendete Technologie nicht der üblichen Praxis entspricht (vgl. Kapitel 3.1.2).

##### 3.1.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse wird für jedes Vorhaben durchgeführt und so der vorhabenspezifische Nachweis der Unwirtschaftlichkeit erbracht. Es erfolgt eine Kostenanalyse der Vorhaben in den Varianten ohne und mit Berücksichtigung der Erlöse aus dem Verkauf von freiwilligen Zertifikaten. Die Analyse zeigt auf, dass die Erlöse aus freiwilligen Zertifikaten einen finanziellen Anreiz zur Umsetzung des Programms liefern.

In der Kostenanalyse werden die folgenden Kosten berücksichtigt:

- Investitionskosten für die neu zu errichtende Infrastruktur als jährliche Abschreibung über die erwartete Lebensdauer der CO<sub>2</sub>-Speicheranlage. Es muss je nach vorhandenem Anlagentyp, das schon bestehende Silo für die CO<sub>2</sub>-Behandlung des Betongranulats umgebaut und abgedichtet werden oder komplett neu aufgebaut werden. Für die Lagerung des Kohlenstoffdioxids am Betonwerk wird in beiden

Fällen (Umbau der bestehenden Infrastruktur oder Teilneubau) ein Flüssiggastank und eine Verdampfungsanlage zur Durchführung des Prozesses benötigt.

- Allenfalls Zinszahlungen, die sich aus der Finanzierung der Infrastruktur ergeben.
- Unterhalt und Betriebskosten. Hier sind die Kosten für Energie, Personal, Einkauf des CO<sub>2</sub> und Unterhalt der CO<sub>2</sub>-Speicheranlage berücksichtigt. Zum einen muss das biogene CO<sub>2</sub> eingekauft und transportiert werden. Zum anderen fallen durch den Betrieb zusätzliche Personal- und Energiekosten an. Ausserdem entstehen Kosten für den Nachweis der sequestrierten Menge Kohlenstoffdioxid für interne und externe Prüfungen.

Ohne den Erlös aus den freiwilligen Zertifikaten stehen dem produzierten CO<sub>2</sub>-Betongranulat nur Kosten gegenüber. Unabhängig der spezifischen Kosten eines Vorhabens wird deutlich, dass jedes Vorhaben unwirtschaftlich ist, da keine Erlöse erzielt werden. Das Vorhaben würde daher wegen Unwirtschaftlichkeit nicht umgesetzt werden.

Durch Erlöse aus freiwilligen Zertifikaten können diese Kosten gedeckt werden. Das Vorhaben gilt als wirtschaftlich, wenn es mindestens kostendeckend durchgeführt werden kann. Dazu werden die angefallenen Kosten auf die eingesetzte Menge CO<sub>2</sub> umgelegt.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse für das erste Vorhaben Ebirec zeigt auf, dass das Vorhaben ohne den Erlös aus dem Verkauf von freiwilligen Zertifikaten unwirtschaftlich ist. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde von EPB Schweiz AG geprüft (vgl. Kapitel 5 und Anhang 3).

### 3.1.2 Praxisanalyse

Das heutige marktübliche Vorgehen ist die Aufbereitung von Betonabbruch und Herstellung von Betongranulat ohne den zusätzlichen Prozessschritt der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung. An der Biogasanlage wird heute das CO<sub>2</sub> ohne weitere Verwendung in die Atmosphäre abgeschieden. Die hier durchgeführte Technologie (vgl. Kapitel 1.3.3) ist also bisher keine übliche Praxis in der Beton-Branche.

## 3.2 Finanzhilfen und Doppelzahlungen

Das Programm und die darin enthaltenen Vorhaben erhalten keine Finanzhilfen. Es bestehen keine Schnittstellen zu Unternehmen, welche von der CO<sub>2</sub>-Abgabe befreit sind. Beide Aspekte sind in den Aufnahmekriterien festgelegt.

