

1

47. Jahrgang
März 2024
ISSN 0172-6145

Sonderdruck

geo technik

ORGAN DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK

Bodenmechanik
Erd- und Grundbau
Felsmechanik
Ingenieurgeologie
Geokunststoffe
Umweltgeotechnik

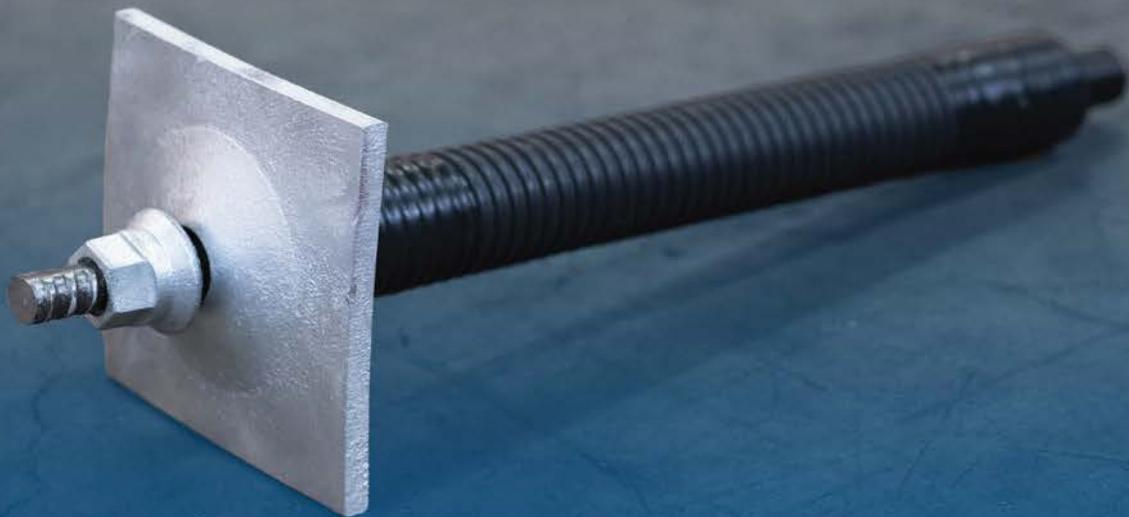


- Risikobewertung einer inneren Bodenerosion
- Modulares hypoplastisches Stoffmodell für granulare Böden
- Durchlässigkeitsversuche an teilgesättigtem, gefrorenem Sand und Kies
- Einflussfaktoren von Verankerungssystemen auf den CO₂-Fußabdruck
- Geothermally activated mixed-in-place walls

SAS SYSTEMS

Geotechnische Systeme mit CO₂-reduziertem Stahl von Stahlwerk Annahütte

- ✓ Dauerhafter und redundanter Korrosionsschutz
- ✓ Robust und bewährt
- ✓ CO₂-reduzierter Stahl 'Made in Germany'



SAH
Stahlwerk Annahütte

Stahlwerk Annahütte
Max Aicher GmbH & Co. KG

Max- Aicher-Allee 1+2
D-83404 Hammerau

www.annahuette.com

08654 / 487 - 0

stahlwerk@annahuette.com

Einflussfaktoren von Verankerungssystemen auf den CO₂-Fußabdruck am Beispiel einer Bodenvernagelung

Nachhaltigkeit ist ein Thema, das im Baubereich immer stärker in den Fokus rückt. Der Wunsch nach mehr Nachhaltigkeit steht nicht selten dem Anspruch hoher Qualität gegenüber, schließlich beeinflusst die Qualität der Bauprodukte nicht nur unser tägliches Wohlbefinden, in erster Linie steht Qualität am Bau für Sicherheit, für Tragfähigkeit und für Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen – so wird es den Baubeteiligten in ihrer Ausbildung notwendigerweise vermittelt. Nicht selten herrscht das Vorurteil vor, dass Nachhaltigkeit und der Anspruch einer hohen Qualität im Widerspruch stehen.

Der vorliegende Aufsatz soll das Thema Nachhaltigkeit bei geotechnischen Verankerungssystemen aufgreifen und die Einflussfaktoren auf den CO₂-Fußabdruck ermitteln und bewerten. Anhand des Beispiels einer Bodenvernagelung soll dargestellt werden, dass insbesondere die Komponenten Stahl und dessen Herstellung sowie Zement eine maßgebliche Rolle spielen. Durch die Wahl des Bodennagelsystems hat der Anwender einen erheblichen Einfluss auf Qualität und Nachhaltigkeit von geotechnischen Verankerungssystemen. Zudem sollen Wege gezeigt werden, wie ein Optimierungspotenzial schon heute baupraktisch genutzt werden kann. Nicht zuletzt soll ein Bauvorhaben aus der Praxis anhand von Zahlen verdeutlichen, welche Menge an CO₂ mit der Wahl des idealen Verankerungssystems eingespart werden konnte.

Stichworte Bodennagelsysteme; Nachhaltigkeit; Verankerungssysteme; CO₂-Fußabdruck

Factors influencing the carbon footprint of anchoring systems using the example of a soil nailing system

Sustainability is an increasingly important issue in the construction industry. The desire for greater sustainability is often pitted against the demand for high quality. After all, the quality of building products not only affects our daily well-being, but quality in construction primarily stands for safety, load-bearing capacity and serviceability of building components – as all involved in construction are inevitably taught during their training. There is often a preconception that sustainability and the demand for high quality are at odds with each other.

The aim of this paper is to address the issue of sustainability in geotechnical anchoring systems and to identify and evaluate the factors influencing the carbon footprint. Using soil nailing as an example, it is shown that steel and its production, as well as cement, play a crucial role. By choosing the right soil nailing system, the user has a significant influence on the quality and sustainability of geotechnical anchoring systems. In addition, the paper will show how optimisation potential can be exploited in practice. Last but not least, a practical construction project will illustrate the amount of CO₂ that can be saved by choosing the ideal anchoring system.

