



- Zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe
- Baugrundrisiko in der Geotechnik – Rechtliche Betrachtung
- Numerische Untersuchung hochzyklisch belasteter Kaimauern
- Baugrube und Gründung im Giessenareal
- Neue Einflussgrößendiagramme zu Verschleiß und Verklebung

Nachhaltige Stützkonstruktionen mit Geobaustoffen im Verkehrswegebau

Bei der Planung von Verkehrswegen müssen Geländesprünge häufig auf engem Raum gesichert werden. Klassische Bauweisen wie Stahlbeton-Winkelstützmauern sind hierfür etabliert und normativ gut beschrieben. Gleichzeitig gewinnen geobaustoffbewehrte Erdkonstruktionen zunehmend an Bedeutung. Sie können nach dem Stand der Technik ausreichend tragfähig und gebrauchstauglich bemessen werden und stellen zugleich ressourcenschonende sowie wirtschaftliche Alternativen zu konventionellen Bauweisen dar.

Für eine fundierte Bewertung reicht ein rein statisch-konstruktiver Vergleich jedoch nicht aus. Neben Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind heute insbesondere Nachhaltigkeit, Baukosten, Bauzeit sowie die Sicherheit und Robustheit der Ausführung maßgebend.

Im Folgenden werden beide Bauweisen anhand eines beispielhaften Stützbauwerks gegenübergestellt. Grundlage ist eine vergleichende Ökobilanzierung und wirtschaftliche Bewertung für einen neu zu errichtenden Eisenbahndamm. Betrachtet wurde ein 100 m langes Stützbauwerk mit 4,0 m Höhe und einer angesetzten Lebensdauer von mindestens 50 Jahren. Verglichen wurden eine geogitterbewehrte Stützkonstruktion und eine Stahlbeton-Winkelstützmauer, jeweils unter denselben Einwirkungen und unter Berücksichtigung bahnspezifischer Anforderungen. Die Bemessung erfolgte für die geogitterbewehrte Konstruktion nach Ril 836, EBGeo und DIN 1054; für die Winkelstützmauer nach Ril 836, DIN 1054 und DIN 4085. Die vollständigen Randbedingungen und Ergebnisse können Wittl et al. (2024) entnommen werden.

1. Nachhaltigkeit und Ökologie

Die ökologische Bewertung erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044 und DIN EN 15804. Bilanziert wurden die Lebenszyklusphasen A1–A3 (Rohstoffbereitstellung, Transport & Herstellung), A4 (Transport zur Baustelle), A5 (Bauausführung) sowie C1–C4 (Rückbau bis Entsorgung). Zusätzlich wurde Modul D berücksichtigt, um Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen, beispielsweise Recyclingpotenziale oder Energierückgewinnung durch z. B. thermische Verwertung, abzubilden. Die Nutzungsphase B1–B7 wurde nicht gesondert betrachtet, da für beide Varianten bei gleicher Funktion und gleicher angesetzter Lebensdauer keine wesentlichen Unterschiede erwartet wurden.

Die Ergebnisse zeigen deutliche ökologische Vorteile der geogitterbewehrten Stützkonstruktion. Im Vergleich zur Stahlbeton-Winkel-

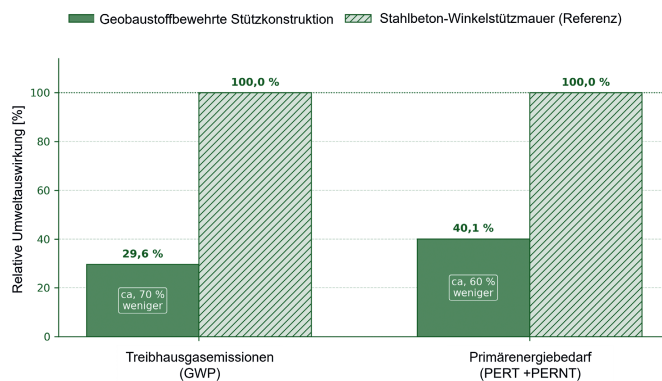


Bild 2 Vergleich der Treibhausgasemissionen und des Primärenergiebedarfs, normiert auf 100 % für die Stahlbeton-Winkelstützmauer

stützmauer können die Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential = GWP) um rund 70 % reduziert werden. Auch beim Primärenergiebedarf (erneuerbar: PERT, nicht erneuerbar: PENRT) ergibt sich ein Einsparpotenzial von etwa 60 %.