Im Monitoring wird sichergestellt, dass keine Doppelzahlungen auftreten. Insbesondere eine Doppelzahlung als Senkenleistung in diesem Programm und als ökologischer Mehrwert durch verbesserte Umwelteigenschaften, erzielt durch den Einsatz des CO<sub>2</sub>-angereicherten Betongranulats in Beton, werden vermieden (vgl. Kapitel 5). In der Umweltproduktdeklaration für den zirkulit<sup>®</sup> Beton ist die Sequestrierungstechnologie nicht berücksichtigt. Dadurch werden die Treibhausgasemissionen nicht um die Senkenleistung reduziert und die verminderten Emissionen des Betons nicht ausgewiesen.

## 4 Aufbau und Umsetzung des Monitorings

### 4.1 Beschreibung der gewählten Nachweismethode

Ein Nachweis über die eingebrachte CO<sub>2</sub>-Menge im Betongranulat wird durch verschiedene Untersuchungen erbracht. Zum einen wird die eingebrachte Menge anhand des Durchflusses in den Prozess bestimmt und automatisiert auf einem Chargenprotokoll vermerkt. Zum anderen werden weitere Untersuchungen des Materials vorgenommen, welche auf die tatsächlich sequestrierte Menge CO<sub>2</sub> schliessen lassen. Durch diese Methoden kann die sequestrierte Menge CO<sub>2</sub> bestimmt und plausibilisiert werden (vgl. Kapitel 4.3.3).

Die Programmmissionen ergeben sich aus einer Ökobilanz und werden entsprechend formelmässig berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.4, Anhang 1 und 1.1). Da bei unterschiedlicher Produktionsmenge die Emissionen variieren können, werden die Emissionsfaktoren an die Produktionsmenge angepasst (vgl. Kapitel 4.3).

### 4.2 Ex-post Berechnung der anrechenbaren Senkenleistung

#### 4.2.1 Formeln zur ex-post Berechnung der erzielten Senkenleistung

Anstatt die Standardformel für Kompensationsprojekte und -programme, die zur Berechnung der Emissionsverminderung verwendet wird (vgl. Formel 1), wird diese hier umformuliert, um die Senkenleistung des Programms auf vereinfachte Weise zu berechnen (vgl. Formel 2).

(1) Standardformel für Kompensationsprojekte und -programme:

$$ER = E_{RE} - E_p - E_L$$

Wobei:

$ER$  = Emissionsreduktionen [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$E_{RE}$  = Referenzemissionen [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$E_p$  = Projekt- bzw. Programmmissionen [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$E_L$  = Leakage [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

(2) Formel zur Berechnung der Senkenleistung des Programms:

$$SL = SL_p - SL_{RE} - E_p - E_L$$

Wobei:

$SL$  = Zusätzliche Senkenleistung des Programms [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$SL_p$  = Gesamte Speicherleistung aller Vorhaben [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$SL_{RE}$  = Senkenleistung der Referenzentwicklung, wobei  $SL_{RE} = 0$  (vgl. Kapitel 2.5) [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$E_p$  = Projekt- bzw. Programmmissionen [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$E_L$  = Leakage, wobei  $E_L = 0$  (vgl. Kapitel 2.3) [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

Die zusätzliche Senkenleistung des Programms ergibt sich also aus der gesamten Speicherleistung aller Vorhaben abzüglich der Programmmissionen. Letztere ergeben sich aus der Summe der Emissionen pro Vorhaben (vgl. Kapitel 2.4 und Formel 6). Die gesamte Speicherleistung aller Vorhaben ist die Summe der Speicherleistung jedes einzelnen Vorhabens (vgl. Formel 3).



(3) Formel zur Berechnung der gesamten Speicherleistung aller Vorhaben:

$$SL_p = \sum_i SL_{v,i}$$

Wobei:

$SL_p$  = Gesamte Speicherleistung aller Vorhaben [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$SL_v$  = Speicherleistung jedes einzelnen Vorhabens [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$i$  = laufender Index für jedes Vorhaben

Die Speicherleistung des einzelnen Vorhabens berechnet sich aus der Summe des CO<sub>2</sub>-Durchflusses jeder CO<sub>2</sub>-Behandlung (vgl. Formel 4). Der CO<sub>2</sub>-Durchfluss wird dazu in eine Masse umgerechnet (vgl. Formel 5).