Keywords soil nailing systems; sustainability; anchoring systems; Carbon footprint

1 Einleitung

„[...] Die Schaffung effizienterer und nachhaltigerer Produkte von Anfang an würde dazu beitragen, den Energie- und Ressourcenverbrauch zu reduzieren, da schätzungsweise über 80 Prozent der Umweltauswirkungen eines Produkts während der Designphase bestimmt werden [...]“, so die Einschätzung des Europäischen Parlaments in seiner Veröffentlichung vom Juni 2023 [1]. Tatsächlich kann man davon ausgehen, dass der Anteil des CO₂-Ausstoßes durch das Produktdesign von geotechnischen Verankerungssystemen noch wesentlich höher ausfällt, geschätzt bis rund 95 %.

Der Wunsch nach mehr Nachhaltigkeit steht nicht selten dem Anspruch hoher Qualität gegenüber, schließlich beeinflusst die Qualität der Bauprodukte nicht nur unser tägliches Wohlbefinden, in erster Linie steht Qualität am Bau für Sicherheit, für Tragfähigkeit und für Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen – so wird es den Baubeteiligten in ihrer Ausbildung notwendigerweise vermittelt.

Nachhaltigkeit und technischer Anspruch, ein Widerspruch also? In vielen Branchen, man denke an die Autoindustrie, ist Nachhaltigkeit mit der Weiterentwicklung von Technik und Konzepten gekoppelt. Ohne Weiterentwicklung wird auch der Bausektor nicht auskommen. Ein Blick auf Verankerungssysteme in der Geotechnik aber zeigt, dass allein die Wahl von bestehenden Produkten schon heute einen erheblichen Einfluss auf die Nachhaltigkeit unter Berücksichtigung unserer technischen Ansprüche hat.

Im Beitrag sollen Bodenvernagelungssysteme im Hinblick auf Technik und Nachhaltigkeit untersucht und verglichen werden.

Es soll dabei gezeigt werden, dass die Unterschiede in puncto Nachhaltigkeit schon heute gravierend sind. Bei

genauerer Betrachtung rücken die Wahl des Verankerungssystems wie auch die Komponente Stahl in den Fokus. Es sollen Wege gezeigt werden, wie ein Optimierungspotenzial baupraktisch genutzt werden kann.

2 Einflussparameter auf den CO₂-Fußabdruck von Verankerungssystemen

Der Eurocode 7 [2] und seine nationalen Anhänge definieren verschiedene Verankerungs- und Rückhaltesysteme in der Geotechnik. Dazu zählen unter anderem Anker, zusammengesetzte Stützkonstruktionen aus mehreren Lagen Bodenankern oder Bodennägel oder Pfahlgründungen. Gemein haben die genannten Systeme, dass Tragglieder den Kern der Anwendung darstellen. Bis auf wenige Ausnahmen, beispielsweise die Sicherung von Baugrubenwänden für den Durchbruch maschineller Vortriebe, besteht das Tragglied dabei fast vorherrschend aus Stahl. Zu den weiteren Komponenten zählen Verankerungsmittel wie Platten und Muttern, Zement für die Lastübertragung auf den Baugrund und die Sicherstellung des Korrosionsschutzes oder sonstige Komponenten wie Kunststoffrohre für den Korrosionsschutz. Klar ist, dass bei der Herstellung jeglicher Komponenten CO₂ bei der Herstellung anfällt. Die Summe der bei der Herstellung der Komponenten und bei deren Einbau erzeugten CO₂-Menge gibt einen Aufschluss über den CO₂-Fußabdruck der gewählten Verankerungssysteme.

Bei der Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks fallen bei geotechnischen Verankerungssystemen also vor allem die Komponenten Stahl und Zement ins Auge. Die Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung ist Teil der Anstrengungen der Zementindustrie. Für den Anwender ergibt sich Stand heute ein CO₂-Ausstoß von rund 600 kg/t [3]. Der Einfluss des Anwenders auf die ausgestoßene CO₂-Menge durch die Wahl des Verankerungssystems ist dabei relativ. Die Wahl eines kleinstmöglichen Bohrloches zur Beschränkung der Zementmenge gebietet die Wirtschaftlichkeit. Die bauseits erforderliche Zementmenge wird durch die Geologie, die ermittelten Lasten sowie die Wahl des Produkts beeinflusst. Während Geologie und Lasten als gegeben angenommen werden können, spielt die Wahl des Systems eine erhebliche Rolle. Dies soll im Abschnitt „Vergleich von Bodennagelsystemen aus Hohlstäben bzw. Vollstäben“ näher erläutert werden.

Der Einfluss des Stahls auf den CO₂-Fußabdruck definiert sich insbesondere durch die Wahl des Verankerungssystems (Erläuterung in Kapitel 3) sowie durch die Art seiner Herstellung.

Die Stahlerzeugung erfolgt nach heutigem Stand auf zwei möglichen Wegen:

1) Hochofenroute (BOF = Blast Oxygen Furnace)

In einem Hochofen wird mittels Koks bzw. teils auch regenerativen Heizstoffen Eisenerz geschmolzen. Das

so gewonnene Roheisen wird anschließend im Stahlwerk mit zusätzlichen Legierungselementen und Schrottanteilen in einem Konverter unter Anreicherung von Sauerstoff zu Stahl verschmolzen.

2) Elektrolichtbogenofen (EAF = Electric Arc Furnace)

In einem Elektrolichtbogenofen wird recycelter Stahl mittels Elektroden in einem Lichtbogen geschmolzen und auf diese Weise gemeinsam mit zusätzlichen Legierungselementen Stahl wiedergewonnen.

