

# Klimabezogene Optimierung von Baugrundverbesserungen

## Multidisziplinärer Ansatz zur Verknüpfung von Ökobilanz und technischen Aspekten

Die Bewertung von Bauprozessen hinsichtlich umweltrelevanter Aspekte nimmt an Bedeutung zu und ist für die Baupraxis von besonderem Interesse. Es wird eine Bewertungsmethode für die Rüttelstopfverdichtung (RSV) und die dynamische Intensivverdichtung (DYNIV) mit Einschlagen von sog. DYNIV-Säulen vorgestellt, welche sowohl technische als auch umweltrelevante Kriterien einbezieht. Zur Bewertung der umweltrelevanten Aspekte wird die Ökobilanzierung angewendet. Aufgrund der durch die Klimakrise zunehmenden Bedeutung des globalen Erwärmungspotenzials (GWP) wird dieses als maßgeblicher Indikator für die Beurteilung der Umweltrelevanz festgelegt. Mit den beiden hier betrachteten Verfahren zur Baugrundverbesserung werden granulare Säulen hergestellt, wobei die DYNIV in verdichtbaren Böden zusätzlich eine signifikante Verbesserung der Bodeneigenschaften unterhalb des Säulenfußes erzeugt. An einem konkreten Projektbeispiel eines Logistikzentrums zeigen die Analyseergebnisse daher Vorteile der DYNIV hinsichtlich der Umweltwirkungen. Bei dem im Rahmen dieser Untersuchung definierten Setzungskriterium können die DYNIV-Säulen im Vergleich zu der RSV bis zu 60 % des GWP einsparen. Lässt man größere Setzungen zu, könnten die Umweltwirkungen beider Verfahren weiter reduziert werden. Diese Entscheidung wird künftig durch die Bauherren zu treffen sein. Am vorliegenden Beispiel wird die multidisziplinäre Optimierung mit den beiden Kriterien *Minimierung der Setzung* sowie *Minimierung des GWP* durchgeführt.

**Stichworte** Baugrundverbesserung; Ökobilanz; multikriterielle Optimierung; dynamische Intensivverdichtung

### 1 Einleitung

Der Klimawandel und die damit verbundene globale Erwärmung ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit und der zukünftigen Generationen. Insbesondere die Industriegesellschaften tragen eine maßgebende Verantwortung, um die Klimaziele und die erforderliche Eindämmung der Auswirkungen zu erreichen.

Bei geotechnischen Entwürfen und den damit verbundenen Spezialtiefbauprojekten haben die Emissionen von Bauverfahren und Bauprozessen bislang noch keinen hohen Stellenwert in der Baupraxis bei der Auswahl von Verfahren und der Vergabe. Eine Variantenuntersuchung mit einer qualifizierten Analyse der Umweltwirkung in Form einer Ökobilanz könnte jedoch bereits in der Planungsphase durchgeführt werden und somit in die Entscheidungsfindung einfließen. Hierfür wird die CO<sub>2</sub>-

### Climate-related optimisation of soil improvement – Multidisciplinary approach to combine life cycle assessment and technical aspects

The evaluation of construction processes regarding environmentally relevant aspects is becoming increasingly important and is of particular interest for construction business. An evaluation method for stone columns and dynamic compaction with installation of large stone pillars, called Dynamic Replacement (DR), is presented, which includes both technical and environmental criteria. The life cycle assessments (LCA) turn out to be the most suitable method for the evaluation of environmentally relevant aspects. Due to the increasing relevance of the global warming potential (GWP) because of the climate crisis, the GWP is defined as the relevant indicator. The two soil improvement methods considered here produce granular columns, with DR in compactible soils producing a significant improvement in soil properties below the base of the column. Using a case study of a logistics centre, the analysis results therefore show advantages of DR in terms of environmental impact. With the settlement criteria of 1.5 cm defined here, the DR pillars can save approx. 60 % of the GWP compared to the stone columns. If larger settlements are allowed, the environmental impacts of both methods can be further reduced. In the future, this decision will have to be made by the client. In the present example, the multiobjective optimisation is carried out with the criteria of minimising the settlement as well as the GWP.

**Keywords** soil improvement; life cycle assessment; multiobjective optimization; dynamic replacement

Bilanzierung eine entscheidende Rolle bei der Bewertung von geotechnischen Konzepten spielen. Auch die Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT) widmet sich mit zunehmender Aufmerksamkeit dem Thema und hat im Jahr 2022 den Arbeitskreis 6.7 „Nachhaltigkeit in der Geotechnik“ gegründet.

Besonders der Spezialtiefbau bietet häufig vielfältige Möglichkeiten an technisch gleichwertigen Verfahren mit unterschiedlichem Material- und Geräteeinsatz. Technisch gleichwertig einzustufende Lösungen führen zu unterschiedlichen Umweltwirkungen, die bislang jedoch nur untergeordnet bewertet werden.

Zur flächigen Baugrundverbesserung werden oftmals granulare Säulen im Raster angeordnet. Dabei gibt es nicht eine optimale geotechnische Lösung, sondern es ergibt sich durch die Variation von Raster, Durchmesser oder

Säulenlänge eine Vielzahl an Möglichkeiten. Weiterhin existieren verschiedene Bauverfahren zur Herstellung dieser Säulen.

Für zwei ausgewählte Baugrundverbesserungsverfahren zur Herstellung von granularen Säulen wird eine multidisziplinäre Bewertungsmethode vorgestellt. Diese umfasst die Disziplinen der Geotechnik und des Umweltmanagements. In der Geotechnik werden technische Aspekte wie Tragfähigkeits- und Verformungsverhalten betrachtet. Durch das Umweltmanagement wird dann das Reduktionspotenzial hinsichtlich der Umweltwirkungen über eine Ökobilanz identifiziert. Die kombinierte Methode ermöglicht die Bewertung einzelner Lösungen und die Optimierung.

## 2 Methodik

### 2.1 Ökobilanz

Die Ökobilanz ist eine Methode, um ein Produktsystem ökologisch zu bilanzieren. In der Ökobilanz werden die relativen Umweltwirkungen eines Produktsystems über den ganzen Lebensweg berücksichtigt. Die Grundsätze und Rahmenbedingungen einer Ökobilanz werden in der DIN EN ISO 14040 vorgegeben. Die DIN EN ISO 14044 bietet eine ausführliche Anleitung zum Aufstellen einer Ökobilanz. Die Umweltwirkungen werden dabei durch verschiedene Wirkungsindikatoren quantifiziert, welche die verschiedenen Umweltwirkungen beschreiben.

Im Bauwesen hat sich die Ökobilanz als Mittel zur Quantifizierung und Bewertung von Umweltwirkungen durchgesetzt [1], die damit zu einer Optimierung hinsichtlich der Umweltwirkungen führen kann. In die Ökobilanz geht neben den eingesetzten Materialien z.B. auch der Betrieb von Baufahrzeugen in der Bauphase ein [2].

Für die Erstellung von Ökobilanzen von Bauprozessen existieren bisher noch keine eigenen Regelwerke. Aufgrund dessen werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung die DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 zur Erstellung der Ökobilanz zugrunde gelegt. Diese Normen wurden zur Bilanzierung von Produktsystemen entworfen. Aus Sicht der Autoren können die Grundannahmen zur Erstellung einer Ökobilanz für Spezialtiefbaumaßnahmen genutzt und übertragen werden.