(4) Formel zur Berechnung der Speicherleistung eines einzelnen Vorhabens:

$$SL_v = \sum_j F_{g,j}$$

Wobei:

$SL_v$  = Speicherleistung jedes einzelnen Vorhabens [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$F_g$  = CO<sub>2</sub>-Durchfluss für jede durchgeführte CO<sub>2</sub>-Behandlung innerhalb eines Vorhabens [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$j$  = laufender Index für jede durchgeführte CO<sub>2</sub>-Behandlung innerhalb eines Vorhabens

(5) Umrechnung des gemessenen CO<sub>2</sub>-Volumenstroms einer Behandlung eines Vorhabens in eine Masse:

$$F_g = F_v * U_g$$

Wobei:

$F_g$  = CO<sub>2</sub>-Durchfluss für jede durchgeführte CO<sub>2</sub>-Behandlung innerhalb eines Vorhabens [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$F_v$  = Gemessener CO<sub>2</sub>-Durchfluss in Normkubikmeter für jede durchgeführte CO<sub>2</sub>-Behandlung [Nm<sup>3</sup> bei 0 °C]

$U_g$  = Umrechnungsfaktor Normkubikmeter zu Kilogramm [kg pro Nm<sup>3</sup>]

(6) Formel zur Berechnung der Programmmissionen

$$E_p = \sum_i E_{v,i}$$

Wobei:

$E_p$  = Projekt- bzw. Programmmissionen [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$E_v$  = Emissionen jedes einzelnen Vorhabens [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$i$  = laufender Index für jedes Vorhaben

In Formel 7 wird die Berechnung der Emissionen eines einzelnen Vorhabens aufgeführt. Diese ergeben sich aus der Summe der vorhabenspezifischen Emissionsfaktoren multipliziert mit der Speicherleistung des

Vorhabens. Die Emissionsfaktoren ergeben sich aus einer Ökobilanz und werden für veränderte Produktionsmengen angepasst (vgl. Kapitel 2.4, Anhang 1, 1.1, 4 und 4.1).

(7) Formel zur Berechnung der Emissionen eines einzelnen Vorhabens

$$E_v = (E_{T,i} + E_{E,i} + E_{I,i}) * SL_{v,i}$$

Wobei:

$E_v$  = Emissionen jedes einzelnen Vorhabens [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$E_{T,i}$  = Emissionsfaktor für Emission aus dem Transport des CO<sub>2</sub> für jedes Vorhaben [kg CO<sub>2</sub>-eq. pro kg eingebrachtem CO<sub>2</sub>]

$E_{E,i}$  = Emissionsfaktor für Elektrizität für jedes Vorhaben [kg CO<sub>2</sub>-eq. pro kg eingebrachtem CO<sub>2</sub>]

$E_{I,i}$  = Emissionsfaktor für Infrastruktur für jedes Vorhaben [kg CO<sub>2</sub>-eq. pro kg eingebrachtem CO<sub>2</sub>]

$SL_v$  = Speicherleistung jedes einzelnen Vorhabens [kg CO<sub>2</sub>-eq.]

$i$  = laufender Index für jedes Vorhaben

### 4.3 Datenerhebung und Parameter

Alle unten nicht explizit aufgeführten Parameter berechnen sich gemäss den obigen Formeln aus den angegebenen Parametern. Die Beschreibungen und Einheiten dieser Parameter sind in Kapitel 4.2.1 direkt bei den zugehörigen Formeln zu entnehmen. Die Emissionsfaktoren für das Vorhaben Ebirec werden zu Beginn an eine kleinere Produktionsmenge von 5'000 Tonnen Betongranulat pro Jahr und einen längeren Transportweg für das verflüssigte CO<sub>2</sub> angepasst. Die Berechnungen sind in Anhang 4 und 4.1 zu entnehmen und ergeben sich aus der erstellten Ökobilanz (Anhang 1 und 1.1). Im Rahmen des Monitorings wird geprüft, ob die Emissionsfaktoren noch die tatsächliche Situation abbilden. Es kann dann gegebenenfalls eine Anpassung vorgenommen werden.