Die Unterschiede der beiden Herstellverfahren im Hinblick auf die CO₂-Emissionen sind dabei erheblich. Während bei der Hochofenroute (BOF) von rund 1.744 kg [4] (je nach Herstellwerk bis zu 2.200 kg [5]) ausgestoßenem CO₂ je erzeugter Tonne Stahl ausgegangen werden kann, fallen bei der Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen (EAF) laut Erhebung von Fraunhofer Umsicht nur rund 395 kg/t [4], also bis zu weniger als ein Viertel der Menge als bei BOF an.

Zwar sind aktuelle Bemühungen zu einer CO₂-reduzierten Stahlerzeugung via Hochofenroute durch den Einsatz von Wasserstoff beträchtlich und bemerkenswert. Gleichzeitig sind diese aber sehr herausfordernd aufgrund des hohen Bedarfs an CO₂-neutral hergestelltem Wasserstoff. Im Übrigen kommt die Stiftung Klimaneutralität in ihrer Studie „Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045“ [6] zum Schluss, dass eine stärkere Versorgung mit inländischen Sekundärrohstoffen (also Schrott) auch im Stahlbereich die beste Versicherung gegen Importabhängigkeiten bildet.

Die Art der Stahlherstellung erschließt sich dem Anwender des Verankerungssystems in aller Regel leider nicht. Aufschluss über die tatsächlich erzeugte CO₂-Menge kann eine Umweltproduktdeklaration (EPD = Environmental Product Declaration) geben. Während eine EPD in nordischen Ländern teils schon als Anforderung gängig ist, ist diese hierzulande freiwillig. Ändern soll sich der Freiwilligkeitscharakter jedoch in Zukunft mit Abschluss und Einführung der neuen EN-Normengeneration. Sofern Nachhaltigkeit derzeit bei der Betrachtung der Planung als Aspekt gesehen wird, bleibt den Projektbeteiligten nur die Möglichkeit, individuell beim Hersteller des Verankerungssystems nachzufragen.

Gewindestähle nach den allgemein bauaufsichtlichen Zulassungen Z-1.1-1 [7] und Z-1.1-58 [8] stammen beispielsweise zu 100 % aus dem Elektroofen. Bei Hohlstäben, zu deren Herstellung Rohre als Vormaterial dienen, wird ein Normenverweis in der bauaufsichtlichen Zulassung auf den zu verwendenden Werkstoff und dessen zugehörige Werkstoffnorm festgehalten. Die Werkstoffnorm selbst gibt jedoch keinen Hinweis auf das Herstellverfahren des Stahls. Formal kann der Hersteller von Hohlstabsystemen jederzeit zwischen Rohrherstellern wählen, die Stahl aus der Hochofenroute oder aus Elektrolichtbogenöfen beziehen.

3 Einfluss der Systemwahl auf den CO₂-Fußabdruck am Beispiel eines permanenten Bodennagelsystems

Neben der Komponente Zement und der Herstellart der Stahltragglieeder hat die Systemwahl einen erheblichen Einfluss auf die CO₂-Bilanz. Anhand des Beispiels „permanentes Bodennagelsystem“ soll der Einfluss der Systemwahl aufgezeigt werden.

Die Ausführung von Bodennägeln wird in der DIN EN 14490 [9] geregelt. In Pkt. 6.2.2.2 werden dabei die normativen Referenzen für das Tragglied aufgeführt. Demnach darf eine Bodenbewehrung nach EN 10080, EN 10210, EN 10219, EN 10025-2 oder EN 10138 verwendet werden. Dies gilt sowohl für dauerhafte als auch für temporäre Bodennägel. In Ermangelung einer Übereinstimmung mit den genannten Normen kann ein bauaufsichtlich geregeltes Produkt verwendet werden. Die rechtliche Grundlage hierfür bilden die Landesbauordnungen bzw. die Musterbauordnung MBO. Hierin heißt es, dass die Technischen Baubestimmungen, also die Normen gem. Musterverwaltungsvorschrift MVVTB [10], einzuhalten sind oder alternativ Bauarten (§ 16), Produkte mit Verwendbarkeitsnachweis (§ 17) bzw. bauaufsichtlich zugelassene Bauprodukte (§ 18) eingesetzt werden dürfen.

Sofern die normativen Anforderungen an das Tragglied erfüllt sind, muss der Anwender ein geeignetes Korrosionsschutzsystem festlegen. Im Grunde wird an dieser Stelle die Weiche für die Wahl eines dauerhaften Bodennagelsystems schon vorgestellt. Ein Blick in das Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen [11] zeigt, dass als Dauerbodennägel in Deutschland nur Systeme mit Grobgestängeln, also Vollstäben zugelassen sind. Dennoch ist es gängige Baupraxis, dass Hohlstabsysteme in Deutschland dauerhaft eingesetzt werden.

Der Korrosionsschutz von Bodennagelsystemen verfolgt das Prinzip, dass bei genügender Betondeckung infolge des Calciumhydroxid im Zementstein (pH-Wert ca. 12–14) ein Korrosionsschutz gegenüber dem Stahltragglied entsteht. Es bildet sich eine stabile Passivschicht aus Eisenoxiden auf der Stahloberfläche aus, die die Eisenauflösung praktisch verhindert. Entscheidend dabei ist, dass die Rissbreiten auf ein Minimum (in Deutschland 0,1 mm) begrenzt werden, um einen Wasserzutritt zum Tragglied zu verhindern. Die Rissweitenbegrenzung lässt sich nach heutigem Stand ausschließlich experimentell bestätigen (Bild 1).

Zugelassene dauerhafte Bodennagelsysteme, die einen Grobgestängestab als Tragglied verwenden, werden mit einem doppelten Korrosionsschutz nach DIN EN 1537 [12] versehen (Bild 2). Dieser besteht aus einer 5 mm starken Zementsteinüberdeckung über dem Tragglied und einem darüberliegenden Kunststoffripprohr, das in aller Regel werkseitig gefertigt wird. Durch das Kunststoffripprohr wird einerseits eine Redundanz hergestellt,



Bild 1 Rissweitenprobe eines doppelt korrosionsgeschützten Vollstabtragglieds Ø 75 mm unter Spannung nach dem Ablösen des Kunststoffripprohres
Crack width probe of a double corrosion-protected solid bar Ø 75 mm under tension after removal of the plastic ribbed pipe



Bild 2 Doppelt korrosionsgeschützte Tragglieeder auf der Baustelle
Double corrosion-protected load-bearing elements on the construction site

zum anderen führt die Rippenausbildung des Kunststoffripprohres zu einer sehr günstigen Rissbildung.