### 2.2 Multikriterielle Optimierung

Die multikriterielle Optimierung kann in der Planung eines Bauwerks zum Einsatz kommen, indem eine Vielzahl unterschiedlicher Parameterkombinationen automatisiert geprüft wird und somit die Entscheidungsfindung unterstützt wird. Die multikriterielle Optimierung eignet sich besonders für komplexe Probleme, die von mehreren Variablen beeinflusst werden und bei denen die minimale

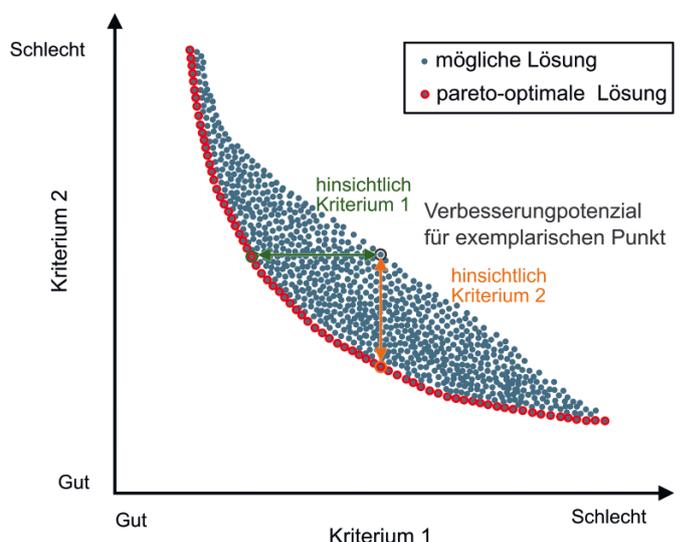
Änderung einer Variablen einen großen Einfluss auf das Gesamtsystem hat.

In der Geotechnik werden derzeit häufig nur stichprobenartig Varianten mit ausgewählten Parameterkombinationen „händisch“ durchgerechnet und verglichen [3].

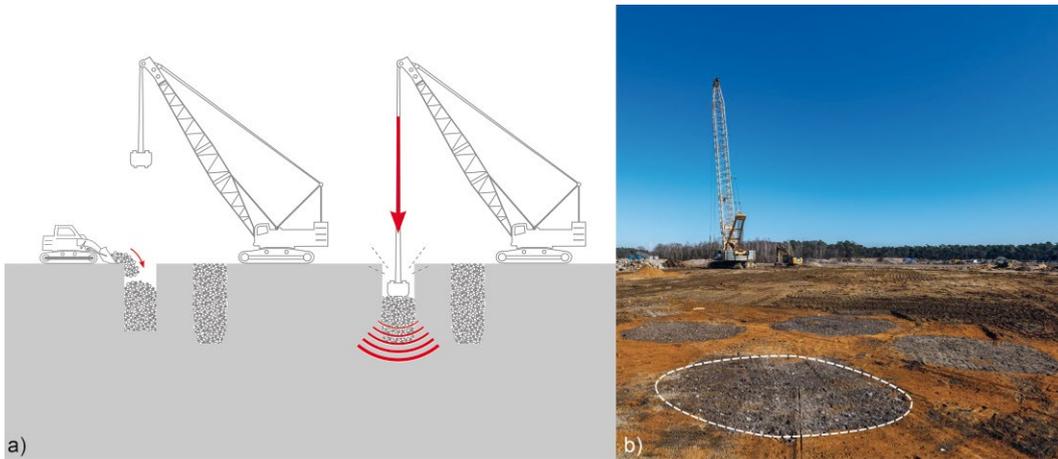
Die multikriterielle Optimierung betrachtet zwei oder mehr zu optimierende Zielfunktionen, die auch untereinander konkurrieren können. Zielfunktionen im Bauwesen können sich beispielsweise auf die Minimierung der Kosten, des Materials, der Bauzeit, des Energieeinsatzes und damit auch auf die Minimierung der Ressourcen beziehen. Restriktionsbedingungen können Standsicherheitsnachweise, Setzungskriterien oder andere Randbedingungen sein [3].

Die Lösung einer multikriteriellen Optimierung hat i. d. R. kein absolutes Minimum oder Maximum. Es gibt keine Lösung, die alle Zielfunktionen optimal erfüllt, sondern eine Lösungsmenge. Diese Lösungsmenge wird als Pareto-Menge bezeichnet und besteht aus Lösungen, die andere Lösungen dominieren, jedoch nicht dominiert werden. Eine dominierende Lösung bedeutet in diesem Fall, dass diese in mindestens einem Ziel besser ist und in keinem anderen Ziel schlechter. Eine Lösung wird nicht dominiert, wenn sie in einem Ziel besser ist als eine andere, die andere Lösung jedoch in einem anderen Ziel besser ist und die beiden Lösungen somit nicht miteinander vergleichbar sind. Demnach beschreibt die Pareto-Menge alle optimalen Lösungen, die in einem Ziel nicht verbessert werden können, ohne gleichzeitig ein anderes Ziel zu verschlechtern. Die Pareto-Menge kann grafisch durch die Pareto-Front visualisiert werden, siehe Bild 1. Die blauen Punkte stellen alle Lösungen aus den Parameterkombinationen dar, die pareto-optimalen Lösungen sind in Rot hervorgehoben [4].

Der hier vorgestellte Ansatz der multidisziplinären Optimierung kann als besondere Form der multikriteriellen



**Bild 1** Beispiel für eine mögliche Pareto-Front  
Example of a possible pareto front



**Bild 2** a) Herstellung DYNIV-Säulen; b) DYNIV-Säule im Projekt Dorsten (siehe Abschnitt 3)  
a) Execution of DR pillar; b) DR pillars for the Dorsten project (see section 3)

Optimierung verstanden werden. Dieser umfasst die Disziplinen der Geotechnik und des Umweltmanagements. Die Disziplin Geotechnik kann z. B. durch die Kriterien Standsicherheit oder Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks berücksichtigt werden. Das Umweltmanagement befasst sich im Rahmen einer Ökobilanz mit den Umweltwirkungen, die durch die Baugrundverbesserungsmaßnahmen entstehen.

Das betrachtete Kriterium der Geotechnik ist die Setzung, die einen zulässigen Wert nicht überschreiten darf oder minimiert werden soll. Die Ökobilanz setzt ihre Kriterien durch verschiedene Wirkungsindikatoren, die ebenfalls minimiert werden sollen.

### 2.3 Technische und umweltrelevante Aspekte der Baugrundverbesserungsverfahren

Die im Projektbeispiel betrachteten Baugrundverbesserungsverfahren zur Herstellung granularer Säulen, RSV und DYNIV-Säulen, werden im Folgenden kurz erläutert und dienen als Grundlage für die angefertigten Ökobilanzen.

Die RSV wird hier als Tiefenrüttelverfahren betrachtet. Bei der RSV werden Säulen mit Durchmessern von ca. 0,6 m bis 0,9 m aus einem granularen Material (Schotter oder Kies) hergestellt, um den Boden zu bewehren. Dadurch entsteht ein Komposit, mit dem die Tragfähigkeit und Steifigkeit des Baugrunds verbessert wird. Die Säulen haben im Vergleich zum umgebenden Boden eine höhere Steifigkeit und Scherfestigkeit. Die Tragwirkung ist abhängig von der seitlichen Stützwirkung des Bodens, wodurch eine Mindestscherfestigkeit vorausgesetzt wird. Die Belastung konzentriert sich in den Säulen, wodurch die Verformung reduziert und der Boden entlastet wird [5].