#### 4.3.1 Fixe Parameter

<b>Parameter</b>	$SL_{RE} = 0$
Beschreibung des Parameters	Senkenleistung der Referenzentwicklung.
Einheit	kg CO <sub>2</sub> -eq.
Datenquelle	Vgl. Kapitel 2.5.

<b>Parameter</b>	$E_L = 0$
Beschreibung des Parameters	Leakage.
Einheit	kg CO <sub>2</sub> -eq.
Datenquelle	Vgl. Kapitel 2.3.

<b>Parameter</b>	$U_g=1,977$
Beschreibung des Parameters	Umrechnungsfaktor von Normkubikmeter zu Kilogramm von CO <sub>2</sub> bei 0 °C.
Einheit	kg pro Nm <sup>3</sup> .
Datenquelle	Liste der Dichte gasförmiger Stoffe. <sup>3</sup>

#### 4.3.2 Dynamische Parameter und Messwerte

<b>Dynamischer Parameter / Messwert</b>	$F_v$
Beschreibung des Parameters/Messwerts	Gemessener CO <sub>2</sub> -Durchfluss in Normkubikmeter je Vorhaben.
Einheit	Nm <sup>3</sup>
Datenquelle	Chargenprotokoll.
Erhebungsinstrument / Auswertungsinstrument	Thermischer Massenstromsensor.
Beschreibung Messablauf	Für die gesamte Dauer der CO <sub>2</sub> Zufuhr wird der Durchfluss gemessen.
Kalibrierungsablauf	Kalibrierung an mehreren Messpunkten für CO <sub>2</sub> .
Genauigkeit der Messmethode	± 0.3% vom Endwert. <sup>4</sup>
Messintervall	Dauer der CO <sub>2</sub> Zufuhr.
Verantwortliche Person	Zuständigkeiten nach Vorhaben geregelt.

<b>Parameter</b>	██████████ ██████████
Beschreibung des Parameters	Emissionsfaktor für Emission aus dem Transport des CO <sub>2</sub> für das Vorhaben Ebirec.
Einheit	kg CO <sub>2</sub> -eq. pro kg eingebrachtem CO <sub>2</sub> .
Datenquelle	Ökobilanz (vgl. Anhang 1, 1.1, 4, 4.1).

<sup>3</sup> Vgl. o. A. Liste der Dichte gasförmiger Stoffe, [https://www.chemie.de/lexikon/Liste\\_der\\_Dichte\\_gasf%F6rmiger\\_Stoffe.html](https://www.chemie.de/lexikon/Liste_der_Dichte_gasf%F6rmiger_Stoffe.html) (Aufgerufen am 13.04.2022).

<sup>4</sup> Vgl. Technisches Datenblatt VA 520, Durchfluss-Sensor.

<b>Parameter</b>	██████████ ██████████
Beschreibung des Parameters	Emissionsfaktor für Elektrizität für das Vorhaben Ebirec.
Einheit	kg CO <sub>2</sub> -eq. pro kg eingebrachtem CO <sub>2</sub> .
Datenquelle	Ökobilanz (vgl. Anhang 1, 1.1, 4, 4.1).

<b>Parameter</b>	██████████ ██████████
Beschreibung des Parameters	Emissionsfaktor für Infrastruktur für das Vorhaben Ebirec.
Einheit	kg CO <sub>2</sub> -eq. pro kg eingebrachtem CO <sub>2</sub> .
Datenquelle	Ökobilanz (vgl. Anhang 1, 1.1, 4, 4.1).

#### 4.3.3 Plausibilisierung der Daten und Berechnungen

Zur Plausibilisierung der Speicherleistung der einzelnen Vorhaben stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Alle Methoden dienen dazu das gespeicherte CO<sub>2</sub> pro Tonne Betongranulat zu ermitteln. Dazu werden Proben von unbehandeltem und mit CO<sub>2</sub>-angereicherten Betongranulat untersucht. Je nach vorhandenen Ressourcen werden die Methoden zur Plausibilisierung ausgewählt. Eine Beschreibung der Plausibilisierungsmethoden im Labor der Eberhard Bau AG für das Vorhaben Ebirec ist in Anhang 8 zu finden.