Bauseits muss über dem Ripprohr eine mind. 10 mm starke Zementsteindeckung vorgesehen werden. Der Vorteil dieses redundanten Systems liegt darin, dass die Bohrl Lochdurchmesser gering gehalten werden können. Eine verrohrte Bohrung in Kombination mit geeigneten Abstandhaltern garantiert zudem, dass die erforderliche Betondeckung über die gesamte Länge garantiert ist.

Dauerhafte Bodennagelsysteme, die einen Hohlstab als Tragglied verwenden, lassen keinen Einsatz eines Kunststoffhüllrohres zu und werden deshalb, schlicht aus Gründen einer mangelnden Redundanz, mit einer erhöhten Zementsteindeckung als Korrosionsschutz versehen. Die Stärke der erhöhten erforderlichen Zementsteindeckung, die natürlich die Größe des Bohrlochs und in weiterer Folge den Zementverbrauch beeinflusst, ist abhängig von der Stärke des Tragglieds. Alternativ besteht bei Hohlstäben die Möglichkeit, die Zementsteindeckung zu optimieren, indem der Stahleinsatz mit entsprechenden Traglastreserven erhöht wird.

Es lässt sich schon erkennen, dass die Wahl des Bodennagelsystems (Bild 3) aufgrund differierender Stahl- und vor allem Zementmengen nicht nur einen erheblichen Einfluss auf die Verbrauchsstoffe und die Wirtschaftlichkeit hat, sondern sich entsprechend auch auf die erzeugten CO₂-Emissionen bei der Produktherstellung auswirkt.

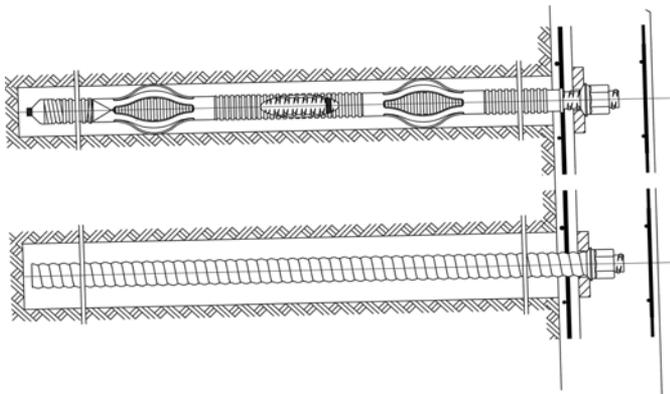


Bild 3 Bodennagelsysteme; oben Vollstab, schematische Darstellung des Tragglieds mit innerer Zementsteindeckung, Kunststoffripprohr, äußerer Zementsteindeckung und Zentrierung in einer verrohrten Bohrung; unten Hohlstab, schematische Darstellung des Tragglieds mit Zementsteindeckung
Soil nail systems; above solid bar, schematic representation of the load-bearing element with inner cement stone covering, plastic ribbed pipe, outer cement stone covering and centring in a cased borehole; bottom hollow bar, schematic representation of the load-bearing member with cement stone covering

Nachfolgendes Bild 4 verdeutlicht maßstäblich, welche Bohrloch- und Tragglieddurchmesser sich bei einer charakteristischen Nagellast von 400 kN ergeben.

Optisch wird hier bereits ersichtlich, dass der Stoffverbrauch durch Vollstabsysteme erheblich reduziert gegenüber Hohlstabsystemen ausfällt. Die Vorteile eines doppelten Korrosionsschutzes reichen jedoch weiter. Neuere Erkenntnisse zum Einfluss der Rissweiten liefert ein Forschungsvorhaben. Der Einfluss der Rissbreiten auf die Korrosion wurde jüngst im Forschungsprojekt DAT – Dauerhaftigkeit in der Ankertechnik durch die TU Graz in Kooperation mit ÖBB Infra, Asfinag und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft untersucht [13]. Demnach trat Korrosion bei allen Rissen auf, wobei die Rissbreite nicht entscheidend für die Entstehung bzw. Verhinderung des Korrosionsprozesses war. Lokale Schwächungen der Korrosionsschutzmaßnahmen wie Querschnittsschwächung der Zementsteindeckung führen zu einem verstärkten und auch beschleunigten Auftreten von Korrosion. Folglich muss die Zementsteindeckung

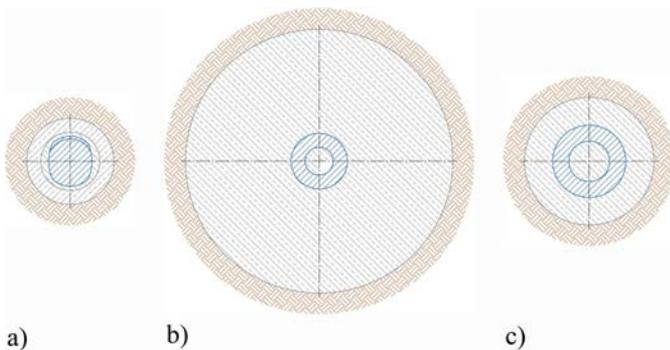


Bild 4 Maßstäbliche Darstellung von dauerhaften Bodennagelquerschnitten (ohne Muffenverbindung): a) Grobgewindestahl Ø 32 mm mit doppeltem Korrosionsschutz; b) Hohlstab Ø 40 mm mit 75 mm erforderlicher Überdeckung; c) Hohlstab Ø 52 mm mit 20 mm erforderlicher Überdeckung
Scaled representation of permanent soil nail cross-sections (without couplings): a) thread bar Ø 32 mm with double corrosion protection; b) hollow bar Ø 40 mm with 75 mm required cover; c) hollow bar Ø 52 mm with 20 mm required cover