Zur Herstellung von Rüttelstopfsäulen werden eine Tragraupe mit Tiefenrüttler und Luftkompressor sowie ein Gerät zur Materialbeschickung, z. B. ein Radlader mit Seitenkippschaufel benötigt. Es stehen verschiedene Ge-

rätekombinationen zur Verfügung, je nach gewünschtem Durchmesser und Tiefe der Säulen.

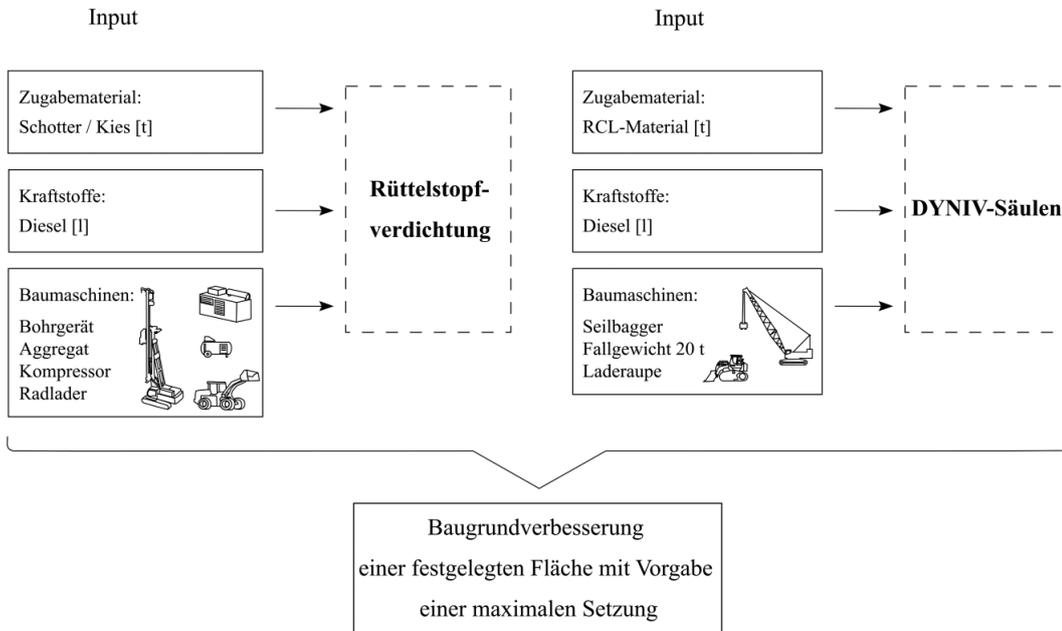
DYNIV-Säulen sind eine Weiterentwicklung der klassischen dynamischen Intensivverdichtung. Es wird ein Fallgewicht in einem Punktraster aus variierenden Höhen fallen gelassen und so der Boden verdichtet. Bei feinkörnigen Böden wird frühzeitig Zugabematerial in den Einschlagtrichter gefüllt, um eine großkalibrige Steinsäule auszustampfen (siehe Bild 2a,b). Benachbarte Säulen ermöglichen bei der Verwendung von grobkörnigem Zugabematerial durch die Drainagewirkung den Abbau des Porenwasserüberdrucks. Bei schwach durchlässigen Böden werden die Säulen in mehreren Phasen hergestellt, damit Porenwasserüberdrücke in den Ruhephasen abgebaut werden können.

Der Boden unterhalb des Säulenfußes verbleibt stark überkonsolidiert (ca. 10- bis 15-fach) gegenüber der Spannung im späteren Gebrauchszustand. Daher spricht man auch von einer dynamischen Vorbelastung. Die Säulen haben übliche Durchmesser von 1,5 m bis 3,0 m je nach Geometrie des Fallgewichts. Als Zugabematerial kann ein Recyclingmaterial (RCL-Material) ohne Anforderung an die Kornabstufung genutzt werden, was ein Vorteil gegenüber dem Tiefenrüttler der RSV ist.

In Bild 3 sind die üblichen Inputparameter der beiden Baugrundverbesserungsverfahren dargestellt. Neben den Inputparametern ist die Bauzeit entscheidend, auch für den Kraftstoffverbrauch. Für eine genaue Bestimmung der Bauzeit wird ein Bauprozessmodell benötigt. Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Bauzeit vereinfacht über die Einbauleistung des jeweiligen Verfahrens bestimmt.

### 3 Anwendungsbeispiel Logistikzentrum

Bei dem Anwendungsbeispiel handelt es sich um die Gründung eines Logistikzentrums, für die eine Baugrundverbesserungsmaßnahme erforderlich ist. In Dorsten-



**Bild 3** Übersicht Inputparameter Baugrundverbesserung (RSV, DYNIV-Säulen)  
Overview of input parameters for soil improvement methods (SC, DR)

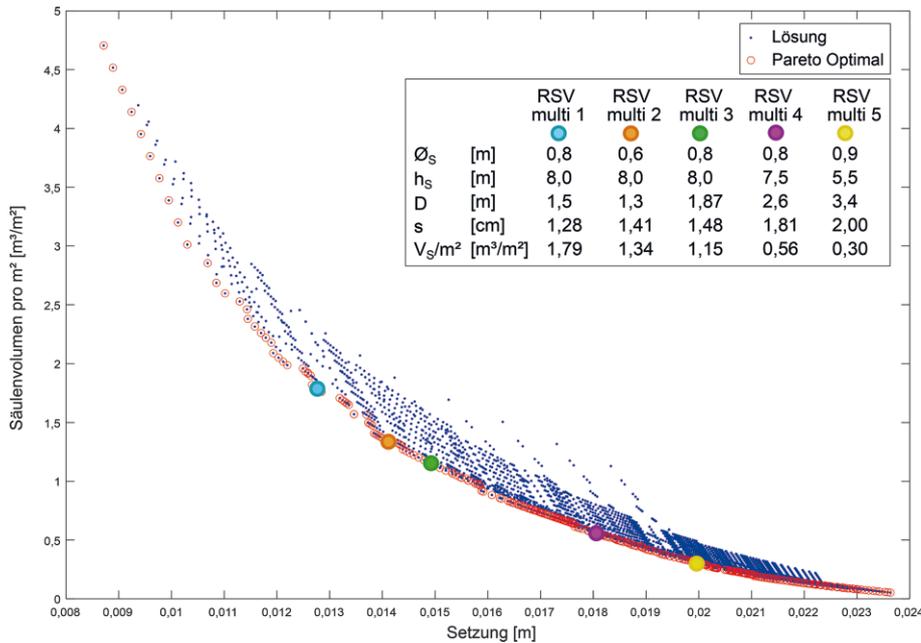


**Bild 4** Visualisierung des Logistikzentrums Levi Strauss & Co *Positive Footprint Wearhouse*<sup>®</sup>  
Visualisation of the logistics centre Levi Strauss & Co *Positive Footprint Wearhouse*<sup>®</sup>

Wulfen entsteht auf einem ehemaligen Zechengelände ein Hochregallager für Levi Strauss & Co (Bild 4). Das *Positive Footprint Wearhouse*<sup>®</sup> ist ein repräsentatives Beispiel für nachhaltiges Bauen. Das Bauwerk wird mit einer angestrebten klimaneutralen Nutzung von der Delta Development Group realisiert. Für den Bau werden möglichst ressourcenschonende Materialien und Herstellverfahren genutzt und der Rohbau wird nach dem *Cradle-to-Cradle*<sup>®</sup>-Leitgedanken realisiert.

