

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)

Volkswirtschaftliche Beurteilung (VOBU) der LRV-Revision 2022 und einer Branchenvereinbarung zur Emissionsminderung bei Zementwerken

Schlussbericht
Zürich, 27. April 2021

Quirin Oberpriller, Jürg Füssler (INFRAS)
Rolf Gerber (Neosys)

Impressum

Volkswirtschaftliche Beurteilung (VOBU) der LRV-Revision 2022 und einer Branchenvereinbarung zur Emissionsminderung bei Zementwerken

Schlussbericht

Zürich, 27. April 2021

VOBU Luftreinhaltung Zementwerke.docx

Auftraggeber

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU)

Projektleitung

Rainer Kegel (BAFU)

Autorinnen und Autoren

Quirin Oberpriller, Jürg Füssler (INFRAS)

Rolf Gerber (Neosys)

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

Neosys AG, Privatstrasse 10, 4563 Gerlafingen

Tel. +41 32 674 45 11

Begleitgruppe

Rainer Kegel, Beat Müller, Philipp Röser (BAFU)

Stefan Vannoni, Martin Tschan (cemsuisse)

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt sind allein die Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

1.	Einleitung	5
1.1.	Ausgangslage	5
1.2.	Ziel	5
1.3.	Struktur und Inhalt VOB	5
1.4.	Beschreibung technischer Hintergrund Zementwerke	6
2.	Kurzportrait Referenz und zwei Szenarien	10
2.1.	Referenz	10
2.2.	LRV 2022	11
2.3.	Neue Branchenvereinbarung	11
2.4.	Ordnungspolitische Überlegungen	12
3.	Relevanzanalyse und Wirkungsmodell	13
3.1.	Relevanzanalyse	13
3.2.	Wirkungsmodell	15
3.3.	Vollzug	16
4.	Wirkungsanalyse	17
4.1.	Neue Technologien zur Umsetzung der Massnahmen	17
4.2.	Kosten	18
4.2.1.	Methodik und Annahmen	18
4.2.2.	Zusammenfassung Ergebnisse	21
4.3.	Nutzen	23
4.3.1.	Methodik und Annahmen	23
4.3.2.	Zusammenfassung Ergebnisse	26
4.4.	Nicht monetarisierte Aspekte	27
4.4.1.	Alternative Roh- und Brennstoffe	28
4.4.2.	Regionale Unterschiede	28
4.4.3.	Opportunitätskosten	29
4.4.4.	Weitere Treibhausgasemissionen	30
4.4.5.	Emissionshandelssystem	30
5.	Synthese und Folgerungen	31

5.1.	Übersicht Ergebnisse	31
5.2.	Würdigung der Ergebnisse	34
5.3.	Optimierungsmöglichkeiten	34
5.4.	Vertiefungsbedarf	35
5.5.	Bezug zu RFA-Prüfpunkten und Nachhaltigkeitszielen	36
Annex		38
A1.	Sensitivitätsanalyse	38
A1.1.	Primärenergieanteil RTO bzw. DECONOX	38
A1.2.	Nutzungsdauer	39
A2.	Vertraulichkeit und Haftungsausschlusserklärung	41
A2.1.	Vertraulichkeit	41
A2.2.	Haftungsausschlusserklärung	41
Literatur		42

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Das UVEK plant im Rahmen einer Revision der Luftreinhalte-Verordnung (LRV), die Emissionsgrenzwerte für verschiedene Luftschadstoffe bei Zementwerken zu verschärfen. Die Werke müssten sodann die bestehenden SNCR-Anlagen auf SCR-, SNCR-/RTO- oder allenfalls DeCONOx-Systeme umrüsten. Das BAFU sieht die dafür notwendigen Investitionen in Millio-nenhöhe als wirtschaftlich tragbar.

Die Zementindustrie erachtet die vorgeschlagenen Änderungen der LRV-Revision hingegen als wirtschaftlich nicht tragbar und will stattdessen eine erweiterte Branchenvereinbarung (BV) weiterführen. Ein relevanter Unterschied zwischen den beiden Lösungen ist, dass die Grenzwerte im Stunden- und Tagesmittel pro Werk (LRV 2022) bzw. im Jahres- und Branchenmittel (neue BV) eingehalten werden müssten.

1.2. Ziel

Im Rahmen dieser VOBU sollen die Kosten und Nutzen der nötigen Umrüstungen gemäss LRV 2022 sowie der neuen Branchenlösung im Vergleich zum Status quo analysiert und verglichen werden. Dies soll als eine Diskussionsgrundlage für die involvierten Akteure dienen.

1.3. Struktur und Inhalt VOBU

Als Analyserahmen dient das methodische Konzept der Volkswirtschaftlichen Beurteilung von Umweltmassnahmen (VOBU) gemäss Leitfaden (BAFU 2020a). Die VOBU erfolgt in vier Arbeitsschritten. Die folgende Tabelle zeigt deren Inhalte und Untersuchungsmethoden:

Tabelle 1: Arbeitsschritte VOB

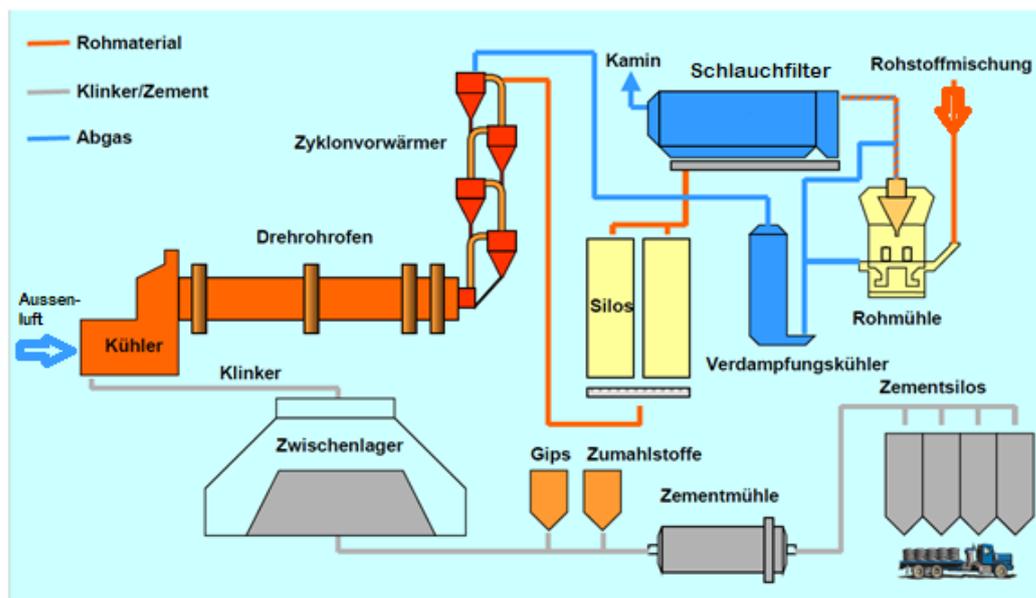
Arbeitsschritt	Inhalt	Untersuchungsmethoden
Vorarbeiten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sichtung bestehende Unterlagen ▪ Definition Szenarien ▪ Relevanzanalyse 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dokumenten-/Literaturanalyse ▪ Inputs Auftraggeber / Cemsuisse
Analyse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Datenerhebung ▪ Berechnungen / Analysen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interviews / Fragebogen Zementwerke ▪ Plausibilisierung durch weitere Experten ▪ Datenanalysen ▪ Eigene Berechnungen
Vergleich / Synthese	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vergleich der Szenarien ▪ Würdigung/Interpretation ▪ Beurteilung von Effektivität und Effizienz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Synthesearbeit ▪ Gemäss Leitfaden BAFU
Berichterstattung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ VOB Bericht ▪ VOB Quick-Check 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ nicht relevant

Tabelle INFRAS.

1.4. Beschreibung technischer Hintergrund Zementwerke

In Abbildung 1 sind die Materialflüsse eines Zementwerks dargestellt. Zur optimalen Nutzung der Energie durchlaufen das Rohmaterial und die Abgase die Anlage im Gegenstrom. Im Folgenden werden einige der notwendigen Konzepte und Begriffe erklärt.

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Herstellung von Zement am Beispiel eines Zyklonvorwärmerofens



Quelle: FZKA 2000

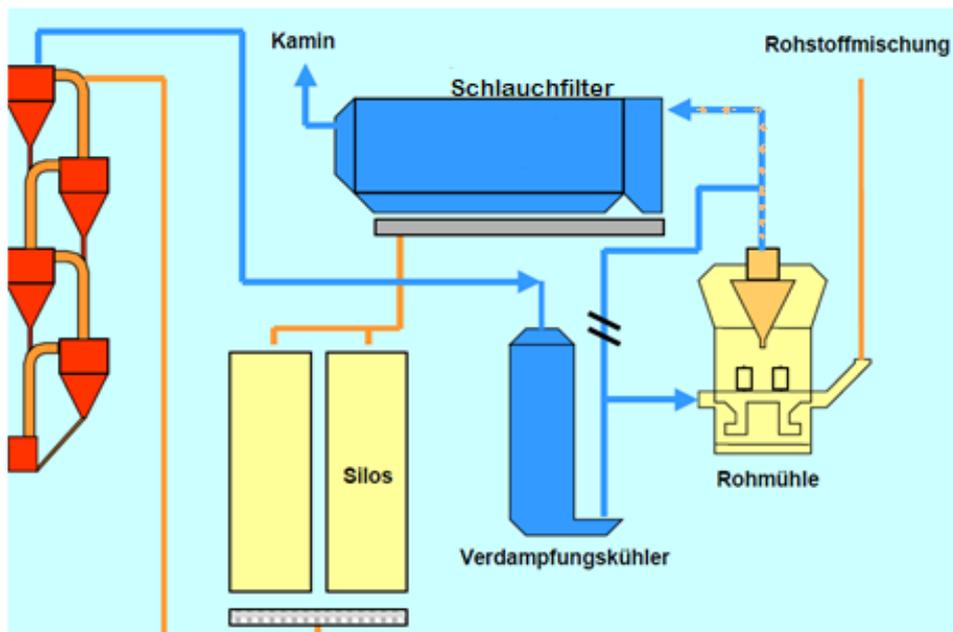
Verbundbetrieb und Direktbetrieb

Das heiße Ofenabgas durchläuft im Gegenstrom zum Rohmehl den Vorwärmer, wo es einen Grossteil seines Wärmeinhalts an das Rohmehl überträgt. Die Abgastemperatur nach dem Vorwärmer beträgt 300 bis 400°C. Für die Ableitung dieser Abgase existieren zwei Betriebsweisen:

Im *Verbundbetrieb* wird der restliche Wärmeinhalt des Abgases zum Trocknen des Mahlgutes in der Rohmühle genutzt. Dies geschieht nur so lange, wie die Rohmühle arbeitet.

Abbildung 2 zeigt schematisch das Fließschema für das Abgas beim Verbundbetrieb. Es ist ersichtlich, dass das Ofenabgas (blau) aus dem Vorwärmer (rot) durch die Rohmühle geleitet und danach im Gewebefilter entstaubt wird. Im Verbundbetrieb wird der Verdampfungskühler mit stark verringerter Leistung oder gar nicht betrieben.

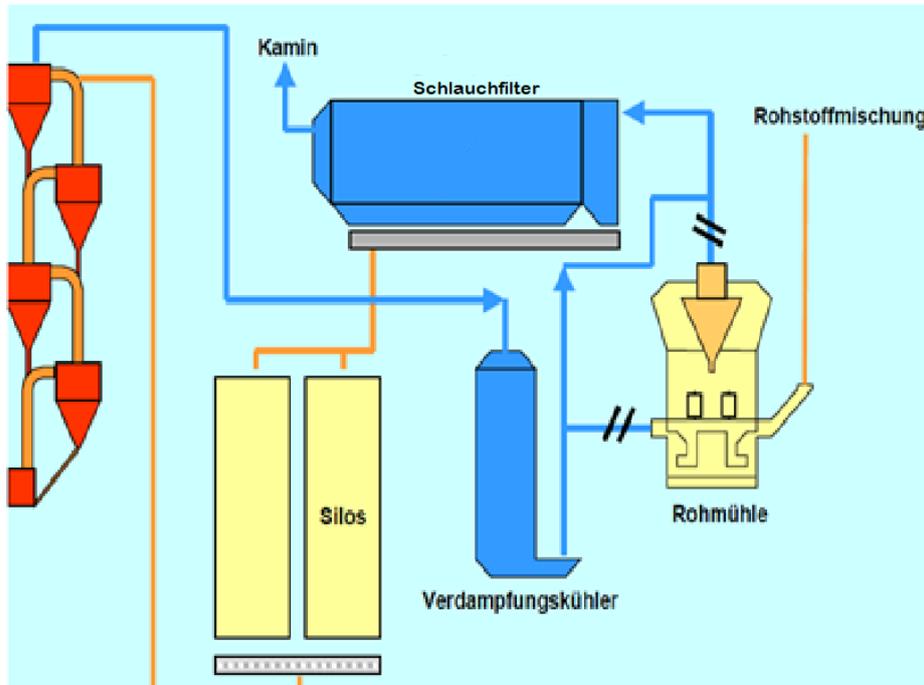
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Verbundbetriebs bei einem Zyklonvorwärmerofens



Quelle: FZKA 2000

Im *Direktbetrieb* wird das Ofenabgas direkt vom Verdampfungskühler dem Filter zugeführt, was in Abbildung 3 schematisch dargestellt ist. Die Rohmehlmühle ist bei diesem Direktbetrieb ausser Funktion. Um die Schlauchfilter nicht zu schädigen, wird das Abgas zuvor im Verdampfungskühler mit Wasser gekühlt.