ckung sehr hoch sein und sollte nicht geschwächt werden (z. B. bei Muffen) – oder die Entstehung von Korrosion muss durch andere Maßnahmen (Kunststoffrohr) verhindert werden. Unabhängig davon zeigt sich, dass die Rissweiten von mit Kunststoffripprohren geschützten Systemen weit geringer ausfallen als von Systemen mit reiner Zementsteinüberdeckung, auch wenn diese ideal unter Laborbedingungen hergestellt wurden. So zeigt sich, dass bei gleichem Lastniveau nur zementüberdeckter Systeme (also ohne zusätzliches Kunststoffrohr) zwei- bis zu fünf-fache Rissbreiten auftreten.

Die Bundesvereinigung der Prüfengeure argumentiert, dass bei einer Bodenvernagelung durch zwangsläufig auftretende Bodenverformungen quer zu den Nägeln ungewollte Biegebeanspruchungen auftreten [14]. Diese führen zu erhöhten Rissweiten und zu einer inakzeptablen Beschädigung des Korrosionsschutzes. Dies wiederum hat die unbedingte Forderung nach einem doppelten Korrosionsschutz zur Folge. Formal ist die Anwendung eines doppelt korrosionsgeschützten Systems somit nicht nur technisch sinnvoll, sondern formale Voraussetzung für den Einsatz in Deutschland.

Vollstabbodennagelsysteme werden bei instabilen Bohrlochverhältnissen mittels verrohrter Bohrung hergestellt, in stabilen Verhältnissen mittels Bohrgestänge mit Bohrkronen. Abstandhalter um das Tragglied garantieren, dass die Vollstabbodennägel ideal zentrisch im Bohrloch platziert und verpresst werden und der äußere Korrosionsschutz aus Zementstein gleichförmig ausgebildet wird. Im Gegensatz zu selbstbohrenden Systemen kommt es bei verrohrten Bohrungen nicht in dem Ausmaß zum Ausweichen der Bohrkronen, das beispielsweise im Fall von Findlingen auftreten kann. Durch das nachträgliche Einführen des Tragglieds in die Bohrverrohrung und das Ziehen der Bohrverrohrung während des Verpressens wird ein idealer Zementkörper mit zentrischem Tragglied und konstanter Betondeckung garantiert.

Mit diesem Einbauverfahren kann die Fehlerhäufigkeit verglichen mit selbstbohrenden Systemen erheblich reduziert werden, da seitens der Bauaufsicht schwer überwachbare Anforderungen an ein maximales Drehmoment, an einen maximalen Drehimpuls oder an eine maximale Schlagenergie nicht gegeben sind.

Nicht nur Findlinge, auch unsachgemäßer Einbau können beim Bohren von Hohlstäben zu ungleichmäßigen Zementsteinüberdeckungen führen (Bild 5).

Wird die erforderliche Zementsteindeckung von Muffen nicht beachtet, können die Auswirkungen auf die Kopfpelstellen entsprechend ausgeprägt ausfallen (Bild 6).



Bild 5 Zementsteinüberdeckung eines selbstbohrenden Tragglieds infolge einer nicht zentrischen Lage im Bohrloch
Cement cover of a self-drilling load-bearing element due to a non-centred position in the drill hole



Bild 6 Reduzierte Zementsteinüberdeckung eines selbstbohrenden Tragglieds im Bereich der Muffenverbindung nach dem Freilegen
Reduced cement cover of a self-drilling load-bearing element in the area of the coupling after uncovering

4 Vergleich der Ressourceneffizienz permanenter Bodennagelsysteme

Im Folgenden soll die Ressourceneffizienz von Bodennagelsystemen am Beispiel eines dauerhaften Bodennagels mit einer erforderlichen charakteristischen Last von 400 kN miteinander verglichen werden. Dabei ist der Einsatz der folgenden Bodennagelsysteme zwar nicht formal, aber praktisch denkbar:

- Bodennagelsystem nach Zulassung Z-34.13-226 [15] mit einem Vollstab als Tragglied aus dem Elektrolichtbogenofen
- Vergleichbares Vollstabbodennagelsystem, jedoch Tragglied aus dem Hochofen
- Hohlstabbodennagelsystem mit einer Betondeckung von 75 mm mit einem Tragglied aus dem Elektrolichtbogenofen
- Hohlstabbodennagelsystem mit einer Betondeckung von 20 mm mit einem Tragglied aus dem Elektrolichtbogenofen
- Hohlstabbodennagelsystem mit einer Betondeckung von 75 mm mit einem Tragglied aus dem Hochofen

- Hohlstabbodennagelsystem mit einer Betondeckung von 20 mm mit einem Tragglied aus dem Hochofen
- Bodennagelsystem mit einem Vollstab der Güte 670/800 als Tragglied aus dem Elektrolichtbogenofen
- Bodennagelsystem mit einem Vollstab der Güte 900/1050 als Tragglied aus dem Elektrolichtbogenofen

In die Berechnung gehen die Parameter CO₂-Emission bei der Herstellung von Zement, von Stahl und PE für das Ripprohr ein. Als messbare Basis dienen PCF-Werte. Der Product Carbon Footprint (PCF) bzw. CO₂-Fußabdruck für Produkte beschreibt die Klimawirkung eines einzelnen Produktes bzw. einer Dienstleistung und umfasst sämtliche THG-Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Für die vergleichende Bewertung der Systeme werden die in Tabelle 1 zusammengefassten PCF-Werte als CO₂-Emissionswerte zugrunde gelegt.