Die anstehenden Böden genügen ohne weitere Maßnahmen nicht den Setzungsanforderungen des Bauwerks. Daher sind Sondermaßnahmen für die Bodenplatte und die Einzelfundamente erforderlich. Zur Erreichung der erforderlichen Baugrundsteifigkeit im Bereich des Hochregallagers wurde eine Baugrundverbesserung geplant und mittels DYNIV-Säulen umgesetzt.

Das Bemessungsverfahren nach [6] ist ein häufig genutztes Verfahren, um das Tragverhalten von granularen Säulen abzuschätzen. Die Bemessung erfolgt für den Grenzfall einer unbegrenzten Lastfläche auf einem unbegrenzten Säulennaster. Es wird eine Einheitszelle mit einer Säule und dem umliegenden Boden betrachtet. Die DYNIV-Säulen können als granulare Säulen ebenfalls nach den Grundannahmen von [6] bemessen werden. Eine Abminderung durch Überlagerungsdruck findet wegen der Geometrie der Säulen jedoch nicht statt. Weiterhin wird eine Verbesserung der Bodeneigenschaften durch die Verdichtung unterhalb des Säulenfußes berücksichtigt, welche Gegenstand weiterer Untersuchungen ist und im Rahmen eines weiteren Artikels für das gleiche Anwendungsbeispiel in Kürze veröffentlicht wird.



**Bild 5** Multikriterielle Optimierung RSV Setzung – Säulenvolumen  
Multiobjective optimisation SC settlement vs. volume of material

### 3.1 Multikriterielle Optimierung der Baugrundverbesserungsverfahren

Im ersten Schritt der multikriteriellen Optimierung werden die Setzung und das eingebaute Säulenvolumen betrachtet. Dementsprechend werden zwei Zielfunktionen verwendet: die Minimierung der Setzungen und des Gesamtvolumens des Zugabematerials. Das Säulenvolumen definiert den Materialbedarf.

Bei der Optimierung werden die Säulenlänge, der Säulendurchmesser und der Säulenabstand variiert. Das Optimierungsproblem wird in der Software *Matlab* durch einen eigens entwickelten Algorithmus gelöst. Dieser berechnet jede mögliche Parameterkombination der drei variierenden Parameter. Für jede mögliche Parameterkombination werden die Setzung und das Säulenvolumen berechnet. Die Setzungen werden über eine implementierte Funktion für eine unendlich ausgedehnte Lastfläche (ödometrische Spannungsbedingungen) berechnet. Bei der Berechnung werden die verbesserten Steifigkeiten nach dem Ansatz von *Priebe* angesetzt. Zur Bestimmung der pareto-optimalen Lösungen wird die Funktion *paretoQS* genutzt [7].

Die Parameter der RSV werden in folgenden baupraktisch relevanten Grenzen variiert:

- Säulenlänge  $h_s = 3,0 \text{ m} - 12,5 \text{ m}$   
(in 0,5-m-Schritten)
- Säulendurchmesser  $d_s = 0,6 \text{ m} - 0,9 \text{ m}$   
(in 0,05-m-Schritten)
- Raster/Abstand der Säulen  $D = 1,3 \text{ m} - 4,0 \text{ m}$   
(in 0,1-m-Schritten).

Es werden 3920 Parameterkombinationen berechnet. Aus dieser Menge an Lösungen werden die pareto-opti-

malen Lösungen herausgefiltert. Die Lösungen mit der Pareto-Front zeigt Bild 5. Die blauen Punkte stellen alle berechneten Lösungen dar, die Pareto-Menge ist durch die roten Kreise gekennzeichnet. Jeder rote Kreis stellt eine pareto-optimale Lösung dar.

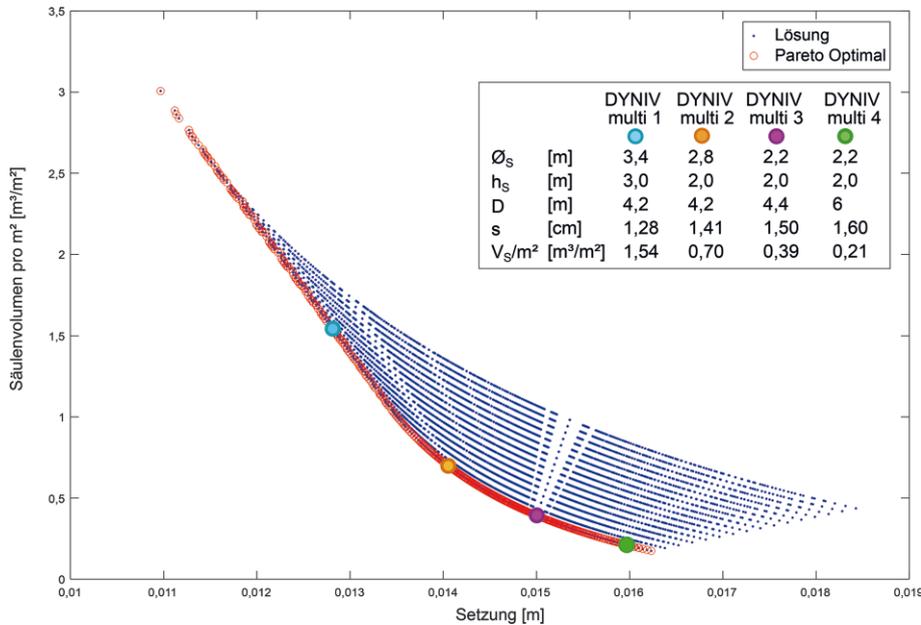
Um sich für eine Lösung zu entscheiden, ist abzuwägen, welche Setzungen vertretbar sind, um das Säulenvolumen zu verkleinern (Definition Setzungskriterium). Durch einen größeren Rasterabstand und einen kleineren Säulendurchmesser kann das Säulenvolumen reduziert werden. Darüber hinaus sind in Bild 5 fünf ausgewählte Lösungen aus der Pareto-Menge hervorgehoben (*RSV multi 1* bis *RSV multi 4*), für welche im Anschluss Ökobilanzen erstellt werden.

Analog dazu wird die multikriterielle Optimierung der DYNIV-Säulen durchgeführt. In den folgenden Bereichen werden die drei Herstellungsparameter variiert:

- Säulenlänge  $h_s = 2,0 \text{ m} - 5,0 \text{ m}$   
(in 0,2-m-Schritten)
- Säulendurchmesser  $d_s = 2,0 \text{ m} - 3,5 \text{ m}$   
(in 0,1-m-Schritten)
- Raster/Abstand der Säulen  $D = 4,0 \text{ m} - 6,0 \text{ m}$   
(in 0,1-m-Schritten).