Abbildung 3: Schematische Darstellung des Direktbetriebs bei einem Zyklonvorwärmerofens



Quelle: FZKA 2000

Im Verbundbetrieb kommt es zu einer Abscheidung von Schadstoffen aus dem Abgas an das Rohmehl, insbesondere saure Stoffe adsorbieren gut am basischen Rohmehl. Sie werden so in den Hochtemperaturbereich getragen und zerstört und gelangen nicht in die Umwelt. Zudem sind die Gastemperaturen beim Schlauchfilter im Verbundbetrieb tiefer, was zusätzlich die Absorption der Stoffe im Filterstaub begünstigt. Die Emissionen von SO_2 und NH_3 , weniger ausgeprägt auch der VOC, sind aus diesen Gründen im Verbundbetrieb niedriger als im Direktbetrieb.

Der Anteil des Verbundbetriebs an den Betriebsstunden der Anlage hängt von der jeweiligen Anlage ab. Aus anlagentechnischen Gründen – der Ofen sollte nicht in leerem Zustand betrieben werden – ist die Rohmehlmühle im Vergleich zur Ofenanlage auf einen höheren Durchsatz ausgelegt. Der Verbundbetrieb wird solange gefahren, bis die Rohmehlsilos gefüllt sind. Anschliessend wird prozessbedingt auf Direktbetrieb umgestellt.

Der Anteil Direktbetrieb an der Gesamtbetriebszeit der Schweizer Werke mit Zyklonvorwärmer beträgt je nach Werk zwischen 5 und 30%, abhängig von der Dimensionierung der Anlagenteile. Wenn die Rohmehlmühle nicht in Betrieb ist, verbraucht die Anlage entsprechend weniger elektrische Energie. Der Direktbetrieb erlaubt es zudem, mit Schadstoffen angereicherten Staub aus dem System zu entfernen und zu verwerten.

Der Lepol-Ofen in Cornaux kann nur im Direktbetrieb betrieben werden, da die Homogenisierung des Rohmehls in diesen Ofentypen mit Wasser erfolgt und die Erwärmung mit Ofenabgas nicht sinnvoll ist.

Staub

Staubemissionen sind im Verbundbetrieb und Direktbetrieb gleich hoch. In beiden Betriebsarten können die Emissionen mit den effektiven Staubfiltern sehr tief gehalten werden, so dass die letzten zehn Jahre durchwegs ein Jahresmittel von unter 10 mg/m³ erreicht werden konnte.

Stickstoffoxide

Der Klinkerbrennprozess ist ein Hochtemperaturprozess, der zur Bildung von Stickstoffoxiden (NO_x) führt. Sie bilden sich während des Verbrennungsprozesses entweder durch eine Kombination von Brennstoff-Stickstoff mit Sauerstoff in der Flamme oder durch eine Kombination von atmosphärischem Stickstoff und Sauerstoff in der Verbrennungsluft.

Die Verbrennungsbedingungen, und somit die Entstehung von NO_x, werden durch eine Vielzahl von Primärbedingungen und -massnahmen wie Brennstoffe, Sauerstoffzufuhr, Brenner- und Anlagendesign (Kalzinator) beeinflusst. Dies bedeutet wiederum, dass die NO_x-Emissionen stark von den vorhandenen Einrichtungen und Bedingungen abhängen, und die Optimierung für jede Anlage eine individuelle Herausforderung darstellt.

Die Stickstoffoxidemissionen sind unabhängig von der Betriebsart und im Verbund- und Direktbetrieb gleich hoch.

Die Schweizer Zementindustrie hat die Stickstoffoxidemissionen in den letzten zwanzig Jahren von 508 mg/m³ (arithmetische Mittelwerte der Jahresmittelwerte der einzelnen Werke für das Jahr 2001; geltender LRV-Grenzwert Stand 2001: 800 mg/m³) in Kombination mit einer Branchenvereinbarung auf 365 mg/m³ im Jahr 2020 abgesenkt.

Gasförmige organische Stoffe (VOC)

Organische Verbindungen kommen einerseits im Brennstoff als Energieträger in das Ofensystem (v.a. bei Abfallbrennstoffen, welche z.T. bei der Sekundärfeuerung zugegeben werden), andererseits als Bestandteil des primären bzw. alternativen Rohmaterials¹. Sowohl im Rohmaterial als auch in den Abfallbrennstoffen sind der Gehalt und die Art an VOC sehr variabel und die Emissionen entsprechend schwierig steuerbar.

Die organischen Verbindungen in Brennstoffen werden durch die Brenner eingespeist und verbrennen bei hohen Temperaturen (800°C–2'000°C) und Sauerstoffüberschuss vollständig.

¹ Beispielsweise Aushub- und Ausbruchmaterial von Baustellen. (unverschmutzt oder verschmutzt gemäss VVEA Anhang 4).

Ein Teil der organischen Verbindungen im Rohmaterial kann sich während des Aufwärmprozesses in der Rohmehlmühle und im Vorwärmer verflüchtigen.

Im Verbundbetrieb adsorbieren über 90% der verflüchtigten organischen Stoffe wieder an Rohmehl und werden schliesslich in den Zonen mit höherer Temperatur zerstört. Da im Direktbetrieb die Verweildauer des Gases im System kürzer und die Abgastemperaturen höher sind, sind die TOC-Emissionen in der Regel etwas höher als im Verbundbetrieb.

Schwefeldioxid

Ebenso wie bei TOC gelangt Schwefel durch die Brennstoffe und das Rohmaterial in das Ofensystem. Schwefel aus den Brennstoffen wird in der heissen Zone des Ofens vollständig oxidiert und als CaSO_4 in den Klinker eingebunden. Dies gilt auch für nicht-flüchtige Schwefelverbindungen aus dem Rohmaterial.

Die flüchtigen Schwefelverbindungen aus dem Rohmaterial können SO_2 bilden. SO_2 ist ein saures Molekül und hat eine hohe Adsorptionsaffinität zum kalkhaltigen Rohmaterial. Entsprechend sind diese Emissionen im Direktbetrieb höher als im Verbundbetrieb.

Ammoniak (NH_3)

Die NH_3 -Emissionen entstehen in den ersten Prozessschritten primär aus dem Rohstoffmaterial. Zusätzlich wird NH_3 (oder auch Harnstoff) in Abgasreinigungstechniken zur Reduktion von NO_x eingesetzt (SNCR). Ammoniak adsorbiert wie TOC und SO_2 gut an das Rohmaterial, und daher sind die Emissionen im Verbundbetrieb markant niedriger als im Direktbetrieb.

2. Kurzportrait Referenz und zwei Szenarien

Im Folgenden stellen wir die in der VOBU verwendeten Szenarien sowie die Referenz dar. Des Weiteren geben wir ordnungspolitische Überlegungen im Hinblick auf die beiden Szenarien. Informationen zu Hintergrund und Umfeld der Massnahmen sind im erläuternden Bericht zur Änderung der Luftreinhalte-Verordnung (BAFU 2020b) zu finden, sowie in ECRA 2019, einem technischen Bericht, welcher eine Einschätzung des Stands der Technik bezüglich Emissionsreduktionen in der Zementindustrie in der Schweiz und in den Nachbarländern gibt.

2.1. Referenz

Das Referenzszenario geht davon aus, dass die derzeit gültigen LRV-Grenzwerte unverändert gelten und die aktuelle BV mit einem NO_x -Grenzwert von 400 mg/m^3 im Jahresmittel der Branche weitergeführt wird. Dies bedeutet, dass die Zementwerke weiterhin mit der derzeitigen Abgasreinigungstechnik betrieben werden (Status quo).

Ein Werk erstellt derzeit ein zusätzliches RTO-System. Wir nehmen an, dass dieser Umbau nicht Teil der Referenz ist. Für diese Annahme spricht, dass die Umrüstung zumindest teilweise im Hinblick auf die zukünftige regulatorische Entwicklung vorausschauend umgesetzt wurde. Dagegen spricht, dass diese Umrüstung bereits stattfindet und daher rein zeitlich Teil der Referenz sein könnte. Für den Vergleich zwischen den beiden Szenarien «LRV 2022» und «neue BV» spielt diese Annahme keine Rolle.

2.2. LRV 2022

Dieses Szenario sieht die in Tabelle 2 dargestellten Reduktionen der LRV-Grenzwerte für die einzelnen Schadstoffe vor. Dabei gelten insbesondere auch die Vorgaben zur Beurteilung von kontinuierlichen Messwerten mittels Stunden- und Tagesmittelwerten gem. Art. 15 Abs. 4 LRV. Es ist vorgesehen, dass die revidierte LRV 2022 in Kraft tritt.

Tabelle 2: Grenzwerte «LRV 2022»

Schadstoff	Grenzwert [mg/m ³]	
	Aktuell	LRV 2022
NO _x	500	200
NMVOC	80	werkspezifisch 10 bis 50 mg/m ³ *
PM10	20	10
SO _x	500	400
NH ₃	30**	30 mg/m ³ , kontinuierliche Messung (in Anhang 2; nur noch NH ₃ , nicht mehr NH ₃ + NH ₄ ⁺ -Verbindungen)

*) Emissionen aus Abfällen dürfen 10 mg/m³ betragen; werkspezifisch Erhöhung unter Berücksichtigung der Zusammensetzung der natürlichen Rohstoffe.

***) allgemeiner Grenzwert nach Anhang 1 LRV

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: BAFU

2.3. Neue Branchenvereinbarung

Aus Tabelle 3 wird ersichtlich, dass für dieses Szenario sowohl die dort aufgeführten LRV-Grenzwerte (Stand 1.1.2016) pro Werk gelten (inklusive der Vorgaben zur Beurteilung von Stunden- und Tagesmittelwerten gem. Art. 15 Abs. 4 LRV) als auch die zeitlich abgestuften Branchen-Jahresmittelwerte.

Tabelle 3: Einzuhaltende Zielwerte gemäss «Neue BV»

Ab Jahr	Einheit	NO _x	VOC	Staub	Benzol	SO _x	NH ₃
LRV-Grenzwerte pro Werk							
2022	mg/m ³	500	80	20	5	500	30 ^{*)}
Branchen-Jahresmittelwert							
2022	mg/m ³	350	70	10	5	350	30 ^{**)}
2024	mg/m ³	300	60	10	4.5	300	30 ^{**)}
2026	mg/m ³	200	50	10	4	200	30 ^{**)}

^{*)} Grenzwert nach Anhang 1 LRV, keine Vorschrift zur kontinuierlichen Messung in Anh. 2 Ziff. 119 LRV (wie bisher).

^{**)} Umfasst Verbund- und Direktbetrieb.

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: Cemsuisse

2.4. Ordnungspolitische Überlegungen

Beide Szenarien haben das Ziel, lokale Luftschadstoffemissionen zu reduzieren. Sie beruhen jedoch auf unterschiedlichen institutionellen Ansätzen:

- Das Szenario «LRV 2022» sieht eine Verschärfung der gesetzlichen Vorgaben seitens Bund (Luftreinhalte-Verordnung) vor.
- Im Szenario «neue BV» werden die Emissionsreduktionen in einer verbindlichen Vereinbarung zwischen den Standortkantonen² und den Zementwerken festgehalten unter Beibehaltung der aktuellen gesetzlichen Vorgaben.

Branchenvereinbarungen sind Selbstverpflichtungen einer Branche, die vertraglich zwischen den Akteuren der Branche und den Behörden festgeschrieben werden. Eine BV ist in der Regel darauf ausgerichtet, Verbesserungsmassnahmen nach einem festgelegten Zeitplan zu realisieren. Im Umweltkontext sieht Artikel 41a des Umweltschutzgesetzes (USG) explizit BVs als Instrument vor, um auf freiwilliger Basis einen gewünschten Zielwert oder ein gewünschtes Handeln zu erlangen (siehe Box). Sie werden daher auch in anderen Branchen im Umweltbereich genutzt.³

² Dies sind die Kantone Aargau, Bern, Graubünden, Neuenburg und Waadt.

³ Beispielsweise besteht eine Branchenvereinbarung zu SF₆-Emissionen von Schaltanlagenhersteller (siehe <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/verminderungsmassnahmen/branchenvereinbarungen/branchenloesung-sf6.html>) (abgerufen am 06. April 2021)

Box: Umweltschutzgesetz, Art. 41a, Zusammenarbeit mit der Wirtschaft:⁴

1 Der Bund und, im Rahmen ihrer Zuständigkeit, die Kantone arbeiten für den Vollzug dieses Gesetzes mit den Organisationen der Wirtschaft zusammen.

2 Sie können Branchenvereinbarungen durch die Vorgabe mengenmässiger Ziele und entsprechender Fristen fördern.

3 Vor dem Erlass von Ausführungsvorschriften prüfen sie freiwillige Massnahmen der Wirtschaft. Soweit möglich und notwendig, übernehmen sie Branchenvereinbarungen ganz oder teilweise in das Ausführungsrecht.

Artikel 41a des Umweltschutzgesetzes ist eine Handlungsanweisung und entbindet nicht vom geltenden Recht. Bestehende gesetzliche Vorgaben (hier die Vorgaben der LRV) können daher nicht durch eine BV umgangen werden. Der Regulator sieht allerdings meist von einer Verschärfung der gesetzlichen Vorgaben ab, wenn eine BV abgeschlossen wird. Wird eine BV nicht eingehalten, kann diese daher in der Regel nicht direkt auf dem Rechtsweg eingeklagt werden. Es bestehen daher bei einer BV keine direkten Sanktionsmöglichkeiten des Regulators. Allerdings hat der Regulator die Möglichkeit, in Zukunft wieder auf gesetzliche Vorgaben zurückzugreifen, was im Sinne einer langfristigen Zusammenarbeit einen Anreiz für die Wirtschaft darstellt, BVs einzuhalten.