Ursächlich ist vor allem der unterschiedliche Materialeinsatz. Bei der Winkelstützmauer werden große Mengen Beton und Bewehrungsstahl benötigt. In der Herstellungsphase entstehen dadurch hohe Treibhausgasemissionen; der Beton verursacht in dieser Phase den größten Anteil der Emissionen. Bei der geogitterbewehrten Konstruktion liegen die wesentlichen Umweltwirkungen stärker im Bereich des mineralischen Füllmaterials und der späteren Entsorgung. Insgesamt bleibt die Belastung jedoch deutlich geringer, da auf massive Stahlbetonbauteile weitgehend verzichtet werden kann.

Ein weiterer Vorteil hinsichtlich der Ressourceneffizienz liegt in der Konstruktionsweise: Geobaustoffbewehrte Erde nutzt Boden als tragenden Baustoff und ergänzt ihn gezielt durch hochzugfeste Bewehrungslagen. Dadurch entsteht eine konstruktiv wirksame Kombination aus lokal verfügbaren mineralischen Baustoffen und vergleichsweise leichten, industriell hergestellten Geobaustoffen. Gerade unter dem Gesichtspunkt der Ressourcenschonung ist dieser Materialansatz interessant, da die erforderliche Tragfähigkeit nicht primär über große Betonquerschnitte, sondern über Verbundwirkung zwischen Boden und Geobaustoff-Bewehrungslagen erreicht wird.

Gleichzeitig ist eine differenzierte Betrachtung notwendig. Die Umweltwirkung geobaustoffbewehrter Systeme hängt unter ande-

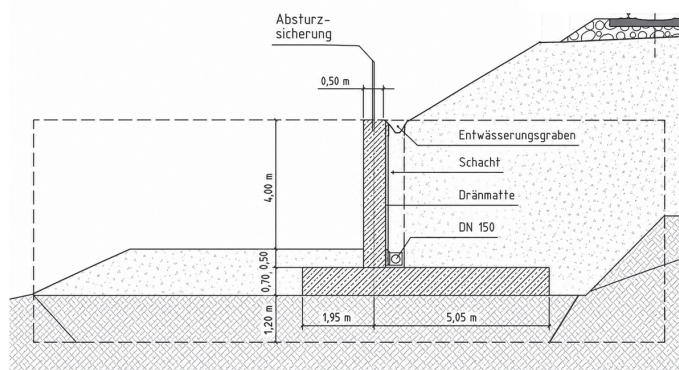
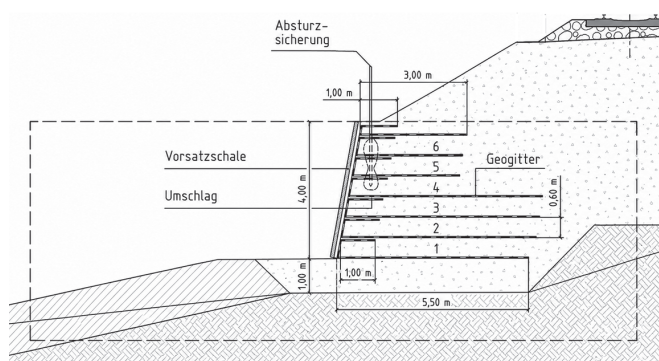


Bild 1 Regelquerschnitte der beiden untersuchten Varianten: Geogitterbewehrte Stützkonstruktion (links) und Stahlbeton-Winkelstützmauer (rechts)

rem von Transportentfernungen, verfügbaren Füllböden, Entsorgungskonzepten und der Qualität der Planung ab. Sensitivitätsanalysen zeigen jedoch, dass die grundsätzliche ökologische Vorteilhaftigkeit der geogitterbewehrten Bauweise auch bei veränderten Transportentfernungen erhalten bleibt.