<b>Dynamischer Parameter / Messwert</b>	X <sub>c</sub>
Beschreibung des Parameters / Messwerts	Nachweis des CaCO <sub>3</sub> im Betongranulat durch Analyse im Calcimeter. Umrechnung auf die Speicherleistung in Kilogramm CO <sub>2</sub> pro Tonne Betongranulat.
Einheit	kg CO <sub>2</sub> pro t Betongranulat.
Datenquelle	Messwert aus Calcimeter.
Art der Plausibilisierung	Bestätigung des gespeicherten CO <sub>2</sub> .

<b>Dynamischer Parameter / Messwert</b>	$X_A$
Beschreibung des Parameters / Messwerts	Gemessene Gewichtsabnahme des behandelten Betongranulats mit gravimetrischer Bestimmung nach Reaktion mit Salzsäure. Umrechnung auf die Speicherleistung in Kilogramm CO <sub>2</sub> pro Tonne Betongranulat.
Einheit	kg CO <sub>2</sub> pro t Betongranulat.
Datenquelle	Messwert aus gravimetrischer Bestimmung.
Art der Plausibilisierung	Bestätigung des gespeicherten CO <sub>2</sub> .

<b>Dynamischer Parameter / Messwert</b>	$X_G$
Beschreibung des Parameters / Messwerts	Durchschnitt der gemessenen Gewichtszunahme mehrerer Proben während der CO <sub>2</sub> -Behandlung. Umrechnung auf die Speicherleistung in Kilogramm CO <sub>2</sub> pro Tonne Betongranulat.
Einheit	kg CO <sub>2</sub> pro t Betongranulat.
Datenquelle	Messwert aus Gewichtsvergleich.
Art der Plausibilisierung	Bestätigung des gespeicherten CO <sub>2</sub> .

<b>Dynamischer Parameter / Messwert</b>	$X_T$
Beschreibung des Parameters / Messwerts	Thermogravimetrische Analyse. Umrechnung auf die Speicherleistung in Kilogramm CO <sub>2</sub> pro Tonne Betongranulat.
Einheit	kg CO <sub>2</sub> pro t Betongranulat.
Datenquelle	Messwert aus Thermogravimetrie.
Art der Plausibilisierung	Bestätigung des gespeicherten CO <sub>2</sub> .

<b>Dynamischer Parameter / Messwert</b>	$X_S$
Beschreibung des Parameters / Messwerts	Analyse des Betongranulats im Kohlenstoffanalysator. Umrechnung auf die Speicherleistung in Kilogramm CO <sub>2</sub> pro Tonne Betongranulat.
Einheit	kg CO <sub>2</sub> pro t Betongranulat.
Datenquelle	Messwert aus Kohlenstoffanalysator.
Art der Plausibilisierung	Bestätigung des gespeicherten CO <sub>2</sub> .

#### 4.4 Prozess- und Managementstruktur

Das gesamte Programm wird von dem Bereich Qualität & Umwelt der zirkulit AG verwaltet. Das Organigramm der zirkulit AG ist in Anhang 5 beigefügt.

##### 4.4.1 Aufnahme weiterer Vorhaben in das Programm

Zur Aufnahme eines neuen Vorhabens muss der Gesuchsteller, in der Regel ein Lizenznehmer der zirkulit AG die Aufnahme schriftlich beantragen. Hierzu steht ein Formular zur Verfügung. Mit dem Formular müssen die Belege und insbesondere die Zuständigkeiten des Vorhabens eingereicht werden. Von der zirkulit AG werden dann die Kriterien zur Aufnahme geprüft (vgl. Kapitel 1.3.4). Nach abgeschlossener Prüfung wird der Betreiber des Vorhabens über den Status seines Gesuches informiert. Das Gesuch zur Aufnahme weiterer Vorhaben in das Programm ist in Anhang 6 beigefügt.

##### 4.4.2 Monitoringprozess

Die zuständige Person jedes Vorhabens muss für den monatlichen Monitoringbericht die benötigten Angaben zur Berechnung der Senkenleistung gemäss Kapitel 4 dem Bereich Qualität & Umwelt der zirkulit AG zur Verfügung stellen. Die zirkulit AG dokumentiert jedes Vorhaben in dem Monitoringtool (vgl. Anhang 7) und archiviert die Angaben der einzelnen Vorhaben.