BVs können die Eigenverantwortung und die Kooperation fördern und gelten als wirtschaftlich effizient und flexibel. Sie knüpfen zudem an Artikel 95 der Bundesverfassung an, demzufolge sich Bund und Kantone an den Grundsatz der Wirtschaftsfreiheit halten.

3. Relevanzanalyse und Wirkungsmodell

3.1. Relevanzanalyse

Die Relevanzanalyse ist einer der ersten Schritte einer VOBÜ. Sie legt die jeweilige Analysetiefe für Auswirkungsbereiche fest und ist daher die Grundlage für ein relevanzorientiertes Vorgehen. Tabelle 4 zeigt die Relevanzanalyse anhand der im VOBÜ-Leitfaden aufgeführten zwölf Auswirkungsbereiche zu Umwelt (U), Wirtschaft (W) und Gesellschaft (G). Nur die mit «Berücksichtigt» eingestufteten Auswirkungsbereiche werden im Folgenden detailliert analysiert.

⁴ Aktuell diskutiert das Parlament im Zusammenhang mit der Schweizerischen Kreislaufwirtschaft eine Anpassung des Umweltschutzgesetzes, um die Zusammenarbeit von Bund und Kantonen mit der Wirtschaft zu stärken und Grundlage für die Zusammenarbeit mit einzelnen Unternehmen zu schaffen (Art. 41a, Abs 2): «Sie können in Abstimmung mit den betroffenen Branchen, Unternehmen oder Organisationen Vereinfachungen durch die Vorgabe mengenmässiger Ziele und entsprechenden Fristen vereinbaren».

Tabelle 4: Relevanzanalyse Auswirkungen Massnahmen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft

Auswirkungsbe- reiche Umwelt	Einstufung	Begründung / Vorgesehene Bearbeitungstiefe
U1) Klima	Berücksichtigt	Die zusätzlichen Technologien zur Vermeidung von lokalen Schadstoffen benötigen mehr Strom und fossile Brennstoffe. Diese Effekte werden monetarisiert.
U2) Gesundheit	Berücksichtigt	Die zusätzlichen Technologien reduzieren lokale Luftschadstoffemissionen, verbessern die lokale Immissionsituation und haben daher einen positiven Effekt auf die Gesundheit. Diese Effekte werden monetarisiert.
U3) Natürliche Vielfalt	Berücksichtigt	Natürliche Vielfalt ist ein Bestandteil der Kostensätze, die zur Monetarisierung verwendet werden.
U4) Natürliche Produktionsfaktoren	Berücksichtigt	1) Die Massnahmen reduzieren lokale Luftschadstoffemissionen, was sich positiv auf die Biodiversität auswirkt. Dieser Effekt wird anhand von Kostensätzen monetarisiert.
	Qualitativ berücksichtigt	2) Die zusätzlichen Technologien erlauben prinzipiell einen erhöhten Einsatz von alternativen Roh- und Brennstoffen. Eine detaillierte Analyse dieser komplexen Fragestellung ist allerdings kein Fokus dieser VOBU und wird daher nur kurz und qualitativ beschrieben.
	Nicht berücksichtigt	3) Die Verwertung von Abfällen im Zementwerk hat positive Effekte auf die Kreislaufwirtschaft. Dies ist jedoch kein Fokus dieser Studie.
Auswirkungsbe- reiche Wirtschaft		
W1) Unternehmen	Berücksichtigt	Die Massnahmen bewirken bei Zementwerken Investitionskosten und erhöhte Betriebskosten. Es ist prinzipiell denkbar, dass die Zementproduktion in der Schweiz aufgrund der Massnahmen reduziert würde. Deren Kosten sind gegenüber den Gesamtkosten der Zementwerke aber eher klein. Zudem könnten Teile der Kosten an die Konsumenten überwält werden (aber siehe folgende Punkte). Dieser Aspekt wird daher nicht weiter analysiert.
W2) Haushalte	Nicht berücksichtigt	Es ist prinzipiell denkbar, dass die Zementwerke die Massnahmenkosten in Form höherer Produktpreise teilweise an die Konsumenten weitergeben. Dieser Effekt dürfte aber gering sein. Einerseits sind die Massnahmenkosten gegenüber den Gesamtkosten der Zementwerke eher klein. Zudem ist eine Überwälzung z.B. aufgrund des internationalen Wettbewerbes gerade in Grenznähe erschwert.
W3) Arbeitnehmende und Arbeitsmarkt	Nicht berücksichtigt	Es ist prinzipiell denkbar, dass die Massnahmen zu einem Rückgang an regionalen Arbeitsplätzen führen, wenn Zementwerke aufgrund der höheren Kosten schliessen müssen oder Arbeitsplätze abbauen. Dies erachten wir aber als eher unwahrscheinlich, da die Massnahmenkosten relativ klein sind, Härtefallregelungen möglich sind und die Mehrkosten eventuell teilweise an die Kunden überwält werden können.
W4) Gesellschaft	Nicht berücksichtigt	Wir erwarten keine relevanten Effekte, da gesellschaftliche Aspekte von den Massnahmen nicht tangiert werden.
W5) Öffentliche Hand	Nicht berücksichtigt	Wir erwarten keine relevanten Effekte, da kein wesentlicher zusätzlicher administrativer Aufwand zu erwarten ist und auch das Steuersubstrat nicht wesentlich tangiert wird.

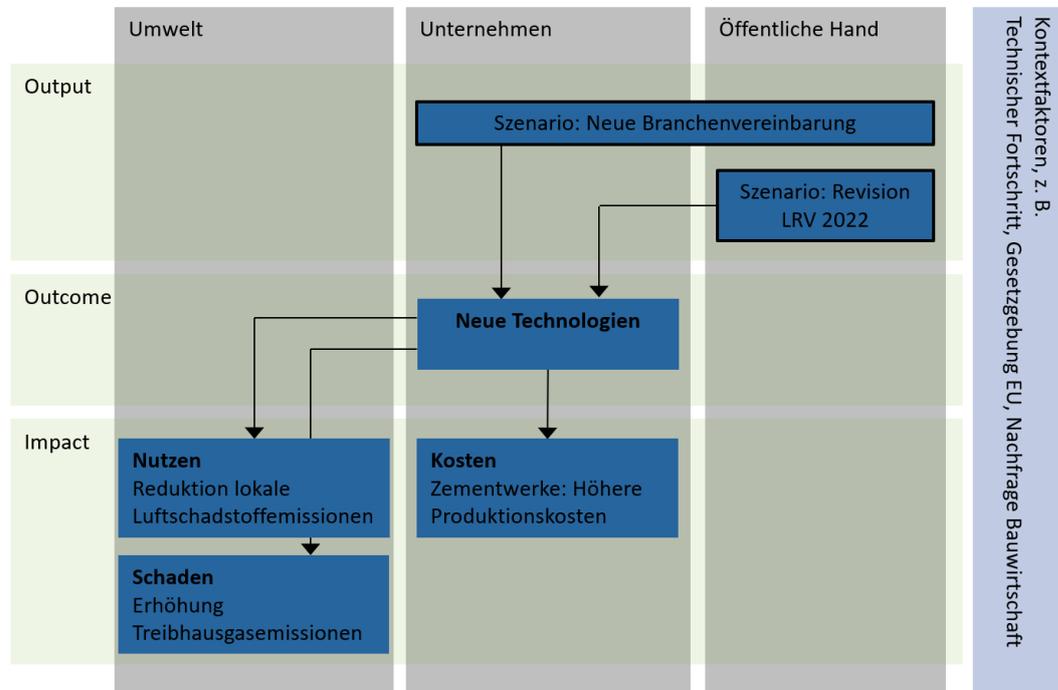
W6) Gesamtwirtschaft	Nicht berücksichtigt	Wir erwarten keine relevanten Effekte, da die Massnahmen im Verhältnis zur Gesamtwirtschaft klein sind.
W7) Innovation, Forschung, Bildung	Nicht berücksichtigt	Wir erwarten keine relevanten Effekte, auch wenn gemäss ECRA (2019, Seite 14) RTO und DeCONOX-Anlagen in Zementwerken noch nicht als Stand der Technik zu gelten hat.
W8) Ordnungspolitik	Berücksichtigt	Ordnungspolitische Überlegungen bilden die Grundlage für die Notwendigkeit staatlichen Handels.
Weitere Kriterien		
Z1) Regionen	Qualitativ berücksichtigt	Da die neue BV die Emissionen im Branchen- bzw. Unternehmensdurchschnitt betrifft, haben die Unternehmen prinzipiell die Wahl, die Massnahmen in den Werken unterschiedlich streng umzusetzen. Die Standortkantone der Zementwerke würden dann unterschiedlich von den Emissionsreduktionen profitieren. Gleichzeitig ist ein Zementwerk je nach Region ein wichtiger lokaler Arbeitgeber.
Z2) Ausland	Nicht berücksichtigt	Durch die Massnahmen könnte sich die Konkurrenzsituation geringfügig verschlechtern, da die Nachbarländer Frankreich, Italien und Österreich eher höhere Grenzwerte kennen. Wir erwarten allerdings keine relevanten Effekte, da Zement ein überwiegend lokales Produkt ist (die Importquote ist ca. 15%; siehe Swisstopo 2020)

Tabelle INFRAS/Neosys.

3.2. Wirkungsmodell

Abbildung 4 zeigt die wichtigsten Wirkungsketten. Die revidierte LRV 2022 bzw. die neue BV bewirken Investitionen in Massnahmen zur Reduktion lokaler Luftschadstoffemissionen. Dies erhöht einerseits die Produktionskosten (Investitionskosten und Betriebskosten) der Zementwerke gegenüber der Referenz. Andererseits resultiert ein zusätzlicher Nutzen, weil weniger lokale Luftschadstoffemissionen emittiert werden (v.a. Gesundheitsnutzen). Allerdings führen die Massnahmen auch zu höheren Treibhausgasemissionen im Betrieb. Diese Aspekte werden im Folgenden im Detail analysiert und monetarisiert. Die in Abbildung 4 hellblau oder in Tabelle 4 mit «Nicht berücksichtigt» deklarierte Aspekte werden hingegen nicht vertieft analysiert.

Abbildung 4: Wirkungsmodell



Grafik INFRAS/Neosys.

3.3. Vollzug

Die kantonalen Fachstellen vollziehen die LRV und überprüfen die Einhaltung der BV-Ziele. In beiden Fällen müssen weiterhin Emissionen gemessen sowie die Einhaltung von Grenzwerten überprüft werden. Daher bewirken beide Szenarien keine massgebliche Änderung gegenüber dem heutigen Vollzug. Im Detail ergeben sich kleinere Unterschiede:

- Für die neue Branchenvereinbarung ist der Koordinationsaufwand für die beteiligten Parteien (sowie BAFU) etwas höher.
- Für LRV 2022 müssen die Kantone werkspezifische VOC-Grenzwerte festlegen. Die Heterogenität der Steinbrüche kann es nötig machen, dass dies jedes Jahr wiederholt werden muss.
- Für LRV 2022 werden Stunden- und Tageswertüberschreitungen erwartet, die von den Werken begründet und von den Kantonen kontrolliert werden müssen.
- Kurzzeitig einzuhaltende Grenzwerte wie Stunden- oder Tagesmittel bewirken gemäss Einschätzung einer kantonalen Fachstelle, dass die Werke schneller auf Emissionsspitzen reagieren, da es sofort zu Compliance-Problemen kommt und zeitnahes Handeln gefragt ist.

Zusammenfassend ändert sich der Vollzug gegenüber heute nicht wesentlich und es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Szenarien.

4. Wirkungsanalyse

Im Folgenden beschreiben wir Vorgehen, Annahmen und Ergebnisse der Wirkungsanalyse. Prämisse dieses Projektes war, dass weder das BAFU noch andere Werke aus unserem Bericht Rückschlüsse auf werkspezifische Daten erhalten dürfen. Um diese zu gewährleisten, haben wir die folgenden Ausführungen wo nötig verallgemeinert und anonymisiert, obwohl uns detaillierte Informationen vorliegen.

4.1. Neue Technologien zur Umsetzung der Massnahmen

Bisher verwenden die Werke zur Reduktion der NO_x-Emissionen die SNCR-Technologie (Selective Non Catalytic Reduction). Dies ist ein Verfahren zur Rauchgasentstickung (d.h. NO_x-Reduktion) mittels Ammoniak (NH₃) oder Harnstoffs als Reduktionsmittel, das im Hochtemperaturbereich von 850 – 1050°C ins Rauchgas eingedüst wird. Diese hohen Temperaturen sind erforderlich, weil kein Katalysator zum Einsatz kommt. Da aufgrund der Temperatursensibilität der Reaktion ein Teil des Reduktionsmittels nicht reagiert oder bei den hohen Temperaturen verbrennt, muss dieses für eine ausreichende Rauchgasentstickung überstöchiometrisch zudosiert werden (etwa Faktor 1.5 bis 1.8). Dadurch kann es aber zu einem NH₃-Schlupf kommen. Da NH₃ ebenfalls ein Schadstoff ist, ist die mit dem SNCR-Verfahren erreichbare NO_x-Reduktion durch die Gefahr eines zu hohen NH₃-Schlupfes begrenzt. Das SNCR-Verfahren hat daher eine im Vergleich zur selektiven katalytischen Reduktion (SCR) geringere NO_x-Minderungsleistung.