Es werden 5376 Lösungen berechnet, aus denen auch hier die pareto-optimalen Lösungen herausgefiltert werden. Die Ergebnisse für die Optimierung der DYNIV-Säulen sind in Bild 6 dargestellt.

Die Variation des Rasters, des Säulendurchmessers oder der Säulenlänge zeigt das Optimierungspotenzial und die Vielzahl optimaler Lösungen. Basierend auf der Auswahl



**Bild 6** Multikriterielle Optimierung DYNIV-Säulen Setzung – Säulenvolumen  
Multiobjective optimisation DR settlement vs. volume of material

einer Priorität kann eine Lösung aus einer Menge optimaler Lösungen ausgewählt werden.

### 3.2 Ökobilanzierung der Baugrundverbesserungsverfahren

Die ausgewählten Lösungen aus der multikriteriellen Optimierung werden im Folgenden je Verfahren ökobilanziert. Die erste Phase einer Ökobilanz zur Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens ist für die beiden Baugrundverbesserungsverfahren gleich. Der Untersuchungsrahmen bezieht sich auf die Baugrundverbesserung des Untergrundes der Lagerhalle. Die zu verbessernde Fläche beträgt ca. 27.000 m<sup>2</sup>. Die funktionelle Einheit ist die Baugrundverbesserung der Lagerhallenfläche zur Reduktion der Setzungen.

Zur Berücksichtigung der Vielzahl an Umweltwirkungen, die durch die Umsetzung der Baugrundverbesserung entstehen, sind sechs Wirkungsindikatoren als aussagekräftig zu definieren. Das globale Erwärmungspotenzial, international als GWP bezeichnet, wird als Indikator für den Klimawandel in t CO<sub>2</sub>-Äquivalent gewählt. Das Versauerungspotenzial (AP) wird in kg SO<sub>2</sub>-Äquivalent beschrieben. Der Ressourcenverbrauch kann nicht durch einen gesonderten Indikator beschrieben werden, sondern durch mehrere Indikatoren. Es werden zur Beschreibung die Knappheitsindikatoren in Form des Potenzials für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE) in kg Antimon-Äquivalent (kurz: kg Sb-Äquiv.), des Potenzials für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF) in MJ sowie des Verbrauchs nichterneuerbarer Energien (PERNT) und des Verbrauchs erneuerbarer Energien (PERT) in MJ gewählt.

Das GWP hat durch die Auswirkungen der Klimakrise erheblich an Bedeutung gewonnen. Aufgrund dessen wird das GWP hier als entscheidender Wirkungsindikator der Ökobilanz angesehen. Darüber hinaus steigen die übrigen Wirkungsindikatoren mit einem Anstieg des GWP nahezu proportional an, wie im Folgenden zu sehen ist.

#### 3.2.1 Rüttelstopfverdichtung

Auf Grundlage der beschriebenen Bauabläufe werden für die Lösungen der RSV Ökobilanzen erstellt. Zur besseren Vergleichbarkeit sind in Tab. 1 die Datensätze der untersuchten Varianten aus der multikriteriellen Optimierung (*RSV multi 1–5*) aufgelistet. In Bild 7 sind alle berechneten Indikatoren der fünf Varianten veranschaulicht.

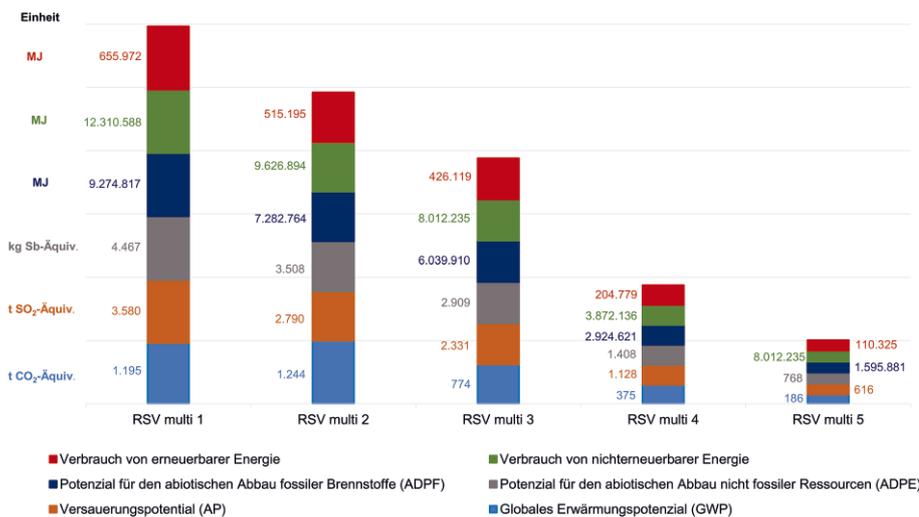
Alle Indikatoren nehmen nahezu linear mit dem GWP ab. Aufgrund dessen wird im Folgenden nur noch auf das GWP eingegangen. Das berechnete GWP, differenziert in einzelne Systembestandteile, ist in Bild 8 dargestellt.

Die Lösung *RSV multi 3* ist für ein Setzungskriterium von 1,5 cm die beste Lösung. Löst man sich von diesem Setzungskriterium und lässt eine Setzung von max. 1,8 cm zu, wie bei *RSV multi 5*, kann das GWP um rund 590 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent reduziert werden.

Es stellt sich heraus, dass die Menge an Zugabematerial nicht allein entscheidender Faktor für die Höhe des GWP ist. Neben dem Materialbedarf ist auch die Bauzeit ausschlaggebend. Das GWP ist durch die Produktion und den Transport des Materials bei der Variante

**Tab. 1** Abmessung RSV-Varianten  
Parameters of the SC variants

			RSV multi 1	RSV multi 2	RSV multi 3	RSV multi 4	RSV multi 5
							
Durchmesser Säule	$\varnothing_S$	[m]	0,8	0,6	0,8	0,8	0,9
Länge Säule	$h_S$	[m]	8	8	8	7,5	5,5
Quadratisches Raster	D	[m]	1,50	1,30	1,87	2,6	3,4
Setzung	s	[cm]	<b>1,28</b>	<b>1,41</b>	<b>1,48</b>	<b>1,81</b>	<b>2,00</b>
Gesamtvolumen (gerundet)	$V_{ges}$	[m <sup>3</sup> ]	48.500	36.500	31.500	15.100	8.200
Masse Zugabematerial	$m_{ges}$	[t]	87.300	65.700	56.700	27.180	14.760
Bauzeit	t	[d]	256	341	165	80	35

**Bild 7** RSV Ergebnisse Ökobilanzen (alle Indikatoren)  
LCA results of the SC (all indicators)

*RSV multi 1* aufgrund des größten Bedarfs an Zugabematerial am größten. Jedoch weist die Variante *RSV multi 2* durch die lange Bauzeit und den damit verbundenen hohen Kraftstoffverbrauch in der Summe das größte GWP auf.

### 3.2.2 DYNIV-Säulen

Die Ökobilanzen der DYNIV-Säulen werden ebenfalls unter Berücksichtigung des beschriebenen Bauprozesses erstellt. Die Datensätze der vier ökobilanzierten Varianten sind in Tab. 2 aufgeführt, in Bild 9 das entsprechende GWP. Da auch bei den DYNIV-Säulen die weiteren Indikatoren nahezu linear mit dem GWP ansteigen, wird hier nur auf das GWP eingegangen.