Für die Ermittlung der erforderlichen Zementmenge wird von einem W/Z-Wert von 0,4 ausgegangen. Vernachlässigt werden in der Bilanz die Emissionen für den Kaltrollvorgang von Hohlstäben, Emissionen für den Einbauvorgang, darunter der Mehreinsatz von Energie beim Bohrvorgang für größere Bohrlochdurchmesser von Hohlstäben, etwaige Emissionen für den Mehreinsatz von Energie für größere Zubehörkomponenten wie Muttern oder Muffen für Hohlstäbe im Vergleich zu Vollstabkomponenten, Emissionen für den Mehreinsatz von Energie für die Herstellung entsprechender Bohrkronen für Hohlstäbe und Emissionen für die Herstellung der Bohrverrohrung für Vollstabsysteme. Somit ergeben sich rechnerisch folgende CO₂-Mengen je Laufmeter Nagelsystem (Bild 7).

Nicht berücksichtigt ist in dieser Tabelle die Ausführung von Koppelstellen. Muffen von doppelkorrosionsgeschützten Traggliedern werden nach Stand der Technik mittels Schrumpfschläuchen geschützt und bedürfen keiner Bohrlochaufweitung. Dagegen müsste die Zementsteinüberdeckung bei Muffen von selbstbohrenden Systemen mittels einer größeren Bohrkronen berücksichtigt werden. Geht man bei Hohlstabsystemen von Standardlängen von 3 m oder 4 m aus, sind Muffen in aller Regel nicht vermeidbar.

Tab. 1 PCF-Werte für die vergleichende Systembewertung
PCF values for the comparative system evaluation

Übliche CO ₂ -Äquivalentspannen (PCF)	
Stahl BOF	1.700–2.300 kg CO ₂ -Äq.
Stahl EAF	450–900 kg CO ₂ -Äq.
Zement	400–700 kg CO ₂ -Äq.
CO ₂ -Äquivalente (PCF) als Grundlage der nachfolgenden Beispielrechnung	
Stahl BOF	2.230 kg CO ₂ -Äq.
Stahl EAF	785 kg CO ₂ -Äq.
Zement	600 kg CO ₂ -Äq.

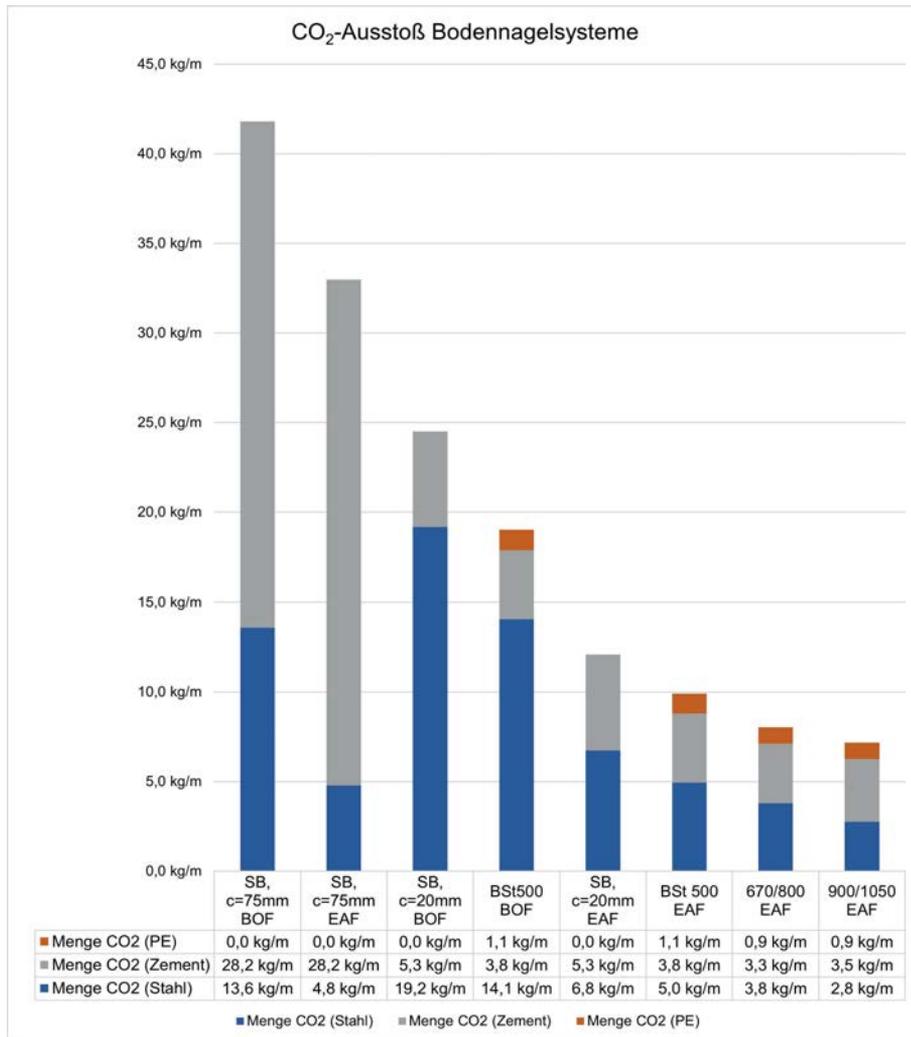


Bild 7 CO₂-Ausstoß verschiedener Bodennagelsysteme mit einer erforderlichen charakteristischen Last von 400 kN
Carbon emissions of various soil nail systems with a required characteristic load of 400 kN

Die Wahl des verwendeten Bodennagelsystems wird – sofern die Zulassungsfrage außer Acht gelassen wird – trotz der für sich sprechenden Zahlen, Stand heute, auf das wirtschaftlichste System fallen. Häufig werden Hohlstabsysteme mit dem geringsten Stahleinsatz eingesetzt. Dabei wird nicht beachtet, welcher immenser Bedarf an Zement und welche Ressourcen für den Bohrvorgang anfallen.