Für die Umsetzung der Massnahmen kommen in Zementwerken folgende Technologien in Frage:

- SCR (Selective Catalytic Reduction): Katalytische Rauchgasentstickung mit Ammoniak oder Harnstoff als Reduktionsmittel, das dem Rauchgas vor dem Katalysator im Temperaturbereich von 250 – 400°C zudosiert wird.
- RTO (Regenerative Thermische Oxidation) mit optimierter SNCR: RTO ist ein Verfahren zur thermischen Abgasreinigung, welches v.a. zur Minderung der VOC-Emissionen (u.a. Benzol) eingesetzt wird. In geringerem Ausmass werden auch NH₃-Emissionen vermindert. Die Emissionsverminderung erfolgt durch Nachverbrennung der Abgasinhaltsstoffe bei etwa 800°C, wobei die Abwärme mittels Keramikmasse effizient rückgewonnen wird. Planen die Werke ausschliesslich eine neue RTO-Anlage, muss zudem die bestehende SNCR-Anlage optimiert werden, um die zusätzlichen Anforderungen zu erfüllen («high-efficiency SNCR»). Die entsprechenden Kosten haben wir in die Berechnungen einfliessen lassen.
- DECONOX: Das Verfahren kombiniert das SCR-System mit einer RTO. Damit wird eine hohe Verminderung von Schadstoffen wie beispielsweise NO_x, VOC, Benzol erreicht.

Weitere Informationen zu diesen Technologien sowie deren Reduktionswirkung auf die einzelnen Schadstoffe sind in VDI 2199 sowie im erläuternden Bericht zur Änderung der Luftreinhalte-Verordnung (BAFU 2020b) zu finden.

Wir haben die Werke in einer schriftlichen Umfrage befragt, welche Technologie jeweils für ihre spezifische Ausgangssituation nötig wäre, um die Vorgaben des jeweiligen Szenarios zu erfüllen. Tabelle 5 fasst die Antworten zusammen. Für LRV 2022 würden alle Werke neue Technologie verwenden, vor allem DECONOX-Anlagen.

Für die neue BV planen fünf Werke neue Technologien, davon drei Werke zusätzliche RTO-Anlagen. Diese erlauben, die strengeren NO_x-Ziele mit den bisherigen SNCR-Anlagen zu erfüllen, weil der NH₃-Schlupf durch eine nachgeschaltete RTO-Anlage eliminiert werden kann⁵ (für LRV 2022 ist dies jedoch meist nicht ausreichend, da die bestehenden SNCR-Anlagen die Erfüllungen der Stunden- und Tagesmittel bezüglich NO_x und NH₃ nicht garantieren können). Ein Werk plant keine neue Technologie, sondern ausschliesslich eine Optimierung der bestehenden SNCR-Anlage.

Tabelle 5: Verwendete Technologien je Szenario

Szenario	Technologie	SCR	RTO mit optimierter SNCR	Kombination SCR/RTO (z.B. DECONOX)
neue BV		1 Werk (Polizei-Filter ⁶)	3 Werke	1 Werk
LRV 2022		1 Werk	1 Werk	4 Werke

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: Angaben der sechs Schweizer Zementwerke.

Für die weitere Analyse der Szenarien gehen wir davon aus, dass die Technologien so implementiert würden, wie dies die Werke angegeben haben. Dies hat wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse, weil v.a. die Kostenunterschiede zwischen den beiden Szenarien im Wesentlichen durch die Wahl der Technologien bestimmt werden. Wir schätzen die Angaben der Werke als plausibel ein, können aber nicht ausschliessen, dass im Umsetzungsfall eine andere Technologie verwendet werden würde.

4.2. Kosten

4.2.1. Methodik und Annahmen

4.2.1.1. Investitionen

Die Investitionskosten, welche für die Einhaltung der Vorgaben der beiden Szenarien zu erwarten sind, wurden durch schriftliche Befragung jedes einzelnen Werkes erhoben. Gemäss den

⁵ Der primäre Grund für die Installation einer RTO-Anlage ist jedoch die Verminderung von VOC-Emissionen.

⁶ Es handelt sich um einen normalen Katalysator, der im Vergleich zu LRV 2022 auf etwas geringere Effizienz ausgelegt werden muss und dadurch etwas kleiner und günstiger ausfällt.

Werken basieren ihre Angaben zumindest teilweise auf Richtofferten von spezialisierten Anbietern für Abluftreinigungskomponenten, z.B. von der Firma Scheuch für die DECONOX-Technologie und von der Firma CTP für die RTO-Technologie.

Die uns gelieferten Angaben bezüglich Technologie und Kosten haben wir durch den Vergleich der Angaben der verschiedenen Werke unter Berücksichtigung der jeweiligen Abluftmengen untereinander verglichen und als plausibel befunden. Weitere Vergleichswerte stehen für die High-Dust-Schaltung der SCR-Technologie aus dem VDZ-Untersuchungsbericht für die Schwenk Zement KG in Heidenheim-Mergelstetten zur Verfügung (VDZ 2014). Dass die angegebenen Investitionskosten plausibel sind, ergab zudem eine telefonische Rückfrage bei der Firma Scheuch.

Für die Berechnung wurden folgenden Annahmen verwendet:

Nutzungsdauer: Die Investitionskosten werden über die geschätzte Nutzungsdauer linear auf Jahreskosten umgelegt. Es wurde für alle Technologien eine einheitliche Nutzungsdauer von 15 Jahren festgelegt. In Anhang A1.2 analysieren wir den Einfluss dieser Annahme anhand einer Sensitivitätsanalyse.

Ersatzinvestitionen: Wir berücksichtigen, dass die Werke nach Ablauf der Nutzungsdauer Ersatzinvestitionen tätigen müssen. Dabei ist zu beachten, dass diese geringer sind als die anfänglichen Investitionen, z.B. weil die bauseitigen Kosten (siehe nächster Punkt) sowie allenfalls weitere Kosten für Stahlträger, Gehäuse oder Betonelemente nicht nochmals anfallen. Wir gehen daher vereinfacht davon aus, dass die Ersatzinvestitionen 50% der anfänglichen Investitionen betragen.

Da die Nutzungsdauer der ersetzten Anlagen den Betrachtungshorizont dieser Studie übersteigt, berücksichtigen wir die Ersatzinvestitionen nur anteilig bis zum Ende des Betrachtungshorizonts.

Bauseitige Kosten: Kosten für platzbedingte Rückbauten bestehender Anlagen, Terrainanpassungen, Foundationen, Energiezuführung sowie Mehrkosten aufgrund enger Platzverhältnisse sind in den Kostenprognosen (Richtangeboten) der Anbieter in der Regel nicht berücksichtigt. Für die bauseitigen Kosten haben wir bei beiden Szenarien mit Mehrkosten von 35% der Anlagenkosten gerechnet (bei einem Werk wegen besonders engen Platzverhältnissen mit 50%). Dass diese Annahmen plausibel sind, wurde auf Rückfrage sowohl von der Firma Scheuch als auch von der Firma Elex bestätigt. Gemäss Angaben der Firma Elex liegen diese Kosten typischerweise zwischen 30% (einfache Situation) und 60% (komplexe Situation). Beim derzeit bewilligten Projekt eines Werks sind die bauseitigen Kosten innerhalb dieser Bandbreite.

4.2.1.2. Betrieb

Bei den von den Werken erhaltenen Angaben zu den Betriebskosten handelt es sich mehrheitlich um spezifische Kosten in CHF/t Klinker, welche die gesamten Strom- oder Betriebsmittelkosten repräsentieren. Für den Vergleich der beiden Emissionsreduktions-Szenarien interessieren hingegen die Mehrkosten pro Szenario im Vergleich zum Status quo.

Wir haben die Betriebsmehrkosten deshalb mit eigenen Rechnungen ermittelt. Die für die Berechnungen massgebenden physikalischen Grössen haben wir wiederum durch telefonische Rückfrage mit der Firma Scheuch verifiziert. Die Ergebnisse der Berechnungen haben wir, wo möglich, anhand spezifischer Kostenangaben der Werke und anhand Literaturangaben (VDZ-Berichte) plausibilisiert. So stehen Betriebskostenangaben für die Low-Dust-SCR-Technologie aus dem VDZ-Abschlussbericht zum Vorhaben «Katalytische Low-Dust-Entstickung des Abgases an einer Drehofenanlage der Zementindustrie (Reingas – SCR)» der Rohrdorfer Zement zur Verfügung (VDZ 2015).

Für die Berechnung verwenden wir folgende Annahmen:

Strommehrverbrauch: Der höhere Stromverbrauch resultiert überwiegend aus dem zusätzlichen Druckwiderstand, den die Abgase beim Durchströmen der pro Szenario vorgesehenen Abluftreinigungsanlagen überwinden müssen. Hierzu wird eine höhere Ventilatorleistung benötigt. Die Berechnung basiert auf folgenden zusätzlichen Druckwiderständen:

- DECONOX: 30 mbar
- RTO: 35 mbar
- SCR (low dust): 30 mbar (mit Wärmeverschiebsystem)
- Polizei-SCR: 25 mbar (mit Wärmeverschiebsystem)

Dies sind Erfahrungswerte der Firmen Scheuch und CTP.

Bemerkung: Eine reine RTO wird kleiner dimensioniert und hat deshalb einen eher grösseren Druckwiderstand als eine DECONOX-Anlage für die gleiche Abluftmenge.

Reduktionsmittelmehrkosten: Die Berechnung des Mehrverbrauchs basiert auf der Annahme, dass die bestehenden SNCR-Systeme etwa im bisherigen Rahmen (Vorentstickung auf das Niveau des Ausgangszustandes) weiterbetrieben werden. Zur Reduktion der NO_x-Emissionen des Ausgangszustands auf das gemäss Szenario geforderte Niveau haben wir beim optimierten SNCR-Verfahren mit einem Stöchiometriefaktor von 1.75, beim SCR-Verfahren mit 1.0 gerechnet. Für die Kosten 25%iger Ammoniakwasserlösung haben wir 200 CHF/t eingesetzt.

Filterschlauchwechsel: Zur Minimierung des Staubeintrags in die DECONOX-Anlage erfolgt der Tausch der Filtertaschen zu 250'000 CHF im Mittel alle drei statt alle fünf Jahre.

Katalysatortausch: Gemäss Fa. Scheuch wird mit einer mittleren Standzeit von 10 Jahren gerechnet. Die Austauschkosten liegen bei 0.8 Mio. CHF.

Energiemehrverbrauch: Der Temperaturunterschied zwischen Ein- und Ausgang der DECONOX und RTO-Anlage, der durch Energiezufuhr gedeckt werden muss, beträgt typischerweise 30 °C. Im Idealfall kann diese Energiezufuhr durch CO erfolgen, das durch unvollständige Verbrennung im Drehrohrofen erzeugt wird. Dies hat aber zur Folge, dass die Energiezufuhr in den Drehrohrofen entsprechend erhöht werden muss. Da diese Energie durch günstige Sekundärenergie zugeführt werden kann, ist diese Lösung viel günstiger als eine Zufuhr von Primärenergie in die DECONOX- oder RTO-Anlage.⁷ Da unklar ist, ob die CO-Produktion im Drehrohr aus produktionstechnischen Gründen in ausreichendem Ausmass möglich sein wird, haben wir für die Berechnung der Energiemehrkosten angenommen, dass 30% der zusätzlich erforderlichen Wärmeenergie durch Primärenergie gedeckt werden muss (Richtwert Fa. Scheuch). Den Einfluss dieser Annahme analysieren wir anhand einer Sensitivitätsanalyse.

Ein weiterer Kostenpunkt ist der Preis der aus der Technologie resultierenden CO₂-Emissionen im Rahmen des Emissionshandelssystem (EHS). Wir verwenden einen EHS-Preis von 42.0 CHF/t CO₂.⁸

4.2.2. Zusammenfassung Ergebnisse

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse unserer Berechnungen, welche sich auf zwei Arten darstellen lassen:

- Gesamtkosten über einen Betrachtungszeitraum von 2021 bis 2041.⁹
- Jährliche Kosten nach Ablauf der Übergangsfrist (d.h. ab 2027).

Wir differenzieren zudem nach Investitionskosten und Betriebskosten.

⁷ Wir gehen für die Berechnungen von Kosten für Erdgas von 50 CHF/MWh und für HEL von 38 CHF/MWh aus. Die Kosten zur Befuerung des Drehrohrofens (in diesem Zusammenhang die Sekundärenergie) können gemäss den Aussagen eines Zementwerks vernachlässigt werden, weil die verwendeten Energieträger Kohle und alternativen Brennstoffe in der Summe quasi kostenneutral sind.

⁸ Dies entspricht dem aktuellen Auktionspreis (siehe <https://www.emissionsregistry.admin.ch/crweb/public/auction/dates.action?token=NSP412SEKOLWKM5CG636UXPH6YTWWCX>; Die Auktion vom 08.03.2021 resultierte in einem Preis von 39.25 €/tCO₂. Wie sich der Preis in Zukunft entwickelt, ist unklar. Die IEA und auch die Schweizer Energieperspektiven verwenden Szenarien mit stark unterschiedlichen Preisen (z.B. für die Jahre 2019-2040 von 28-43 USD/tCO₂ im Szenario WWB bzw. 28-140 USD/tCO₂ für das Szenario ZERO). Daher gehen wir in grober Näherung vereinfacht davon aus, dass der aktuelle Preis eine angemessene Berechnungsgrundlage ist (dafür spricht des Weiteren, dass Emissionsrechte kein Verfallsdatum haben).

⁹ Das Jahr 2041 ergibt sich aus der angenommenen Nutzungsdauer von 15 Jahren nach Ablauf der Übergangsfrist der LRV 2022 am 1.1.2027. Die Investitionskosten sind unabhängig vom Betrachtungszeitraum.

Tabelle 6: Kosten gegenüber Status quo

Kosten	Szenario LRV 2022	Szenario BV neu	Differenz LRV-BV
Gesamtkosten 2021-2041			
Investitionskosten	117 Mio. CHF	75 Mio. CHF	42 Mio. CHF
Betriebskosten	81 Mio. CHF	78 Mio. CHF	3 Mio. CHF
Total	198 Mio. CHF	153 Mio. CHF	45 Mio. CHF
Jährliche Kosten ab 2027			
Annualisierte Investitionskosten	7.6 Mio. CHF/a	4.6 Mio. CHF/a	3.0 Mio. CHF/a
Jährliche Betriebskosten	5.1 Mio. CHF/a	4.6 Mio. CHF/a	0.6 Mio. CHF/a
Total	12.7 Mio. CHF/a	9.2 Mio. CHF/a	3.5 Mio. CHF/a

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Angaben der sechs Schweizer Zementwerke.