Die beste Lösung für das Setzungskriterium von max. 1,5 cm stellt die Lösung *DYNIV multi 3* dar. Durch eine Reduktion der Setzungsanforderung um 0,1 cm kann weiteres GWP eingespart werden. Im Vergleich zur *DYNIV multi 3* spart die *DYNIV multi 4* rund 45% ein.

Die Materialmenge ist ebenfalls nicht allein ausschlaggebend für die Höhe des GWP. Die Bauzeit beeinflusst

vor allem die Höhe des GWP bei den Varianten mit geringeren Setzungsanforderungen wie *DYNIV multi 3* und *DYNIV multi 4*.

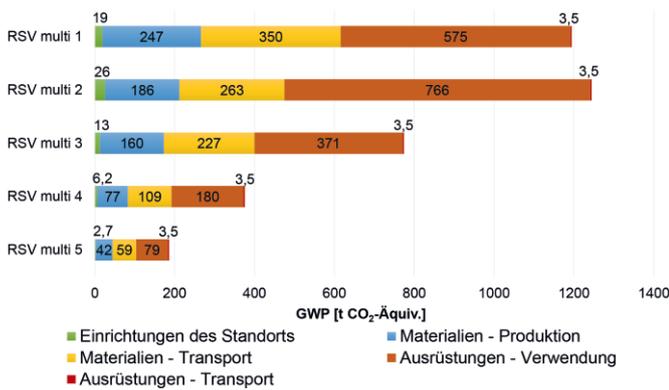
### 3.2.3 Auswertung

Bei dem Vergleich der Ergebnisse der beiden Baugrundverbesserungen stellen sich die DYNIV-Säulen als Verfahren mit dem geringeren GWP bei gleichem Setzungskriterium heraus. Dies ist auf die Verdichtungswirkung unterhalb des Säulenfußes und die geringere Bauzeit zurückzuführen. In Bild 10 ist das GWP der berechneten Varianten in Abhängigkeit von der Setzung dargestellt. Grundsätzlich zeigt sich der erwartete Anstieg des GWP mit strengerem Setzungskriterium.

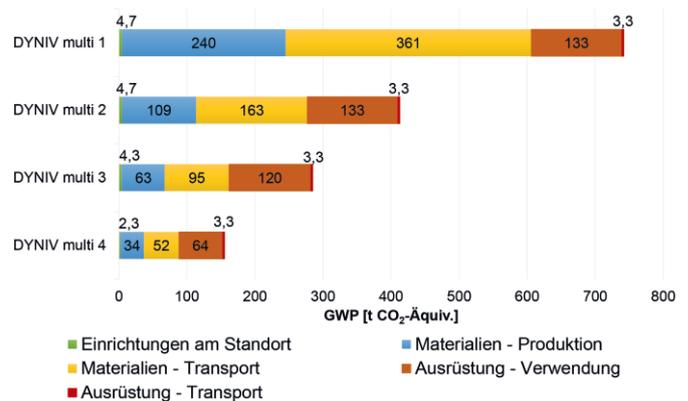
Zum besseren Verständnis des durch die Baugrundverbesserungsverfahren verursachten GWP kann ein einfacher Vergleich aus dem Alltag genutzt werden. Der Alltagsverkehr einer Person beträgt im Jahr ca. 15.000 km [8]. Ein neuer Pkw in Deutschland stößt nach dem Stand von 2019 pro km 0,13 kg CO<sub>2</sub> aus [9]. Daraus ergibt sich eine jährliche Emission pro Person von etwa 2 t CO<sub>2</sub>. Das

**Tab. 2** Abmessung DYNIV-Säulen-Varianten  
Parameters of the DR variants

			DYNIV multi 1	DYNIV multi 2	DYNIV multi 3	DYNIV multi 4
			<span style="color: #00AEEF;">●</span>	<span style="color: #D9534F;">●</span>	<span style="color: #800080;">●</span>	<span style="color: #008000;">●</span>
Durchmesser Säule	$\varnothing_S$	[m]	3,4	2,8	2,2	2,2
Länge Säule	$h_S$	[m]	3	2	2	2
Quadratisches Raster	D	[m]	4,20	4,20	4,4	6
Setzung	s	[cm]	<b>1,28</b>	<b>1,41</b>	<b>1,50</b>	<b>1,60</b>
Gesamtvolumen (gerundet)	$V_{ges}$	[m <sup>3</sup> ]	42.000	19.000	11.000	6.000
Masse Zugabematerial	$m_{ges}$	[t]	90.300	40.850	23.650	12.900
Bauzeit		[d]	62	62	56	30



**Bild 8** Gegenüberstellung des GWP der RSV-Varianten  
Comparison of the GWP of the SC variants



**Bild 9** Gegenüberstellung des GWP der DYNIV-Säulen-Varianten  
Comparison of the GWP of the DR variants

globale Erwärmungspotenzial der Baugrundverbesserung mittels DYNIV-Säulen bei einer maximalen Setzung von 1,5 cm entspricht somit der gleichen Wirkung, wie der des jährlichen Alltagsverkehrs von knapp über 140 Personen für das hier behandelte Fallbeispiel. Im Vergleich zur RSV können mit den DYNIV-Säulen rund 500 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent eingespart werden, was wiederum der Wirkung des jährlichen Alltagsverkehrs von 250 Personen entsprechen würde.

### 3.3 Multidisziplinäre Bewertungsmethode

Durch die Auswertung der Ökobilanzen wurden für die RSV sowie für die DYNIV-Säulen der Materialbedarf und die Bauzeit als Haupteinflussfaktoren für die Umweltwirkungen identifiziert. In der in dem Abschnitt 3.1 durchgeführten multikriteriellen Optimierung mit den Zielfunktionen Säulenvolumen und Setzung blieb die Bauzeit unberücksichtigt. Die Zielfunktion der Optimierung muss somit modifiziert werden in ein Kriterium, das sowohl den Materialbedarf als auch die Bauzeit mitberücksichtigt. Über eine angepasste multidisziplinäre Optimierung mit dem zu minimierenden Kriterium des globalen Erwärmungspotenzials anstelle des Säulenvolumens werden die Bauzeit sowie das Säulenvolumen miteinbezogen. Diese Optimierung wird ebenfalls mit dem zuvor entwickelten Algorithmus in *Matlab* realisiert, es werden

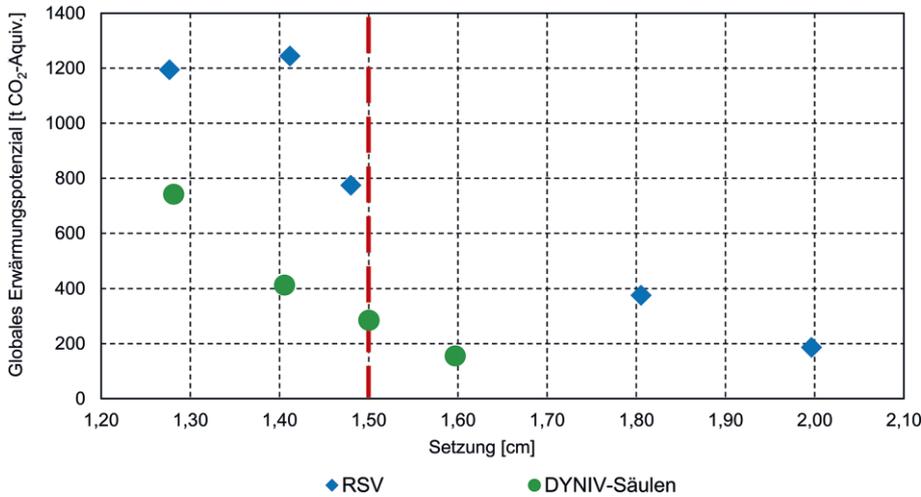
für jede mögliche Parameterkombination das GWP sowie die Setzung berechnet.