Tatsächlich sprechen nicht nur Nachhaltigkeitsgründe für die Wahl eines Vollstabsystems. Auch die vorher beschriebenen technischen und formalen Gründe müssten den Fingerzeig des CO₂-Fußabdrucks eigentlich bestätigen.

5 CO₂-Einsparung durch die Wahl des Bodennagelsystems am Beispiel BV A44 Kassel–Herleshausen–Wommener Dreieck

Welche Auswirkungen die Wahl des Bodennagelsystems auf den CO₂-Fußabdruck hat, kann anhand der CO₂-Emissionen bzw. der Einsparung der CO₂-Emissionen durch die Wahl eines Vollstabsystems aus dem Elektrolichtbogenofen am Beispiel des Bauvorhabens BV A44

Kassel–Herleshausen–Wommener Dreieck verdeutlicht werden. Das Bauvorhaben ist Teil des Verkehrsprojektes Deutsche Einheit Nr. 15: „Autobahn A44 Kassel–Eisenach und A4 Eisenach–Görlitz“ und soll eine Lücke im Netz der Bundesautobahnen auf der Achse Ruhrgebiet–Kassel–Dresden zwischen der A7 bei Kassel und der A4 bei Wommen schließen (Bild 8).



Bild 8 Böschungssicherung mit doppelt korrosionsgeschützten Bodennägeln, BV A44 Kassel–Herleshausen–Wommener Dreieck
Slope stabilisation with double corrosion-protected soil nails, motorway project A44 Kassel–Herleshausen–Wommener Dreieck

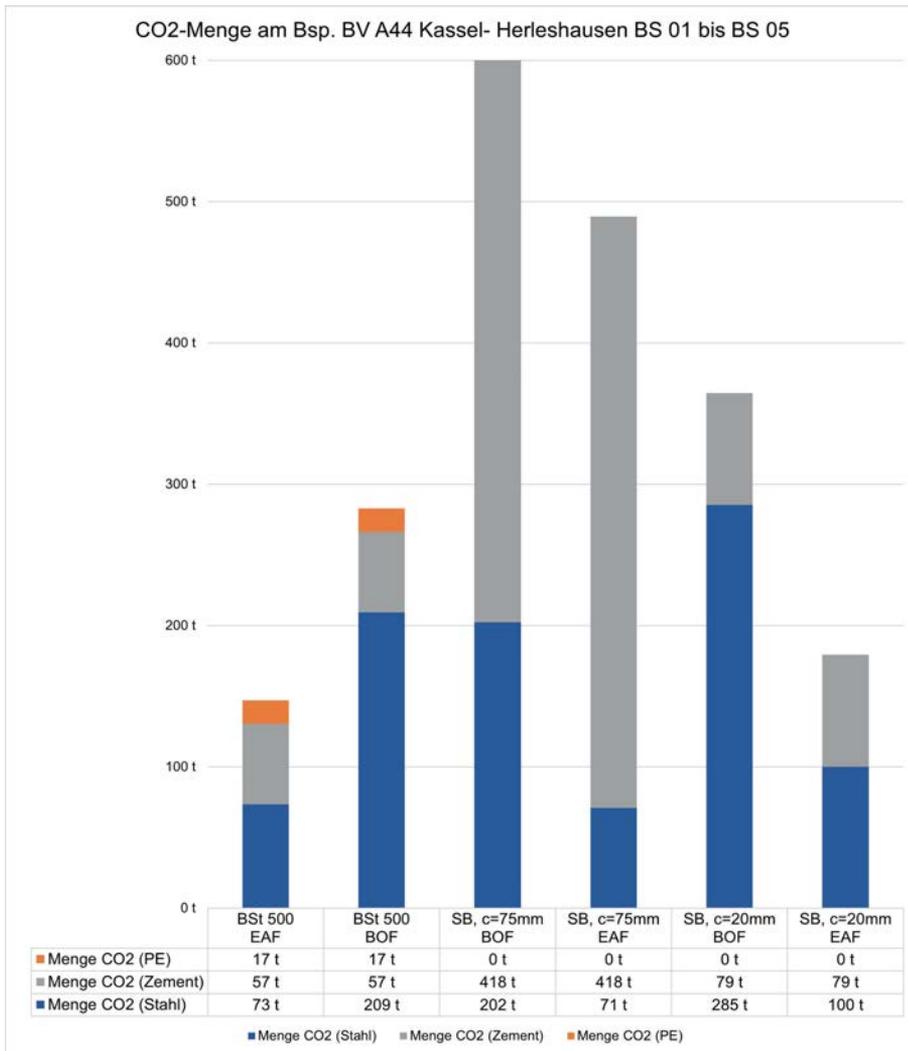


Bild 9 Theoretische CO₂-Menge durch Bodenanker „Klasse SAS 500/550 Ø 32mm“ beim BV A44 Kassel–Herleshausen BS 01 bis BS 05
Theoretical amount of CO₂ due to ground anchors “Class SAS 500/550 Ø 32mm” at the motorway project A44 Kassel-Herleshausen BS 01 to BS 05

Aus dem Zusammenspiel von bautechnischen und geologischen Erfordernissen ergab sich die Ausführung von 14.838 Laufmetern dauerhafter Bodennägel der Güte BSt B500B Ø 32mm. Durch die Wahl des Bodennagelsystems nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Z-34.13-226 [13] konnten beim 1. Bauabschnitt nachfolgende absolute Mengen an CO₂ eingespart werden (Bild 9).

Die Verwendung der doppelt korrosionsgeschützten Lösung mit Traggliedern SAS 500/550 aus dem Elektrolichtbogenofen bewirkte allein beim BV A44 Kassel–Herleshausen–Wommener Dreieck für das System der „Klasse Ø 32mm“ den Verzicht auf folgende CO₂-Mengen (Tab. 2).