Durch die EBP Schweiz AG werden die Zahlen geprüft und in dem monatlichen Monitoringbericht veröffentlicht. Die zirkulit AG erstellt monatlich einen Monitoringbericht auf Programmebene, der die Resultate aller Vorhaben bündelt. In dem monatlichen Monitoringbericht wird also die erbrachte Senkenleistung pro Vorhaben ausgewiesen. Ausserdem wird jährlich die Wirtschaftlichkeit des Programms als Ganzes geprüft. Zertifikate werden nur ausgestellt, solange das Programm unwirtschaftlich ist und so die Zusätzlichkeit gegeben ist.

Im jährlichen Monitoringbericht werden darüber hinaus allfällige Abweichungen von der Programmbeschreibung vermerkt und diskutiert, sowie eine Übersicht über die im Laufe des Jahres erzielte Senkenleistung und die verkauften Zertifikate verfasst.

##### 4.4.3 Qualitätssicherung und Archivierung

Für jedes Vorhaben werden die Zuständigkeiten und Prozesse zur Prozessdurchführung und Qualitätssicherung vor Aufnahme in das Programm definiert. Für die Qualitätssicherung im Produktionswerk und Labor des ersten

Vorhabens (Ebirec) liegen detailliertere Prozessanweisungen und einheitliche Formulare als Vorlage vor (vgl. Anhang 8).

### **Chargenprotokoll**

Auf dem Chargenprotokoll wird der Prozessverlauf jeder Produktion graphisch dargestellt. Es werden die Gesamtmenge des behandelten Betongranulats in Tonnen und die Menge CO<sub>2</sub> in Normkubikmeter, welche in den Prozess gegeben wird, angegeben. Zusätzlich können in dem Feld «Bemerkung» relevante Informationen zur Produktion vermerkt werden. Das Chargenprotokoll für das erste Vorhaben (Ebirec) ist im Anhang 9 angefügt.

### **Plausibilisierung der Daten aus dem Chargenprotokoll**

Zur Plausibilisierung der gespeicherten Menge CO<sub>2</sub> (vgl. Kapitel 4.3.3) werden die zugehörigen Zuständigkeiten und Prozesse je Vorhaben definiert. Für das erste Vorhaben (Ebirec) ist dies dem Anhang 8 zu entnehmen.

### **Unabhängige Laboranalyse**

In regelmässigen Abständen werden die Gesteinskörnungen zusätzlich von der unabhängigen Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) im Labor untersucht. So kann nachgewiesen werden, dass das Kohlenstoffdioxid effektiv zu Kalkstein reagiert hat und nicht als Kohlensäure im Porenwasser vorliegt. Jeder Prozessdurchlauf wird mit den Ergebnissen der Untersuchungen sorgfältig vom Vorhabeneigner dokumentiert. So wird die Überwachung der Prozessqualität gesichert und die insgesamt sequestrierte Menge CO<sub>2</sub> dokumentiert.

## **4.4.4 Verantwortlichkeiten und institutionelle Vorrichtungen**

Datenerhebung	Betonwerk Lizenznehmer (Vorhabeneigner)
Verfasser des Monitoringberichts	zirkulit AG Bereich Qualität & Umwelt
Externe Überprüfung (Verifizierung) des Monitoringberichts	EBP Schweiz AG
Qualitätssicherung	zirkulit AG Bereich Qualität & Umwelt
Datenarchivierung	zirkulit AG Bereich Qualität & Umwelt

## 5 Fremdüberwachung durch EBP Schweiz AG

Wie in Kapitel 1.1 erwähnt, sollte das Programm ursprünglich als Kompensationsprogramm des Bundes gemäss CO<sub>2</sub>-Gesetz entwickelt werden. Da es aufgrund der politischen Entwicklungen zum Zeitpunkt der Programmentwicklung immer noch nicht möglich war, Senkenleistung bei Kompensationsprojekten und -programmen des Bundes geltend zu machen, wurde beschlossen, die aus dem Programm generierten Senkenleistung aus dem freiwilligen CO<sub>2</sub> Markt zu verkaufen.