Das Ergebnis dieser multidisziplinären Optimierung für die RSV mit den Zielfunktionen des GWP und der Setzung ist in Bild 11 visualisiert.

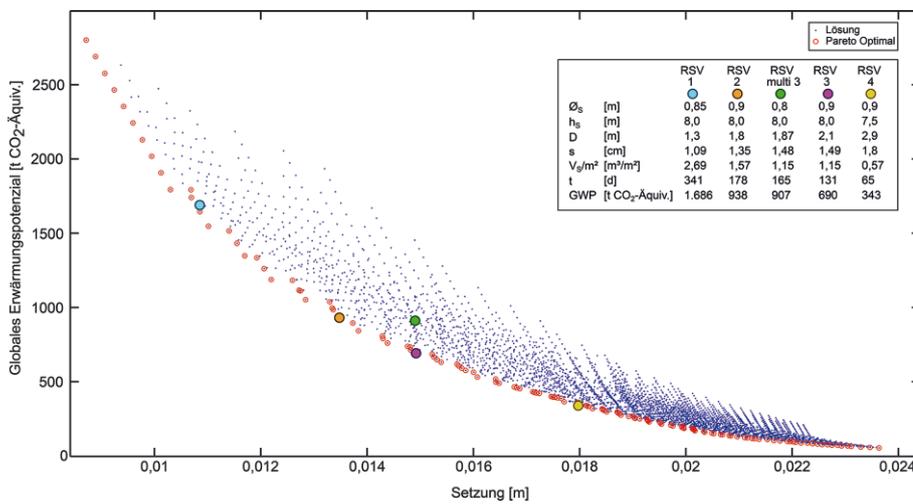
Im Gegensatz zur multikriteriellen Optimierung auf Basis des Säulenvolumens ist hier die *RSV multi 3*-Lösung keine pareto-optimale Lösung mehr. Bei fast gleicher Setzung können durch die Pink markierte Variante über 200 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent eingespart werden. Die Bauzeit der RSV wird über die Einbauleistung berechnet, die maßgebend von der Säulenhöhe ist. Dadurch fließt der Durchmesser der Säulen in die Berechnung der Bauzeit nicht mit ein. Der Durchmesser wird jedoch über den Materialbedarf mitberücksichtigt.

Bild 12 zeigt die Ergebnisse der multidisziplinären Optimierung für die DYNIV-Säulen mit den Zielfunktionen des GWP und der Setzung.

Die Lösung *DYNIV multi 2*, eine pareto-optimale Lösung aus der multikriteriellen Optimierung mit der Zielfunktion des Säulenvolumens, ist hier ebenfalls nicht mehr pareto-optimal. Es gibt Lösungen mit gleicher Setzung, die jedoch ein kleineres GWP aufweisen. Durch die Wahl



**Bild 10** Das GWP der berechneten Varianten der zwei Baugrundverbesserungsverfahren in Abhängigkeit von der Setzung  
GWP of the calculated variants of the two soil improvement methods as a function of settlement



**Bild 11** Multidisziplinäre Optimierung RSV GWP – Setzung  
Multidisciplinary optimisation SC GWP vs. settlement

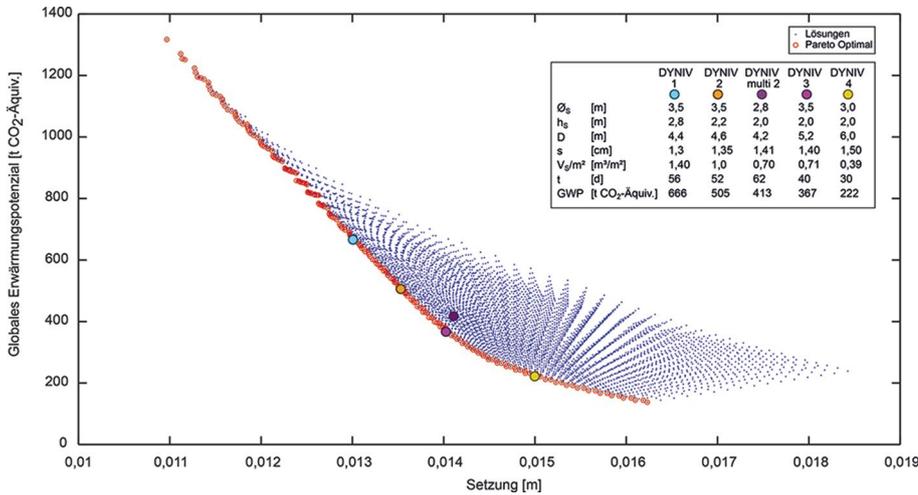
der Lösung *DYNIV 3* können rund 50 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent im Vergleich zur *DYNIV multi 2* eingespart werden.

Die Längen der Säulen der pareto-optimalen Lösungen sind im Vergleich zur RSV kürzer. Die Bodenschichten unterhalb der Säulen werden durch das Fallgewicht verdichtet und stellen somit eine zusätzliche Verbesserung des Baugrundes dar. Die Bauzeit wird über die festgelegte Einbauleistung berechnet. Die Einbauleistung der DYNIV-Säulen ist maßgeblich vom Rasterabstand abhängig. Aufgrund dessen trägt ein größerer Rasterabstand, neben einem geringen Materialbedarf, wesentlich zur Minimierung des GWP bei.

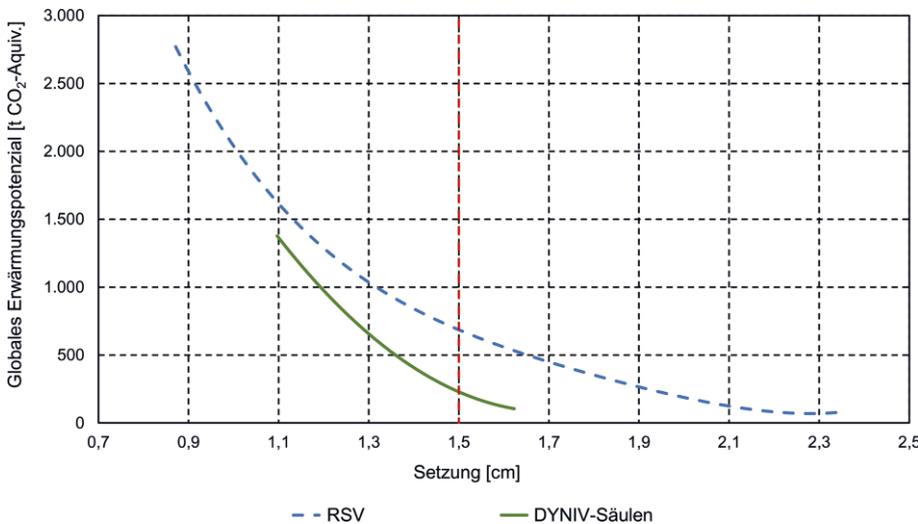
Die pareto-optimalen Lösungen der beiden Baugrundverbesserungsverfahren aus der entwickelten multidisziplinären Bewertungsmethode sind in Bild 13 dargestellt. Die DYNIV-Säulen stellen sich hier als das Verfahren mit den bestmöglichen Lösungen für das Optimierungsproblem zur Minimierung der Setzung und des GWP heraus. Bei einem für diese Untersuchung angesetzten Setzungskriterium von 1,5 cm können durch die DYNIV-Säulen im

Vergleich zur RSV rund 60% des GWP eingespart werden.