6 Schlussfolgerung und Aussicht

Die CO₂-Emissionszahlen – je Laufmeter, prozentual oder absolut – verdeutlichen eindrucksvoll, welchen Einfluss die Baubeteiligten auf den CO₂-Fußabdruck ausüben können. Die These, dass das wirtschaftlichste System gleichzeitig das ressourcenschonendste System ist,

muss angesichts der tatsächlichen Baupraxis leider revidiert werden. Vielmehr liegt es an den obersten Entscheidungsträgern bei der Bauausführung, beginnend bei den Bauherren, die Route vorzugeben. Und als größter Bauherr in Deutschland ist insbesondere der Staat aufgerufen, Mechanismen zu entwickeln, den Einsatz ressourcenschonender Systeme voranzutreiben.

Tab. 2 Einsparung von CO₂ bei Verwendung des Bodennagelsystems SAS 500/550 Ø 32mm gegenüber anderen Systemen am Beispiel des BV A44 Kassel-Herleshausen–Wommener Dreieck
CO₂ savings when using the SAS 500/550 Ø 32mm soil nail system compared to other systems using the example of the motorway project A44 Kassel-Herleshausen-Wommener Dreieck

System	Einsparung Masse	Prozentuale Einsparung
Vollstab 500/550 Ø32, BOF	–136t	–92 %
SB-Anker 52/29, c=90mm, BOF	–474t	–322 %
SB-Anker 52/29, c=90mm, EAF	–342t	–233 %
SB-Anker 73/53, c=20mm, BOF	–218t	–148 %
SB-Anker 73/53, c=20mm, EAF	–32t	–22 %

Tatsächlich sind aber nicht nur die an der Ausführung direkt Beteiligten aufgerufen, ihren Umgang mit der Umwelt zu optimieren. Auch die Industrie muss weiter bestrebt sein, ihren Anteil an der Reduzierung von Treibhausgasen zu leisten. Sei es bei der Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung, die seitens der Zementindustrie mit großen Schritten vorangetrieben

wird, oder beim Einsatz immer ressourceneffizienterer Stähle – ob bei der Stahlgüte oder dem Herstellungsverfahren. Hochfester Stahl, wie er im Einsatz als SN-Anker bereits zur Ausführung kommt [16], ist nur ein Beispiel zur Steigerung der Effizienz und kann als Vorbild auch in anderen Bereichen des Bauwesens dienen.

Literatur

- [1] Europäisches Parlament (2023) *Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile* (online). <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>
- [2] DIN EN 1997-1:2014-03 (2014) *Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln*; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013. Berlin: Beuth.
- [3] Verein Deutscher Zementwerke e. V. (VDZ) (2020) *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungsprofile und Handlungsstrategien*; Düsseldorf, November 2020.
- [4] Hiebel, M.; Nühlen, J. (2016) *Technische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Faktoren von Stahlschrott (Zukunft Stahlschrott)*. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT [Hrsg.], Onlinefassung der Kurzstudie im Auftrag der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV), Oberhausen, November 2016.
- [5] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2021) *Informationsblatt CO₂-Faktoren, Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft*. 15. November 2021.
- [6] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2023) *Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045; Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität – Kurzfassung*.
- [7] Deutsches Institut für Bautechnik (2020) *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-1.1-58; Betonstabstahl B500B mit Gewinderippen – SAS 500, Nenndurchmesser: 12 bis 50 mm; Geltungsdauer bis 31. Dezember 2024*.
- [8] Deutsches Institut für Bautechnik (2022) *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-1.1-1; Stabstahl mit Gewinderippen S 555/700 als Tragglied für die Geotechnik, Nenndurchmesser: 57,5 und 63,5 mm; Geltungsdauer bis 30. September 2027*.
- [9] DIN EN 14490:2010-11 (2010) *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bodenvernagelung*; Deutsche Fassung EN 14490:2010. Berlin: Beuth.
- [10] Deutsches Institut für Bautechnik (2021) *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB)*. Ausgabe 2021/1.
- [11] Deutsches Institut für Bautechnik (2023) *Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen*; 3. Januar 2023.
- [12] DIN EN 1537:2014-07 (2014) *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Verpressanker*; Deutsche Fassung EN 1537:2013. Berlin: Beuth.
- [13] Rebhan, M. J.; Burtscher, S. L.; Scharinger, F.; Hirschmüller, S.; Pirkner, T.; Fuschelberger, H.; Tintelnot, G. (2022) *Dauerhaftigkeit in der Ankertechnik DAT*. Juli 2022.
- [14] Bundesvereinigung der Prüfeningenieure für Bautechnik e. V. (2016) *Korrosionsschutz bei Dauernägeln, Festlegung der Prüflasten bei Bodenvernagelung*; April 2016.
- [15] Deutsches Institut für Bautechnik (2021) *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-34.13-226; Bodenvernagelung System „SAS“ mit Zuggliedern aus Betonstabstahl B500B mit Gewinderippen – SAS 500, Ø 16, Ø 20, Ø 25, Ø 28, Ø 32, Ø 40, Ø 43 und Ø 50 mm; Geltungsdauer bis 31. März 2026*.
- [16] Schiller, A.; Wiest, M.; *Entwicklung eines neuen hochfesten SN-Ankers zur Optimierung von konventionellen Vortrieben*. Geomechanics and Tunneling 12, No. 6, pp. 739–744. <https://doi.org/10.1002/geot.201900042>

Autor:in

Dipl.-Ing. Andreas Schiller (Korrespondenzautor)
schiller_andreas@gmx.de
Stahlwerk Annahütte Max Aicher GmbH & Co. KG
Max-Aicher-Allee 1+2
83404 Hammerau

Zitieren Sie diesen Beitrag

Schiller, A. (2024) *Einflussfaktoren von Verankerungssystemen auf den CO₂-Fußabdruck am Beispiel einer Bodenvernagelung*. geotechnik 47, H. 1, S. 29–36.
<https://doi.org/10.1002/gete.202300022>