Die Investitionskosten sind für LRV 2022 höher, weil fünf von sechs Werken für eine ausreichende NO_x-Reduktion eine katalytische Lösung (SCR oder DECONOX) vorsehen. Für die neue BV sehen hingegen nur zwei Werke eine katalytische Lösung vor. Bei drei Werken reichen RTO-Anlagen aus (welche primär aufgrund der Anforderungen an die VOC-Emissionen installiert werden).

Die Betriebskosten sind in beiden Szenarien ähnlich hoch, weil diese hauptsächlich vom Mehrverbrauch elektrischer Energie geprägt sind, welcher wiederum vom zusätzlichen Druckverlust abhängt. Da dieser bei der DECONOX-, RTO- und SCR-LD-Technologie etwa im gleichen Rahmen zunimmt, ergeben sich zwischen den beiden Szenarien keine wesentlichen Unterschiede.

Somit resultieren für LRV 2022 gegenüber der neuen BV Mehrkosten von 45 Mio. CHF über den Betrachtungszeitraum bzw. um 3.5 Mio. CHF pro Jahr.

Im Anhang A1 haben wir zwei Arten von Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Deren Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Eine Erhöhung des Primärenergieanteils lässt die Betriebskosten in beiden Szenarien zunehmen, für LRV 2022 jedoch in grösserem Ausmass, sodass sich die Kostendifferenz der beiden Szenarien erhöht.
- Eine Verkürzung bzw. Verlängerung der Nutzungsdauer erhöht bzw. senkt die annualisierten Investitionskosten in beiden Szenarien. Da die Gesamtinvestitionen für LRV 2022 höher sind, kommt dieser Effekt dort mehr zum Tragen, so dass mit abnehmender Nutzungsdauer die Differenz der jährlichen Kosten zwischen LRV 2022 und neuer BV steigt.

4.3. Nutzen

4.3.1. Methodik und Annahmen

Die Emissionen im Ausgangszustand (Status quo) entsprechen dem Mittelwert der Jahre 2018 bis 2020. Wir haben die Angaben übernommen, wie sie von den verschiedenen Werken an die Behörden kommuniziert wurden. (Bemerkung: Die NO_x-Jahresmittelwerte über alle sechs Werke betragen 2020: 365 mg/m³, 2019: 373 mg/m³; 2018: 371 mg/m³. Sie wurden in den letzten Jahren wie in der bestehenden BV vereinbart vermindert und sind auf diesem Niveau stabil. Deshalb haben wir als Ausgangszustand für alle Luftschadstoffemissionen jeweils das Mittel der letzten drei Jahre genommen.)

Die Reduktionsprognosen für die beiden Reduktionsszenarien berücksichtigen die Angaben der Werke. Diese haben wir aufgrund von Erfahrungswerten der Firmen Scheuch und CTP bei RTO- und DECONOX-Einsatz für VOC und Benzol auf 90% Abscheidung angepasst.

Als Emissionsfaktor für Strom haben wir den Lieferantenstrommix von 149.4 g CO₂eq/kWh angenommen.¹⁰

Für die Monetarisierung der Luftschadstoff-Emissionsverminderung haben wir die in Tabelle 7 aufgeführten Kostensätze verwendet. Die Quelle hierfür sind Angaben des deutschen Umweltbundesamts (UBA 2020). Wir haben diese Quelle ausgewählt, weil sie aktuell ist, Kostensätze für alle hier relevanten Schadstoffe enthält und — in Ermangelung Schweizer Kostensätze — die Verhältnisse in Deutschland denen der Schweiz relativ ähnlich sind (siehe auch Hilfestellung zu Monetarisierung in INFRAS 2020). Die Werte gemäss Originalquelle haben wir kaufkraftbereinigt (ausser für CO₂, siehe Legende der Tabelle). Zu beachten ist, dass diese Kostensätze mit hohen Unsicherheiten behaftet sind.

¹⁰ Quelle: Umweltbilanz Strommix Schweiz 2014, treeze Ltd, Dezember 2016.

Tabelle 7: Kostensätze und Auswirkungen der Schadstoffe

Schadstoff	Kostensatz [CHF/t]	Überblick Auswirkungen
NO _x	35'706	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Direkte Gesundheitsrisiken (z.B. Erkrankung der Atemwege, Reizung von Augen und Haut) ▪ Ökosysteme: Eutrophierung und Verlust von Biodiversität ▪ Vorläufersubstanzen für die Bildung saurer Niederschläge und sekundärer Aerosole (Feinstaub) ▪ Wichtige Vorläufersubstanzen für die Bildung von bodennahem Ozon (welches wiederum gesundheitsschädlich ist und zu vermindertem Pflanzenwachstum und Ernteaufällen führt)
VOC	4'139	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Überbegriff diverser organischer Stoffe mit stark unterschiedlicher Toxizität (unschädlich bis schädlich) ▪ Direkte Gesundheitsrisiken (z.B. Reizungen, Atemwegserkrankungen bis hin zu Krebserkrankungen) ▪ Geruchsbelästigungen ▪ Vorläufersubstanzen von bodennahem Ozon (siehe auch NO_x)
Benzol	nicht monetarisiert	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ein VOC ▪ Diverse Gesundheitsrisiken (führt bei langfristiger Aufnahme zu Schädigungen der inneren Organe und des Knochenmarks. Abbauprodukte im Körper sind teils krebserregend)
PM ₁₀	87'466	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Direkte Gesundheitsrisiken (z.B. Erkrankungen der Atemwege und Blutgefässe, erhöhte Thromboseneigung oder Veränderungen des vegetativen Nervensystems (Herzfrequenzvariabilität)) ▪ Gebäude- und Materialschäden
SO _x	30'289	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Potenziell¹¹ direkte Gesundheitsrisiken (Reizung der Schleimhäute und Augen, Atemwegsprobleme) ▪ Ökosysteme: Versauerung von Böden und Gewässern
NH ₃	66'229	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ökosysteme: Eutrophierung mit entsprechenden Folgen für Ökosysteme, Versauerung von Böden, direkte Schädigung von Pflanzen
CO ₂	209*	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Führt zu Klimawandel mit vielfältigen globalen und langfristigen Auswirkungen

*) Der CO₂-Wert ist nicht kaufkraftbereinigt, da Klimaschäden global anfallen und die erhöhte Kaufkraft in dem UBA-Wert mittels «Equity Weighting» schon berücksichtigt ist (siehe UBA 2020, Seite 8).

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle:

Kostensatz in €/t gemäss UBA 2020, Tabelle 5; für Gesundheitsschäden wurde die folgende Kategorie gewählt: Verbrennungsprozesse in der Industrie, Stadt, Kaminhöhe 20-100 Meter.

Value Transfer: Für die Umrechnung der deutschen Werte auf Schweizer Verhältnisse wurde eine Kaufkraft-Bereinigung mit dem Faktor 1.682 durchgeführt¹² sowie eine Wechselkurs-Korrektur mit dem Faktor 1.071 CHF/€¹³.

Auswirkungen: Auf Basis von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick>

Für die Berechnung verwenden wir folgenden Annahmen:

Bei einzelnen Werken ist wegen gesteigertem Einsatz von Sekundärbrennstoffen mit einer um 5 bis 10% höheren spezifischen Abluftmenge pro Tonne Klinker zu rechnen. Da davon

¹¹ Konzentrationsgrenzwerte werden heute nahezu flächendeckend eingehalten

¹² Gemäss https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/prc_ppp_ind/default/table?lang=de

¹³ Gemäss https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ert_bil_eur_a&lang=en

auszugehen ist, dass die NO_x-Konzentration im Kamin weiterhin auf einem durch den Grenzwert vorgegebenen Konzentrations-Zielwert gehalten werden, ergibt sich bei diesen Werken eine 5 – 10%ige Zunahme der NO_x-Fracht. Weiter setzen wir für alle Luftschadstoffparameter voraus, dass sich deren Emissionen ohne zusätzliche Minderungsmaßnahmen proportional zur Klinkermenge entwickeln würden.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Emissionsreduktionen der einzelnen Luftschadstoffemissionen in Abhängigkeit der eingesetzten Reduktionstechnologie aufgeführt. Mit diesen Werten haben wir die Berechnungen durchgeführt.

Tabelle 8: Annahmen Emissionsverminderung

Schadstoff	Annahmen Reduktion je angewandter Technologie und je Szenario		Kommentar
	Szenario LRV 2022	Szenario neue BV	
NO _x	Emissionsniveau von je nach Werk entweder 180 oder 190 mg/m ³	Emissionsniveau von 195 mg/m ³	In allen Werken und Szenarien erlauben die neuen Technologien ein bestimmtes Emissionsniveau anzusteuern: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Für LRV 2022: 10-20 mg/m³ Sicherheitsabstand zum Grenzwert der LRV 2022, um Vorgaben gemäss Art. 15 Abs. 4 LRV zu garantieren. ▪ Für neue BV: 5 mg/m³ Sicherheitsabstand zum Grenzwert der neuen BV
SO _x	Unverändert		Für beide Szenarien: Für ein Werk Reduktion, sodass der Grenzwert immer gerade eingehalten wird
Staub	Für DECONOX: 20% Sonst unverändert	Unverändert	Reduktion DECONOX wegen häufigerem Filterwechsel ¹⁴
VOC	DECONOX, RTO: 90% SCR: 40% Sonst unverändert		Vor allem die RTO-Technologie (die auch Bestandteil von DECONOX ist) führt zu einer wesentlichen Reduktion
Benzol	DECONOX, RTO: 90% SCR: 40% Sonst unverändert		Siehe VOC.
NH ₃	DECONOX: 60% RTO: 40%		-
	SCR: 60%	P-SCR: 50%	

Tabelle INFRAS/Neosys.

Wichtig beim Vergleich der beiden Szenarien ist zudem, dass die Kombination aus RTO und Optimierung der bestehenden SNCR-Anlage zwar für viele Werke ausreicht, um die geforderten

¹⁴ Zur Minimierung der Staubablagerungen in den Keramikwaben und dadurch des Unterhaltsaufwands.

Jahresmittel zu erreichen (die geforderten Jahresmittel sind in beiden Szenarien nach der Übergangsphase zumeist identisch). Die Kombination aus RTO und optimierter SNCR stellt aber gemäss Angaben der Werke nicht sicher, dass auch die Stunden- und Tagesmittelwerte der LRV 2022 eingehalten werden können.

4.3.2. Zusammenfassung Ergebnisse

Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse unserer Berechnung für die beiden Szenarien. Gezeigt sind die Reduktionen der Schadstoffe (absolut und relativ gegenüber dem Status Quo) und der monetarisierte jährliche Nutzen nach Ablauf der Übergangsfrist der LRV 2022 (d.h. ab 2027). NO_x-Reduktionen leisten mit Abstand den grössten monetären Beitrag. Es folgen NH₃, SO_x, VOC und PM10. Relativ betrachtet werden vor allem die Schadstoffe VOC, Benzol, NH₃, NO_x in erheblichem Umfang reduziert.

Wir haben den monetarisierten Nutzen in verschiedene Bereiche gemäss UBA 2020 aufgeteilt. Der weitaus grösste Nutzen resultiert aus der Reduktion von NO_x im Bereich Gesundheit. Für CO₂ ist eine solche Aufteilung nicht möglich.

Die Tabellen zeigen in der rechten Spalte zudem den gesamten Nutzen über den Betrachtungszeitraum 2021–2041.¹⁵ Es zeigt sich, dass — auf diese Weise aggregiert — die neue BV einen höheren Nutzen aufweist (16 Mio. CHF), obwohl deren jährlicher Nutzen ab 2027 geringer ist. Der Grund ist, dass die Branchenvereinbarung in der Übergangsphase bis 2027 eine raschere Umsetzung der Massnahmen vorsieht und somit in dieser Zeit der Umweltnutzen höher ist als für LRV 2022 (siehe auch Abbildung 5). Ab dem Jahr 2045 übersteigt der Nutzen der LRV 2022 dann den Nutzen der neuen BV.

Der Nutzen der LRV 2022 ist im Vergleich der beiden Szenarien ab 2027 um ca. 3.4 Mio. CHF pro Jahr höher, weil alle Schadstoffe etwas stärker reduziert werden. Allerdings sind auch die CO₂-Emissionen für LRV 2022 etwas höher, weil im Vergleich zur neuen BV ein zusätzliches Werk eine DECONOX bzw. eine RTO-Anlage vorsieht. Die CO₂-Mehremission rührt vom zusätzlichen Energiebedarf dieser Anlagen.

¹⁵ Wir haben das Jahr 2041 als Ende gewählt, weil wir von einer Nutzungsdauer von 15 Jahre ausgehen und die letzten Massnahmen 2027 umgesetzt werden.

Tabelle 9: Szenario LRV 2022: Nutzen gegenüber Status Quo

Schadstoff	Emissionsreduktion [t/a]	Relative Reduktion ab 2027	Jährlicher Nutzen ab 2027					Gesamter Nutzen 2021–2041 [Mio. CHF]
			Monetarisierter Nutzen [Mio. CHF/a]					
			Gesundheit	Biodiversität	Ernteschäden	Materialschäden	Gesamt	
NO _x	1'335	50%	38.7	6.6	2.0	0.3	47.7	758
VOC	204	79%	0.5	0.0	0.4	0.0	0.8	14.6
PM10	1.6	12%	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	2.1
SO _x	37.5	7%	1.0	0.1	0.0	0.0	1.1	19.8
NH ₃	91.2	59%	4.1	2.0	0.0	0.0	6.0	101
Benzol	13.3	78%	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
CO ₂	-9'540	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-2.0	-32
Total	n.a.	n.a.	44.4	8.6	2.4	0.4	53.8	863

n.a.: Nicht anwendbar, da keine Werte verfügbar.