### Rolle von EBP Schweiz AG

Die EBP Schweiz AG (nachfolgend EBP genannt) ist eine vom BAFU zugelassene Validierungs- und Verifizierungsstelle (VVS). Die VVS führen die unabhängige Prüfung der Kompensationsprojekte und -programme und der aus ihnen resultierenden Emissionsverminderungen. EBP weist aufgrund der zahlreich bearbeiteten Projekte viel Erfahrung in diesem Fachgebiet auf. So hat EBP im Jahr 2021 beispielsweise 11 Kompensationsprojekte entwickelt, 34 Projekte validiert und 27 Projekte verifiziert.

EBP hat die zirkulit AG bei der Entwicklung des freiwilligen Kompensationsprogramms «Dauerhafte CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in Betongranulat» unterstützt. EBP hat dabei zwei Rollen übernommen:

- Als Projektentwickler hat EBP die zirkulit AG unterstützt, das Programm gemäss Anforderungen eines BAFU-Kompensationsprogramms zu entwickeln (Entwickeln der Methodik und Erstellung der notwendigen Dokumente)
- Als Validierer hat EBP sicherstellt, dass das Programm den BAFU-Anforderungen für Kompensationsprojekte und -programme entspricht. Folgenden Kriterien wurde besondere Bedeutung beigemessen: Quantifizierbarkeit der Senkenleistung, Dauerhaftigkeit der Senkenleistung, Vermeiden von Doppelzählungen sowie Aufzeigen der Zusätzlichkeit. Abweichungen von den BAFU-Anforderungen wurden nur in vereinzelt, hier vertretbaren Vereinfachungen toleriert (siehe nachfolgend).

Im Rahmen des Monitorings wird EBP für die Verifizierung der Monitoringdaten zuständig sein.

### Aufbau der Programmbeschreibung

Die Programmbeschreibung stützt sich auf die Vollzugsmitteilung des BAFU für Kompensationsprojekte in der Schweiz. Im Allgemeinen wurden die BAFU-Standards eingehalten. In den folgenden Kapiteln wurden Vereinfachungen vorgenommen:

- Kapitel 1.5 «Termine»: Der Umsetzungsbeginn eines Vorhabens fällt in der Regel bei Kompensationsprogramme des Bundes gemäss CO<sub>2</sub>-Gesetz mit der ersten finanziellen Verpflichtung zusammen. Bei diesem Programm entspricht der Umsetzungsbeginn eines Vorhabens dem Datum des Produktionsbeginns von CO<sub>2</sub> angereichteten Betongranulat der Anlage. Der Wirkungsbeginn eines Vorhabens entspricht dementsprechend dem Umsetzungsbeginn. Darüber hinaus gibt es keine Kreditierungsperiode.
- Das Thema «Abgrenzung zu weiteren klima- oder energiepolitischen Instrumenten und Vermeidung von Doppelzählungen» wird nicht als separates Kapitel behandelt, sondern ist in das Kapitel 3



- «Nachweis der Zusätzlichkeit» integriert und dort kurz erörtert. Ausserdem wurde bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse keine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.
- In diesem Programm wird eine Senkenleistung und keine Emissionsreduktion erzeugt. Die klassische Formel zur Berechnung erzielter Emissionsverminderungen bei Kompensationsprogrammen des Bundes gemäss CO<sub>2</sub>-Gesetz wird hier umformuliert, um die Senkenleistung des Programms auf vereinfachte Weise zu berechnen (s. Kapitel 4.2.1).
  - Es wurde auf das Kapitel «Überprüfung der Einflussfaktoren und der ex-ante definierten Referenzentwicklung» verzichtet. Als einziger relevanter Einflussfaktor wurde eine mögliche Änderung des CO<sub>2</sub>-Gesetzes identifiziert. Wie bereits in Kapitel 2.2 und 4.4.2 erläutert, wird dieser Aspekt im Rahmen des Monitorings regelmässig überprüft. Ein zusätzliches Kapitel in dieser Hinsicht wurde nicht für notwendig erachtet.