Wird das Gesamtbauwerk betrachtet, so haben die Baugrundverbesserungen einen nur vergleichsweise geringen Anteil am GWP der Gebäudeerrichtung. Ein solches Bauwerk hat ein GWP von rund 15.000 bis 20.000 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent allein aus den verbauten Materialien im Sektor Hochbau, jedoch ohne Berücksichtigung der Bauprozesse. Mit 285 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent entspricht das GWP der Baugrundverbesserung mit DYNIV-Säulen einem Anteil von 1 % bis 2 % des GWP des im Hochbau-Sektor verbaute Materials. Die Umweltwirkung und damit das Einsparpotenzial im Hochbau ist daher deutlich größer einzustufen. Die Optimierung der Baugrundverbesserungen hinsichtlich der Umweltwirkungen ist dennoch von Bedeutung. Durch die vielen Variationsmöglichkeiten sind bei der Baugrundverbesserung Einsparungen im GWP bei technischer Gleichwertigkeit möglich, was auch zu Kosteneinsparungen führt. Daher kann auch im Spezialtiefbau ein Beitrag zur Einsparung von Ressourcen und Emissionen geleistet werden.



**Bild 12** Multidisziplinäre Optimierung DYNIV-Säulen GWP – Setzung  
Multidisciplinary optimisation DR GWP vs. settlement



**Bild 13** Gegenüberstellung des globalen Erwärmungspotenzials der pareto-optimalen Lösungen (Kriterien: GWP – Setzung)  
Comparison of the global warming potential of the pareto-optimal solutions (criteria: GWP vs. settlement)

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In der Gesamtheit ist die entwickelte Bewertungsmethode eine gute Möglichkeit, die optimalen Lösungen für die betrachteten Baugrundverbesserungsverfahren zu finden. Eine Erhöhung der zulässigen Setzung um wenige Millimeter kann die Umweltwirkungen wesentlich reduzieren. Für die RSV und die DYNIV-Säulen kann die multidisziplinäre Optimierung mit den Kriterien der Setzung und des globalen Erwärmungspotenzials erfolgen. Die Bewertungsmethode kann für andere Projekte und Verfahren angewendet werden, da lediglich die Ein-

gangsparameter des Optimierungsskripts geändert werden müssen. Die Bestimmung der Bauzeit ist hinreichend genau. Eine Bestimmung der Bauzeit mittels eines Bauprozessmodells würde alle Einflussaspekte auf die Bauzeit miteinbeziehen und somit zu einem noch genaueren Ergebnis führen. Die vorgestellte Bewertungsmethode bedeutet für die Praxis eine schnelle, einfach anzuwendende und zugleich aussagekräftige Analyse, um das Verbesserungspotenzial der Baugrundverbesserungsverfahren hinsichtlich der Setzung und der Umweltwirkungen zu identifizieren. Die Anwendbarkeit auf andere Bauverfahren ist gegeben.

#### Literatur

- [1] Röder, A.; Finkbeiner, M. (2021) *Was jeder im Bauwesen über Ökobilanzen wissen sollte* in: Hauke, B.; Lemaitre, C.; Röder, A. [Hrsg.] *Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz: Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen: aktueller Stand der Technik*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 137–145.
- [2] Ays, I.; Geimer, M. (2017) *CO<sub>2</sub>e Quantifizierung von mobilen Arbeitsmaschineneinsätzen im Erdbau, Steinbruch, Straßen- und Hochbau* in: Wissenschaftlicher Verein für Mobile Arbeitsmaschinen [Hrsg.] *Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen: 6. Fach-*

- tagung, 15. Februar 2017, Karlsruhe. KIT Scientific Publishing, S. 145–161.
- [3] Seitz, K.-F.; Grabe, J. (2018) *Einsatzmöglichkeiten der multi-kriteriellen Optimierung im digitalen Bauen*. Digitale Infrastruktur und Geotechnik 2018, Jg. 42 von Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der Technischen Universität Hamburg, S. 169–181.
- [4] Knowles, J.; Corne, D.; Deb, K. (2008) *Introduction: Problem Solving, EC and EMO* in: Knowles, J. et al. [Hrsg.] *Multiobjective Problem Solving from Nature*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–28.
- [5] Thurner, R.; Kummerer, C.; Marte, R. (2020) *Baugrundverbesserung* in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J. D. [Hrsg.] *Beton-Kalender 2020*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 727–829.
- [6] Priebe, H. J. (1995) *Die Bemessung von Rüttelstopfverdichtungen*. Bautechnik 72, H. 3, S. 183–191.
- [7] Tom, R. (2022) *Find multi-objective Pareto front using modified quicksort* <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73089-find-multi-objective-pareto-front-using-modified-quicksort>, MATLAB Central File Exchange. [Zugriff am: 9. Jul. 2022]
- [8] Schelewsky, M.; Follmer, R.; Dickmann, C. (2020) *CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke im Alltagsverkehr – Datenauswertung auf Basis der Studie Mobilität in Deutschland*. Texte 224/2020. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-fuss-abdruecke-im-alltagsverkehr> [Zugriff am: 8. Feb. 2023]
- [9] European Environment Agency (2022) *Average CO<sub>2</sub> emissions per km from new passenger cars – SDG\_12\_30*. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg\\_12\\_30/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_12_30/default/table?lang=en) [Zugriff am: 8. Feb. 2023]

**Autor:innen**

Birthe Knabe, M. Sc. (Korrespondenzautorin)  
 bknabe@menard.gmbh  
 MENARD GmbH  
 Bremer Straße 121  
 27283 Verden (Aller)

Christopher Tinat, M. Sc.  
 ctinat@menard.gmbh  
 MENARD GmbH  
 Hittfelder Kirchweg 2  
 21220 Seevetal

Dr.-Ing. Matthias Rosenberg  
 m.rosenberg@tu-braunschweig.de  
 Technische Universität Braunschweig  
 Institut für Geomechanik und Geotechnik  
 Beethovenstraße 51b  
 38106 Braunschweig

**Zitieren Sie diesen Beitrag**

Knabe, B.; Tinat, C.; Rosenberg, M. (2023) *Klimabezogene Optimierung von Baugrundverbesserungen – Multidisziplinärer Ansatz zur Verknüpfung von Ökobilanz und technischen Aspekten*. geotechnik 46, H. 2, S. 89–99. <https://doi.org/10.1002/gete.202200019>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.  
 Eingereicht: 24. Dezember 2022; angenommen: 8. Februar 2023.