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Angaben der sechs Schweizer Zementwerke.

Tabelle 10: Szenario neue BV: Jährlicher Nutzen gegenüber Status quo

Schadstoff	Emissionsreduktion [t/a]	Relative Reduktion	Jährlicher Nutzen ab 2027					Gesamter Nutzen 2021–2041 [Mio. CHF]
			Monetarisierter Nutzen [Mio. CHF/a]					
			Gesundheit	Biodiversität	Ernteschäden	Materialschäden	Gesamt	
NO _x	1'285	48%	37.2	6.4	2.0	0.3	45.9	799
VOC	176	68%	0.4	0.0	0.3	0.0	0.7	12.8
PM10	0.1	1%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
SO _x	17.9	3%	0.5	0.0	0.0	0.0	0.5	10.9
NH ₃	70.1	46%	3.2	1.5	0.0	0.0	4.6	78.9
Benzol	10.7	62%	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
CO ₂	-6'854	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-1.4	-22.4
Total	n.a.	n.a.	41.3	7.9	2.3	0.3	50.4	879

n.a.: Nicht anwendbar, da keine Werte verfügbar.

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Angaben der sechs Schweizer Zementwerke.

4.4. Nicht monetarisierte Aspekte

Wir konnten im Rahmen dieser Studie nicht alle Aspekte monetarisieren, die für die umfassende Beurteilung der Szenarien relevant sind. Um solche Aspekte trotzdem zu berücksichtigen, erläutern wir diese im Folgenden kurz und geben eine qualitative Einschätzung des möglichen Einflusses.

4.4.1. Alternative Roh- und Brennstoffe

Um die CO₂-Emissionen zu reduzieren und um Betriebskosten einzusparen, planen die Zementwerke in Zukunft, alternative Roh- und Brennstoffe vermehrt und in grösserer Vielfalt einzusetzen.¹⁶ Teilweise haben die Werke bereits entsprechende Investitionen getätigt (z.B. zur Lagerung von kontaminiertem Erdreich oder zum Ofenumbau). Der Einsatz ist durch die Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) geregelt.

Alternative Roh- und Brennstoffe sind heterogen, sodass deren Verwendung zu schwankenden — und im Mittel höheren — Schadstoffemissionen im Rohgas führt. Dies gilt insbesondere für den Schadstoff VOC. Die Schwankungen können beispielsweise erschweren, die Vorgaben bezüglich Stunden- und Tagesmittel der LRV zu erfüllen. Eine LRV-konforme Verwendung von alternativen Roh- und Brennstoffen ist daher ein Grund, warum Werke in Minderungstechnologien investieren. Ob weitere Investitionen in neue Technologien für den geplanten Ausbau der Verwendung von alternativen Roh- und Brennstoffen bereits aufgrund der heute bestehenden LRV-Vorgaben nötig wären, haben wir im Rahmen dieser Studie nicht näher analysiert. Es ist aber nicht auszuschliessen, dass die Werke gewisse Investitionen auch im Referenzfall getätigt hätten und somit die Kosten der Szenarien um diese «Sowiesokosten» gesenkt werden müssten.

Es war uns allerdings im Rahmen dieser Studie nicht möglich, diesen Aspekt näher zu analysieren. Dies hat keine Auswirkungen auf den Kostenunterschied der beiden Szenarien, da die «Sowiesokosten» jeweils gleich sind. Ein Unterschied zwischen den Szenarien würde nur bestehen, falls die eingesetzten Technologien verschiedene Typen und Mengen im Einsatz alternativer Roh- und Brennstoffe erlauben würden und damit unterschiedliches Einsparpotential hätten. Diese Frage wurde nicht weiterverfolgt.

4.4.2. Regionale Unterschiede

Tabelle 11 zeigt die Verteilung der sechs Schweizer Zementwerke auf Kantone und Unternehmen.

¹⁶ Im Einkauf sind alternative Roh- und Brennstoffe billiger als reguläre Roh- und Brennstoffe. Teilweise erhalten die Zementwerke auch Geld für deren Entsorgung. So geben zwei Werke an, dass, falls sie nicht in die neuen Technologien investieren, jährliche Mehrkosten von je 1 Million CHF anfallen würden, weil Rohmaterialersatzstoffe nicht im vorgesehenen Rahmen eingesetzt werden könnten.

Der Einsatz von alternativen Rohstoffen fördert zudem die Kreislaufwirtschaft, schont Deponieraum und vermindert CO₂-Emissionen.

Tabelle 11: Zementwerke: Standortkanton und Unternehmen

Werkstandort	Standortkanton	Unternehmen
Untervaz	Graubünden	Holcim (Schweiz) AG
Eclépens	Waadt	Holcim (Schweiz) AG
Siggenthal	Aargau	Holcim (Schweiz) AG
Wildeggen	Aargau	Jura-Cement-Fabriken AG
Cornaux	Neuenburg	Jura-Cement-Fabriken AG
Vigier	Bern	Vigier Ciment

Tabelle INFRAS/Neosys.

In den Standortkantonen wird sich aufgrund der Massnahmen die Luftqualität in beiden Szenarien verbessern, da jeweils verbesserte Technologien zum Einsatz kommen.

Für LRV 2022 erwarten wir, dass in allen Werken — und somit in allen betroffenen Regionen — die relativen Reduktionen in etwa gleich hoch ausfallen, da die Vorgaben der LRV je Werk gelten.

Die neue BV gilt hingegen nur im Branchenmittel. Da sich die Unternehmen gemäss cemsuisse untereinander nicht koordinieren, gilt die BV de facto pro Unternehmen. Somit haben die drei Werke der Holcim (Schweiz) AG sowie die beiden Werke der Jura-Cement-Fabriken AG die Möglichkeit, Emissionsreduktionen aufeinander abzustimmen. Dies könnte dazu führen, dass in einem Werk die Ziele übererfüllt werden, während in einem anderen die Ziele nicht erfüllt werden (Kompensation).¹⁷ Die jeweiligen Regionen würden dann unterschiedlich von den Massnahmen profitieren.¹⁸ Aufgrund der Tatsache, dass alle Werke den Einsatz neuer Technologien planen, gehen wir aber davon aus, dass es zu keinen signifikanten regionalen Unterschieden kommt.

4.4.3. Opportunitätskosten

Die von den Werken getätigten Investitionen verursachen substanzielle Kosten. Verringert sich dadurch die Liquidität der Werke, könnten investive Massnahmen an anderer Stelle zurückgestellt werden und sich somit in anderen Bereichen negative Auswirkungen ergeben. Wir haben diesen Aspekt nicht vertieft. Für die Bereiche Umwelt- und Klimaschutz erwarten wir allerdings keine relevanten Effekte, da jeweils regulatorische Anforderungen bestehen, und sich die Opportunitätseffekte somit nur auf allfällige freiwillige Übererfüllungen auswirken würden.

¹⁷ So zeigt eine Analyse der bisherigen NOx-Emissionen pro Werk, dass die Unternehmen mit mehreren Werken von der Möglichkeit der Kompensation Gebrauch machen. Allerdings wurden die Branchen-Zielfrachten in einzelnen Werken nur um ca. 10% überschritten.

¹⁸ Besonders relevant sind diese Überlegungen für den Kanton Aargau, da dieser zwei Zementwerke hat. Theoretisch könnten sowohl in Siggenthal als auch in Wildeggen mehr oder weniger Emissionen reduziert werden als dies die Branchenvereinbarung impliziert.

Die von den Werken getätigten Investitionen verursachen substantielle Kosten, welche Einfluss auf die operativen Entscheide zur Folge haben. Die finanziellen Möglichkeiten der Werke sind limitiert, aufgrund dessen könnten Massnahmen an anderer Stelle zurückgestellt werden und sich somit in anderen Bereichen negative Auswirkungen ergeben. Wir haben diesen Aspekt nicht vertieft. Für die Bereiche Umwelt- und Klimaschutz erwarten wir allerdings keine relevanten Effekte, da jeweils regulatorische Anforderungen bestehen.

4.4.4. Weitere Treibhausgasemissionen

Die Schweizer Zementwerke emittieren rund 47 Tonnen Lachgas (N₂O) pro Jahr¹⁹ sowie rund 23 Tonnen Methan (CH₄) pro Jahr²⁰. Diese verursachen einen Klimaschaden von 3.0 Mio. CHF pro Jahr.²¹ Lachgas- als auch Methan-Emissionen können durch RTO-Anlagen erheblich reduziert werden. Daher könnte der Einbezug weiterer Treibhausgasemissionen den Nutzen der Szenarien um maximal diese bisherigen Schäden steigen lassen. Methan ist ein VOC und sollte daher in ähnlichem Ausmass zerstört werden können wie VOC (80% für LRV 2022 und 70% für die neue BV). Für Lachgas ist unklar, inwiefern die geplanten Betriebsbedingungen geeignet sind, dieses effektiv zu zerstören.

Da die Emissionsdaten sehr unsicher sind, haben wir diese Zahlen nicht in die Analyse einfließen lassen.²² Beide Szenarien setzen die RTO-Technologien ungefähr im selben Umfang ein, sodass wir davon ausgehen, dass die Berücksichtigung der weiteren Treibhausgase den Vergleich beider Szenarien nicht wesentlich ändern würde.

4.4.5. Emissionshandelssystem

Die Zementwerke sind Teil des Emissionshandelssystems (EHS), welches in seiner Gesamtheit durch ein Cap begrenzt ist. CO₂-Mehremissionen der beiden Szenarien würden daher innerhalb der Systemgrenze EHS im Prinzip dazu führen, dass in einem beliebigen EHS-Unternehmen die Emissionen im gleichen Umfang reduziert werden müssen, um das Cap einzuhalten. In dieser Studie gehen wir nicht von einem Cap aus und ziehen die von den Technologien induzierten zusätzlichen CO₂-Schadenskosten vom Nutzen ab, da wir auf die Systemgrenze Zementwerk fokussieren. Ein Einbezug dieses Effekts würde den Nutzen beider Szenarien erhöhen (für LRV 2022 etwas mehr).

¹⁹ Das BAFU hat uns Messungen vom Dezember 2020 zu Lachgas-Emissionsfaktoren aller Zementwerke zur Verfügung gestellt. Zusammen mit Daten zu Betriebsstunden haben wir berechnet, dass die Zementwerke insgesamt rund 47 Tonnen Lachgas pro Jahr emittieren.

²⁰ Angabe BAFU auf Basis Emissionsinventar (Submission 2021).

²¹ Eine Tonne Lachgas entspricht 298 t CO₂ Äquivalenten. Eine Tonne Methan entspricht 25 t CO₂ Äquivalenten. Die Emissionen entsprechen daher 14'500 tCO₂-Äquivalenten, welche mit dem Kostensatz von CO₂ monetarisiert werden können.

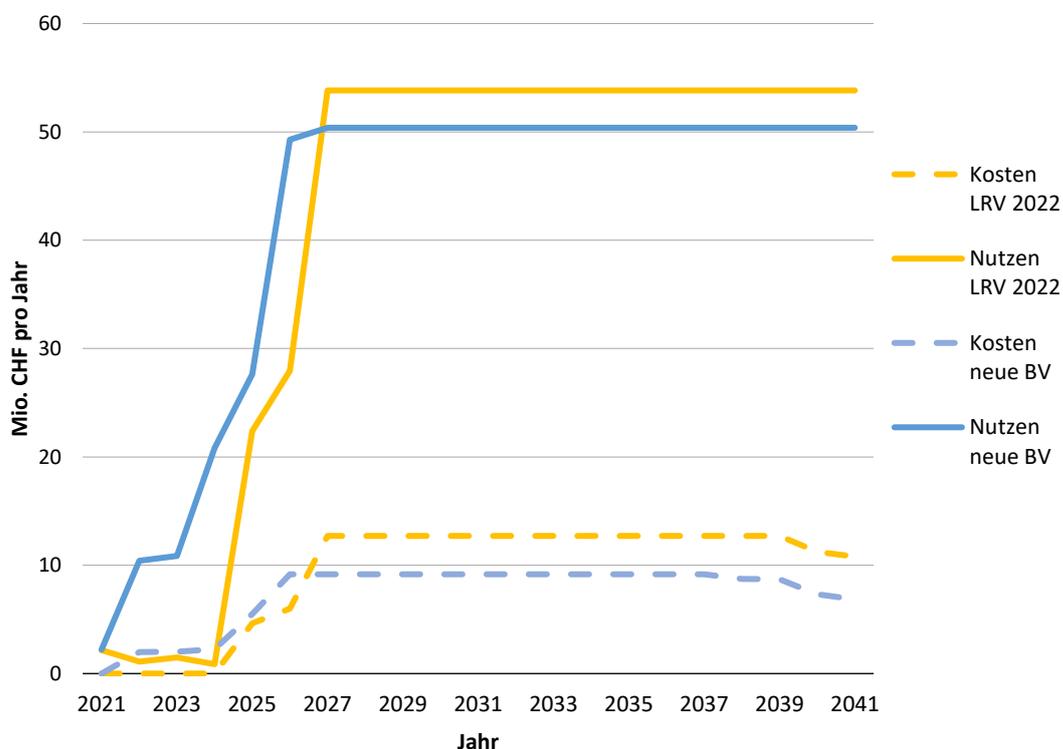
²² Lachgasemissionen basieren auf einmaligen Spotmessungen und es ist unklar, wie heterogen diese Emissionen im Zeitverlauf sind. Methanemissionen basieren auf der Annahme, dass diese 10% der VOC-Emissionen ausmachen (Expertenschätzung).