### **Monitoring der Senkenleistung**

Die zirkulit AG rapportiert monatlich (evtl. quartalsweise) die umgesetzte Senkenleistung im Monitoringbericht. EBP prüft diese auf Richtigkeit und Vollständigkeit. Darüber hinaus werden die vorgenommenen Anpassungen, z. B. in Bezug auf die Emissionsfaktoren, überprüft.

Im jährlichen Monitoringbericht wird die Wirtschaftlichkeit des Programms als Ganzes geprüft und allfällige Abweichungen von der Programmbeschreibung diskutiert. EBP prüft, ob das Programm weiterhin unwirtschaftlich ist und ob die vorgenommenen Änderungen angemessen sind. Eine Übersicht über die im Laufe des Jahres erzielte Senkenleistung und die verkauften Zertifikate ist ebenfalls in diesem Bericht enthalten und wird von EBP überprüft.

### **Ausgabe von Zertifikaten für die erbrachte Senkenleistung**

Die zirkulit AG stellt für die im Monitoringbericht bestätigte Senkenleistung Zertifikate aus (vgl. Anhang 10). Mit diesen wird die Senkenleistung der vereinbarten Menge Kohlenstoffdioxid bestätigt. Mit der Aushändigung des Zertifikats versichert die zirkulit AG, dass etwaige Doppelzählungen ausgeschlossen sind. Zudem wird garantiert, dass die sequestrierte Menge CO<sub>2</sub> um alle Emissionen im Zusammenhang mit der Beschaffung des CO<sub>2</sub> und der Sequestrierungstechnologie bereinigt ist. Durch EBP wird der gesamte Prozess überwacht und kontrolliert. EBP prüft insbesondere, ob die Daten im Monatsbericht korrekt und vollständig sind.

### **Unabhängigkeitserklärung**

EBP bestätigt, dass sie – abgesehen von den Leistungen im Rahmen der Entwicklung und Validierung des Programms und die Verifizierung der Monitoringdaten – von der zirkulit AG unabhängig ist.

### **Fazit**

EBP hat die Programmbeschreibung und die unterstützenden Dokumente und Berechnungen ausführlich geprüft. Diese sind vollständig und konsistent. Die getroffenen Annahmen sind konservativ und begründet. Es wurde keine Unstimmigkeit oder Unklarheit in der Programmbeschreibung gefunden und keine kritischen Punkte

festgestellt. Die Vereinfachungen, die in Bezug auf Vollzugsmitteilung des BAFU für Kompensationsprojekte vorgenommen wurden, sind kleine Formalitäten. Ein hoher Standard des Programms ist gewährleistet. Das Programm erfüllt damit aus Sicht von EBP die Anforderungen an ein Kompensationsprogramm. Die im Monitoringbericht rapportierte und geprüfte Senkenleistung kann als Zertifikate im freiwilligen CO<sub>2</sub>-Markt verkauft werden und bestätigt die Sequestrierung der entsprechenden Menge Kohlenstoffdioxid.

## 6 Anhänge

- **Anhang 1:** Ökobilanz zirkulit<sup>®</sup> Beton und Speicherprozess
- **Anhang 1.1:** Zusammenfassung der Ökobilanz
- **Anhang 2:** Erwartete Produktionsmengen, Emissionen und Senkenleistung der Vorhaben
- **Anhang 3:** Wirtschaftlichkeitsanalyse Vorhaben Eberhard Bau AG Ebirec
- **Anhang 4:** Emissionsfaktoren Vorhaben Eberhard Bau AG Ebirec
- **Anhang 4.1:** Emissionsfaktoren Vorhaben Eberhard Bau AG Ebirec Berechnung
- **Anhang 5:** Organigramm der zirkulit AG
- **Anhang 6:** Gesuch zur Aufnahme weiterer Vorhaben in das Programm der zirkulit AG
- **Anhang 7:** Monitoringtool
- **Anhang 8:** Prozessanweisung CO<sub>2</sub>-Speicherung im Ebirec und Analyse der Proben im EbiLAB, Eberhard Bau AG
- **Anhang 9:** Beispiel Chargenprotokoll Vorhaben Eberhard Bau AG Ebirec
- **Anhang 10:** Beispiel Zertifikat über die CO<sub>2</sub>-Senkenleistung der zirkulit AG