5. Synthese und Folgerungen

5.1. Übersicht Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt Kosten und Nutzen im Zeitverlauf. Während für LRV 2022 die neuen Grenzwerte aufgrund der Übergangsfrist von fünf Jahren erst ab 2027 eingehalten werden müssen, sieht die neue BV schon vorab einen Absenkpfad vor (siehe Kapitel 2.3). Für die neue BV steigt der Nutzen in der Übergangsphase 2021 bis 2027 daher schneller an. Erst ab dem Jahr 2027 manifestiert sich der Endzustand über die nächsten Jahre (siehe Tabelle 12). Ab 2027 liegt der Nutzen der LRV 2022 um ca. 3.4 Mio. CHF pro Jahr höher. Gleichzeitig liegen die jährlichen Kosten der LRV 2022 um 3.5 Mio. CHF höher als jene der BV. In der Endphase sinken die jährlichen Kosten, da vereinzelte Technologien das Ende der initialen Nutzungsdauer erreichen und der dann nötige Ersatz geringere Investitionen aufweist.

Abbildung 5: Verlauf jährliche Kosten und Nutzen



Die Abbildung weist für beide Szenarien bereits für das Jahr 2021 einen Nutzen aus, obwohl dort noch keine Investitionen getätigt wurden. Zudem sinkt der Nutzen des LRV 2022 Szenarios in den Folgejahren leicht ab. Beide Effekte sind nicht realistisch und liegen daran, dass die Methodik unseres Excel-Berechnungstool auf grosse Änderungen fokussiert. Diese Verzerrungen in der Anfangsphase haben aber keine Auswirkungen auf die Ergebnisse und wurden daher nicht korrigiert.

Grafik INFRAS/Neosys

Das Szenario LRV 2022 vermindert mehr lokale Luftschadstoffemissionen pro Jahr als die neue BV. Daher ist der jährliche Nutzen ab dem Jahr 2027 von LRV 2022 um ca. 3.4 Mio. CHF höher (siehe Tabelle 12). Dieser Unterschied ist primär von den NO_x-Emissionsvermindierungen getrieben, welche für LRV 2022 um 3.9% höher sind. Der Grund ist unsere Annahme, dass die Werke für LRV 2022 eine höhere Sicherheitsmarge gegenüber dem Grenzwert einhalten als für die neue BV (Einhaltung im Tages- und Stundenmittel vs. im Jahresmittel).

Tabelle 12: Jährliche Nutzen ab 2027 gegenüber Status quo

Schadstoff	Szenario LRV 2022		Szenario neue BV		Unterschied LRV 2022 - neue BV [Mio. CHF/a]
	Emissionsreduktion [t/a]	Monetarisierter Nutzen [Mio. CHF/a]	Emissionsreduktion [t/a]	Monetarisierter Nutzen [Mio. CHF/a]	
NO _x	1'335	47.7	1'285	45.9	1.8
VOC	204	0.8	176	0.7	0.1
PM10	1.6	0.1	0.1	0.0	0.1
SO _x	37.5	1.1	17.9	0.5	0.6
NH ₃	91.2	6.0	70.1	4.6	1.4
Benzol	13.3	-	10.7	-	-
CO ₂	-9'540	-2.0	-6'854	-1.4	-0.6
Total	-	53.8	n.a.	50.4	3.4

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Angaben der sechs Schweizer Zementwerke.

Tabelle 13 erweitert diesen Vergleich einerseits um die Kosten der beiden Szenarien. So sind die jährlichen Kosten für LRV 2022 um rund 3.5 Mio. CHF höher als für die neue BV. Über den Betrachtungshorizont 2021 bis 2041 liegen die kumulierten Kosten für LRV 2022 um rund 45 Mio. CHF höher. Ein Grossteil des Unterschieds entfällt jeweils auf die Investitionskosten, während die Szenarien ähnlich hohe Betriebskosten verursachen. Die Tabelle zeigt zudem den kumulierten Nutzen über den Betrachtungshorizont. Da die neue BV früher implementiert wird, weist sie in der Summe einen um 16 Mio. CHF höheren Nutzen auf, obwohl der jährliche Nutzen ab 2027 tiefer liegt (siehe auch Abbildung 5).

Um eine umfassende Entscheidungsgrundlage für die Wahl des Szenarios zu ermöglichen, fasst Tabelle 13 diejenigen Aspekte zusammen, die im Rahmen dieser Studie thematisiert, aber nicht monetarisiert wurden. Relevante Unterschiede ergeben sich im ordnungspolitischen Bereich, bei der Einsatzmöglichkeit alternativer Roh- und Brennstoffe (der allfällige Unterschied zwischen den Szenarien wurde allerdings nicht vertieft analysiert), im zeitlichen Verlauf der erlaubten Emissionen und in der Dringlichkeit auf Betriebsstörungen zu reagieren.

Tabelle 13: Vergleich der Szenarien anhand diverser Aspekte

	Szenario LRV 2022	Szenario neue BV	Unterschied LRV 2022 - neue BV
Monetarisierete Aspekte			
Kosten und Nutzen pro Jahr ab 2027 [Mio. CHF/a]			
Annualisierte Investitionskosten	7.6	4.6	3.0
Jährliche Betriebskosten	5.1	4.6	0.6
Total Kosten	12.7	9.2	3.5
Total Nutzen	53.8	50.4	3.4
Kosten und Nutzen über Betrachtungshorizont 2021-2041 [Mio. CHF]			
Investitionskosten	117	75	42
Betriebskosten	81	78	3
Total Kosten	198	153	45
Total Nutzen	863	879	-16
Nicht monetarisierte Aspekte			
Ordnungspolitik	Rechtliche Sanktionsmöglichkeiten Bund	Bindende Vereinbarung zwischen Kantonen und Unternehmen	Rechtliche Unterschiede
Alternative Roh- und Brennstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wahl der Technologien in Szenarien wird auch von geplantem Einsatz Alternative Roh- und Brennstoffe beeinflusst (v.a. bezüglich VOC). ▪ Gewisse «Sowiesoinvestitionen» würden auch in Referenz anfallen. 		Unbekannt
Zeitlicher Verlauf der erlaubten Emissionen und Bezug zu Immissionsgrenzwerten	Tiefere Wahrscheinlichkeit von Emissionsspitzen wegen Grenzwert im Stunden- und Tagesmittel	Höhere Wahrscheinlichkeit von Emissionsspitzen	Mittel
Zeitnahes Handeln bei Betriebsstörungen	Erforderlich, um LRV-Vorgaben zu erfüllen	Kein zeitnaher Handlungsbedarf wegen Jahresmittel	Mittel
Regionale Unterschiede	Keine, da Vorgaben pro Werk	Vorgaben pro Unternehmen: Regionen könnten unterschiedlich von Verschärfungen profitieren.	Gering
Opportunitätskosten	Kosten verringern die finanziellen Möglichkeiten der Werke an anderer Stelle und können so dazu führen, dass Massnahmen zurückgestellt werden.		Gering
weitere Treibhausgase CH ₄	Aufgrund RTOs Emissionsreduktion um 80%	Aufgrund RTOs Emissionsreduktion um 70%	Gering
weitere Treibhausgase N ₂ O	Substanzielle Reduktion möglich	Substanzielle Reduktion möglich	Unbekannt
Benzol	Emissionsreduktion um 80%	Emissionsreduktion um 60%	Gering

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Angaben der sechs Schweizer Zementwerke.

5.2. Würdigung der Ergebnisse

Beide Szenarien vermindern lokale Schadstoffemissionen in erheblichem Umfang und generieren so einen hohen Umweltnutzen, der die Kosten der Minderungsmaßnahmen um ein Vielfaches übersteigt.²³ Beide Szenarien haben daher ein klar positives Kosten-Nutzen-Verhältnis und sind also effizient. Wir empfehlen, eines der beiden Szenarien umzusetzen.

Im Vergleich beider Szenarien sind die monetarisierten Zusatzkosten des Szenarios LRV 2022 im Vergleich zur neuen BV ähnlich hoch wie der monetarisierte Zusatznutzen (3.5 Mio. CHF bzw. 3.4 Mio. CHF). Bei der neuen BV steigt der Nutzen in der Übergangsphase 2021 bis 2027 schneller an und erst ab dem Jahr 2027 manifestiert sich der Endzustand über die nächsten Jahre. Ab dann liegt der Nutzen der LRV 2022 um ca. 3.4 Mio. CHF pro Jahr höher. Gleichzeitig liegen die jährlichen Kosten der LRV 2022 um 3.5 Mio. CHF höher als jene der BV.

Welches Szenario umgesetzt werden sollte, hängt vor allem auch davon ab, wie die oben ausgeführten nicht-monetären Aspekte gewichtet werden. Diese Entscheidung ist nicht Teil dieser Studie.

Wie bereits in Kapitel 4.1 ausgeführt, ist die Wahl der Technologien je Szenario die zentrale Annahme im Hinblick auf den Kostenunterschied der beiden Szenarien. In unserer Studie konnte nicht abschliessend geklärt werden, inwiefern es die Vorgaben zu Art. 15 Abs. 4 LRV tatsächlich nötig machen, in der LRV 2022 gegenüber der neuen BV auf teurere Technologien zu setzen. Dies hat v.a. auch mit der Risikobereitschaft der Werke zu tun, da teurere Technologien das Risiko senken, die Tages- und Stundenmittel zu überschreiten. Unsere Ergebnisse beruhen auf den Aussagen der Werkbetreiber, welche wir plausibilisiert haben. So resultieren die höheren Kosten im LRV 2022 Szenario vor allem daher, dass dort mehr (teurere) DECONOX-Anlagen statt RTO-Anlagen geplant sind. Auf die NO_x-Emissionen im Jahresmittel hat diese Wahl allerdings nur beschränkte Auswirkungen, da mit beiden Technologien die Jahresfrachten weitgehend erreicht werden können. Für die Wahl der Technologien ist zudem entscheidend, dass sie den Werken in dem jeweiligen Szenario erlauben, vermehrt alternative Roh- und Brennstoffe zu verwenden.

5.3. Optimierungsmöglichkeiten

Wir haben eine Reihe von Möglichkeiten identifiziert, die Umsetzung zu optimieren. Diese sind als Anregungen zu interpretieren. Die konkrete Ausgestaltung und deren Auswirkungen haben wir nicht analysiert.

- Kombination (beide Szenarien): Die Revision der LRV könnte parallel zu einer neuen BV erfolgen. So könnte die neue BV wie geplant umgesetzt werden und die LRV eine parallele

²³ Da Kostensätze mit hohen Unsicherheiten behaftet sind, ist die Monetarisierung des Nutzens generell mit Vorsicht zu interpretieren. Im vorliegenden Fall ist diese Aussage aber robust, da der monetarisierte Nutzen klar höher ist.

Verschärfung der Grenzwerte vorsehen, allerdings ohne zusätzliche Anforderungen gegenüber der neuen BV (z.B. keine Vorgaben zu Tages- und Stundenmittel). Diese gewollte Redundanz ermöglicht einen Einbezug des Bunds und speziell die Möglichkeit, eine Zielverfehlung zu sanktionieren.

- Subvention Betriebsmehrkosten (beide Szenarien): Unsere Analyse zeigt, dass die Werke das Potenzial der neuen Technologien allenfalls nicht voll ausschöpfen, sondern Emissionen nur bis zum jeweiligen Grenzwert bzw. Ziel reduzieren, um so Betriebskosten (für Reduktionsmittel) zu sparen. Wir schätzen, dass in vielen Fällen der zusätzliche Nutzen einer maximal möglichen Emissionsreduktion die Betriebsmehrkosten klar übersteigen würde. Um eine volkswirtschaftlich effiziente Lösung zu erreichen, könnten die Unternehmen für die Betriebsmehrkosten, die für eine Übererfüllung anfallen, entschädigt werden.
- Tages- und Stundenmittel (LRV 2022): Die Vorgaben gemäss Art. 15 Abs. 4 LRV bezüglich der Tages- und Stundenmittel veranlassen die Werke, für LRV 2022 teurere Technologien umzusetzen, obschon dies — bei jetziger Umsetzungsplanung (siehe erster Punkt) — nur geringe Auswirkungen auf die Jahresfracht hat. Es wäre zu überlegen, inwiefern die Vorgaben zu Tages- und Stundenmittel — unter der Prämisse eines gleichbleibenden Nutzens — entschärft werden könnten, um so die Investitionskosten zu senken (siehe auch Vertiefungsbedarf in Kapitel 5.4).
- Optimierung Übergangsfrist (LRV 2022): Die Umsetzungszeiten, welche die Werke für die neue BV angegeben haben, lassen es prüfenswert erscheinen, die in der LRV vorgesehene Übergangsfrist von fünf Jahren allenfalls zu verkürzen, falls hier technischer Spielraum besteht, um im Szenario LRV 2022 eine schnellere Reduktion der Emissionen zu erreichen.
- Ziele auch pro Werk (neue BV): Um regional unterschiedliche Emissionsreduktionen in der neuen BV zu minimieren, könnten zusätzliche Ziele pro Werk vorgesehen werden, die sich — mit einem gewissen Spielraum — an dem Branchenmittel orientieren. Dies würde zudem Vorteile von Unternehmen mit mehreren Werken gegenüber den anderen Unternehmen reduzieren.

5.4. Vertiefungsbedarf

Zum Abschluss der Studie sehen wir potenziellen Vertiefungsbedarf z.B. bei folgenden Fragestellungen:

- Welche Wirkung haben Stunden- und Tagesgrenzwerte vs. Jahresgrenzwerte? Inwiefern beeinflussen Stunden- und Tagesgrenzwerte neben den kurzzeitigen Spitzen auch die Jahresmittelwerte?
- Welchen (unterschiedlichen) Nutzen haben die beiden Szenarien für den Ausbau der Verwendung von alternativen Roh- und Brennstoffen?

- Welche Auswirkungen hätte es, Zementwerke von Art. 15 Abs. 4 LRV auszunehmen (Kosten und Immissionswirkung aber auch Konsequenzen eines Präzedenzfalls)?

5.5. Bezug zu RFA-Prüfpunkten und Nachhaltigkeitszielen

Bezug zu RFA-Prüfpunkten

Tabelle 14 gibt eine Übersicht über die Prüfpunkte einer Regulierungsfolgeabschätzung (RFA), welche auch in einer VOBÜ abgedeckt werden sollen.

Tabelle 14: RFA Prüfpunkte

RFA Prüfpunkt	Wo behandelt?	Kommentar
1) Notwendigkeit und Möglichkeit staatlichen Handelns	Kapitel 2.4 und Kapitel 5.2	Die positive Bilanz des Nutzens gegenüber den Kosten bildet eine Legitimation für staatliches Handeln: Eines der beiden Szenarien sollte umgesetzt werden.
2) Alternative Handlungsoptionen	Kapitel 5.3	Es bestehen eine Reihe von Möglichkeiten, die Szenarien zu optimieren bzw. zu kombinieren.
3) Auswirkungen auf die einzelnen gesellschaftlichen Gruppen	Siehe Tabelle 4, W1, W2, W3 und W5 der VOBÜ-Kriterien. Zu Unternehmen siehe vor allem Kapitel 4.	Relevante Auswirkungen auf Unternehmen (W1) Keine relevanten Auswirkungen auf Haushalte, Arbeitnehmende oder die öffentliche Hand (W2, W3 und W5)
4) Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft	Siehe Tabelle 4, W5 der VOBÜ-Kriterien sowie Kapitel 5.1	Beide Szenarien haben ein vorteilhaftes Kosten-Nutzen-Verhältnis
5) Zweckmässigkeit im Vollzug	Siehe Kapitel 3.3.	Die Szenarien bewirken keine relevanten Änderungen und sind daher diesbezüglich zweckmässig.

Tabelle INFRAS/Neosys.

Bezug zur Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung

Die Agenda 2030 ist ein rechtlich unverbindliches internationales Referenzsystem für nachhaltige Entwicklung. Durch dieses haben sich die Mitgliedsstaaten der UNO 2016 gemeinsam dazu verpflichtet, bis 2030 die Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) zu erreichen. Die Agenda 2030 dient daher auch als Bewertungsrahmen für politische Entscheidungen in der Schweiz.

Tabelle 15 zeigt, dass die Massnahmen der beiden Szenarien vor allem eine Wirkung auf die SDG 3 und 15 haben.

Tabelle 15: Übersicht der Wirkungen auf ausgewählte Nachhaltigkeitsziele (Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung)

Nachhaltigkeitsziele (SDG)	Bezug zu VOBU-Kriterium	Beschreibung der Wirkungen
SDG 3: Gesundheit und Wohlergehen	U2) Gesundheit	Die Massnahmen reduzieren die lokale Schadstoffbelastung und verbessern somit die Gesundheitssituation der betroffenen Bevölkerung.
SDG 15: Leben am Land	U4) Natürliche Produktionsfaktoren	Positive Auswirkung auf Biodiversität.

Tabelle INFRAS/Neosys.

Annex

A1. Sensitivitätsanalyse

A1.1. Primärenergieanteil RTO bzw. DECONOX

Folgende Tabellen zeigen die Ergebnisse, unter der Annahme, dass zum Decken des Wärmebedarfs der RTO bzw. DECONOX- Anlagen ein Primärenergieanteil von 80% benötigt würde. Gegenüber dem Basisszenario mit 30% Primärenergieanteil erhöhen sich die Betriebskosten, da der Einsatz von Primärenergie teurer ist der Einsatz von Sekundärenergie.

Änderungen gegenüber dem Basisszenario sind in grüner Schrift markiert. Ein Vergleich mit den analogen Tabellen in Kapitel 5.1 zeigt, dass die Betriebskosten in beiden Szenarien zunehmen, für LRV 2022 jedoch in grösserem Ausmass, so dass sich aufgrund des höheren Primärenergieeinsatzes die Kostendifferenz der beiden Szenarien erhöht.

Beim Nutzen resultieren keine Änderungen, da sowohl Primär- als auch Sekundärenergie Treibhausgasemissionen verursachen und wir davon ausgehen, dass Unterschiede der Emissionsfaktoren²⁴ oder auch Wirkungsgrade der Gesamtanlage keine relevanten Auswirkungen haben.

²⁴ Als Primärenergie dient Erdgas. Sekundärenergie sind in diesem Kontext die Energiequellen, die in dem Klinkerofen eingesetzt werden. Diese sind v.a. Kohle und diverse Arten von alternativen Brennstoffen (der biogene Anteil ist dabei vernachlässigbar).

Tabelle 16: Jährliche Kosten und Nutzen ab 2027 gegenüber Status quo 2027 mit Primärenergieanteil 80% statt 30% für RTO bzw. DECONOX

	Szenario LRV 2022		Szenario BV neu		Unterschied LRV 2022 – neue BV
Kosten pro Jahr ab 2027					
Annualisierte Investitionskosten	7.6 Mio. CHF/a		4.6 Mio. CHF/a		3.0 Mio. CHF/a
Jährliche Betriebskosten	7.5 Mio. CHF/a		6.5 Mio. CHF/a		1.1 Mio. CHF/a
Total	15.1 Mio. CHF/a		11.1 Mio. CHF/a		4.0 Mio. CHF/a
Nutzen pro Jahr ab 2027					
Schadstoff	Emissionsreduktion [t/a]	Monetarisierter Nutzen [Mio. CHF/a]	Emissionsreduktion [t/a]	Monetarisierter Nutzen [Mio. CHF/a]	Differenz LRV-BV [Mio. CHF/a]
NO _x	1'335	47.7	1'285	45.9	1.8
VOC	204	0.8	176	0.7	0.1
PM10	1.6	0.1	0.1	0.0	0.1
SO _x	37.5	1.1	17.9	0.5	0.6
NH ₃	91.2	6.0	70.1	4.6	1.4
Benzol	13.3	-	10.7	-	-
CO ₂	-20'832	-4.3	-14'446	-3.0	-1.3
Total	-	51.5	n.a.	48.8	2.7

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Angaben der sechs Schweizer Zementwerke.

Tabelle 17: Gesamte Kosten und Nutzen für Periode 2021-2041 gegenüber Status quo

	Szenario LRV 2022	Szenario BV neu	Unterschied LRV 2022 – neue BV
Investitionskosten	117 Mio. CHF	75 Mio. CHF	42 Mio. CHF
Betriebskosten	118 Mio. CHF	111 Mio. CHF	7 Mio. CHF
Total Kosten	235 Mio. CHF	186 Mio. CHF	49 Mio. CHF
Total Nutzen	863 Mio. CHF	879 Mio. CHF	-16 Mio. CHF

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Angaben der sechs Schweizer Zementwerke.

A1.2. Nutzungsdauer

Im Basisszenario gehen wir von einer Nutzungsdauer von 15 Jahren aus. Wie lange die Anlagen in der Realität genutzt werden können, ist allerdings unklar. In der Regel werden die einzelnen Komponenten der Anlagen eine unterschiedliche Nutzungsdauer aufweisen. Bei absehbarem Austausch von «Verschleissteilen» haben wir dies bereits in die Berechnung der Betriebskosten

einfließen lassen (z.B. Ersatz Katalysator oder Filterschlauchwechsel). Darüber hinaus haben wir allerdings vereinfacht angenommen, dass die Nutzungsdauer der Anlagen im Basisfall 15 Jahre beträgt und diese dann gesamthaft ersetzt werden müssen (allerdings zu geringen Kosten). Eine weitere Differenzierung ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

Die folgende Tabelle 18 zeigt den Einfluss der angenommenen Länge der Nutzungsdauer. Wir fokussieren hierbei auf Kosten pro Jahr ab 2027. Es ist ersichtlich, dass eine Verkürzung der Nutzungsdauerlänge die annualisierten Investitionskosten in beiden Szenarien erhöht. Da die Gesamtinvestitionen für LRV 2022 höher sind, kommt dieser Effekt dort stärker zum Tragen, sodass mit abnehmender Nutzungsdauer die Differenz der jährlichen Kosten zwischen LRV 2022 und neuer BV steigt.

Die Werke haben eine Amortisationszeit von rund fünf Jahren angegeben. Wir haben diesen Wert daher in die Tabelle als mögliche Nutzungsdauer aufgenommen. Allerdings ist im Zusammenhang mit den hier behandelten Massnahmen Amortisation kein angemessenes Konzept. Es handelt sich nicht um Technologien, bei denen sich Initialkosten und verminderte Betriebskosten gegenüberstehen (und somit von einer Amortisation gesprochen werden kann), sondern die Massnahmen dienen primär dazu, Schadstoffemissionen zu reduzieren. Daher erachten wir die von den Werken angegebenen Amortisationszeiten im Rahmen dieser Studie als konzeptionell ungeeignet.²⁵

Tabelle 18: Sensitivitätsanalyse jährliche Kosten gegenüber Status quo nach vollständiger Umsetzung

Kosten ab 2027	Nutzungsdauer	Szenario LRV 2022	Szenario neue BV	Unterschied LRV 2022 - neue BV
		[Mio. CHF/a]	[Mio. CHF/a]	[Mio. CHF/a]
Annualisierte Investitionskosten	5 Jahre (Sensitivitätsanalyse auf Basis Amortisationszeit*)	22.7	13.8	8.9
	10 Jahre (Sensitivitätsanalyse)	11.4	6.9	4.4
	15 Jahre (Basisfall)	7.6	4.6	3.0
	20 Jahre (Sensitivitätsanalyse)	5.7	3.5	2.2
Betriebskosten	Nur Basisszenario, da kein Einfluss der Nutzungsdauer	5.1	4.6	0.6

* Konzeptionell im Rahmen dieser Studie ungeeignet: Erklärung siehe Text.

²⁵ Manche Werke haben angegeben, dass sie aufgrund der regulatorischen Unsicherheiten mit einem Horizont von max. fünf Jahre rechnen. Es erscheint uns aber kaum realistisch, dass sich das regulatorische Umfeld in der Schweiz fünf Jahre nach Ablauf der Übergangsfrist der geplanten Revision erneut so gravierend ändert, dass die derzeit installierten Anlagen abgeschrieben werden müssten.

Tabelle INFRAS/Neosys. Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von Angaben der sechs Schweizer Zementwerke.

A2. Vertraulichkeit und Haftungsausschlusserklärung

A2.1. Vertraulichkeit

INFRAS und Neosys haben die im Rahmen dieses Projekts erhaltenen vertraulichen Daten vertraulich behandelt. Insbesondere haben einzelne Zementwerke ihre detaillierten Kosten dem Projektteam mitgeteilt. Vor der Datenlieferung wurde mit den Datenlieferanten schriftlich festgehalten, dass weder das BAFU noch andere Werke aus diesem Bericht Rückschlüsse auf werkspezifische Daten erhalten dürfen. Daher werden die Ergebnisse dieses Berichts nur in aggregierter und anonymisierter Form präsentiert.

A2.2. Haftungsausschlusserklärung

INFRAS und Neosys können in keiner Weise verantwortlich oder haftbar gemacht werden für die Genauigkeit, die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität oder Angemessenheit der verwendeten Informationen. INFRAS und Neosys lehnen jegliche Haftung ab für Fehler und deren direkte oder indirekte Folgen im Rahmen der bereitgestellten Informationen, den von INFRAS und Neosys erstellten Produkten, den gezogenen Schlüssen und getätigten Empfehlungen.

Literatur

BAFU 2020a: VOBV Volkswirtschaftliche Beurteilung von Umweltmassnahmen. Leitfaden. Ein Instrument des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Stand August 2020. [Link](#)

BAFU 2020b: Erläuternder Bericht zur Änderung der Luftreinhalte-Verordnung (LRV). Verordnungspaket Umwelt Frühling 2021. [Link](#)

ECRA 2019: Einschätzung des Stands der Technik bezüglich Emissionsreduktionen in der Zementindustrie in der Schweiz und in den Nachbarländern. Technical Report A-2019/1789

ETH&EPFL 2018: A Sustainable future for the European cement and concrete industry. Technology assessment for full decarbonization of the industry by 2050.

FZKA 2000: Herstellung von Zementklinker. Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen. Forschungszentrum Karlsruhe. Technik und Umwelt. Wissenschaftliche Berichte. FZKA 6508. [Link](#)

INFRAS 2020: Hilfestellung für die Monetarisierung von Umweltwirkungen politischer Massnahmen. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). [Link](#)

Swisstopo 2020: Rohstoffe zur Herstellung von Zement – Bedarf und Versorgungssituation in der Schweiz. [Link](#)

UBA 2020: Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten Kostensätze Stand 12/2020. [Link](#)

VDT 2015: Abschlussbericht zum Vorhaben «Katalytische Low-Dust-Entstickung des Abgases an einer Drehofenanlage der Zementindustrie (Reingas – SCR)», KfW-Aktenzeichen NKa3 – 001706; Betreiber: Südbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH, Standort: Rohrdorf

VDZ 2014: Abschlussbericht zum Vorhaben «Minderung von NO_x-Emissionen in einer Drehofenanlage der Zementindustrie mittels SCR-Technologie (High-Dust)», KfW-Aktenzeichen MB e1 – 001599; Betreiber: Schwenk Zement KG, Standort: Heidenheim-Mergelstetten

VDI 2019: VDI-Richtlinie (VDI 2094) zu Emissionsminderung Zementwerke in: VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 3, Emissionsminderung II.