2. Kosten und Wirtschaftlichkeit

Neben der Ökobilanz wurde eine orientierende Grobkostenschätzung innerhalb der definierten Systemgrenzen durchgeführt. Für das 100 m lange Stützbauwerk ergaben sich Baukosten von rund 350.000 € für die geogitterbewehrte Stützkonstruktion und rund 770.000 € für die Stahlbeton-Winkelstützmauer. Bezogen auf den laufenden Meter entspricht dies etwa 3.500 €/m gegenüber etwa 7.700 €/m. Damit lagen die Baukosten der geogitterbewehrten Variante im betrachteten Beispiel um rund 59 % unter denen der Winkelstützmauer.

Die Gründe liegen insbesondere im geringeren Anteil kostenintensiver Baustoffe und Bauprozesse. Bei der Winkelstützmauer fallen hohe Kosten für Beton, Bewehrungsstahl, Schalung, Abdichtung, Schutzlagen sowie für ein größeres Gründungspolster an. Zusätzlich erfordert die massive Bauweise größere Aushub- und Rückverfüllmengen. Die geogitterbewehrte Stützkonstruktion benötigt dagegen vor allem Verfüllmaterial, Geogitter, eine geeignete Außenhaut sowie kleinere Mengen Stahlbauteile, beispielsweise für konstruktive Details oder Absturzsicherungen.

Besonders aussagekräftig wird der Vergleich, wenn neben den Baukosten auch Umweltkosten berücksichtigt werden. Auf Basis der Wertfaktoren des Umweltbundesamtes für Treibhausgasemissionen sowie der Umweltkosten für Gütertransporte wurden die Baukosten um monetarisierte Umweltwirkungen ergänzt. Auch in dieser Gesamtkostenbetrachtung bleibt die geogitterbewehrte Stützkonstruktion deutlich günstiger. Bei einer Bewertung mit Fokus auf zukünftige Generationen ergaben sich Gesamtkosten von rund 483.000 € für die geogitterbewehrte Konstruktion gegenüber rund 1,176 Mio. € für die Winkelstützmauer. Die Gesamtkostendifferenz lag damit bei rund 59 %. Die Umweltkosten selbst lagen bei der geogitterbewehrten Variante um etwa 67 % niedriger.

Damit zeigt der Vergleich: Die ökologisch günstigere Lösung ist im untersuchten Fall zugleich die wirtschaftlichere Lösung. Dieser Punkt ist für die Praxis wesentlich, da nachhaltigere Bauweisen häufig mit höheren Investitionskosten in Verbindung gebracht werden. Das betrachtete Beispiel zeigt hingegen, dass ressourcenschonende Bauweisen auch bei den direkten Baukosten erhebliche Vorteile bieten können.

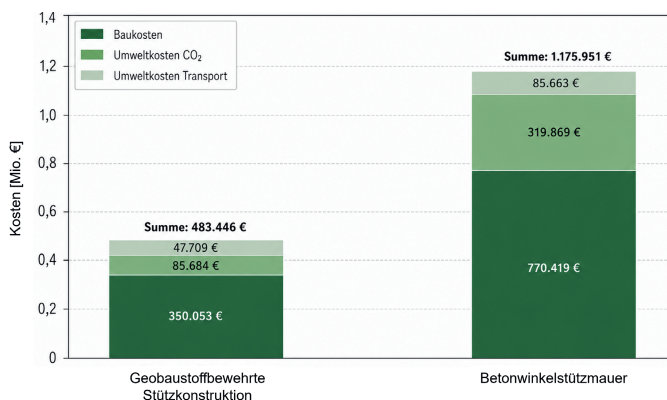


Bild 3 Gegenüberstellung der Baukosten und der Gesamtkosten einschließlich monetarisierten Umweltkosten

3. Bauzeit und Sicherheit der Ausführung

Auch ausführungstechnisch unterscheiden sich beide Bauweisen deutlich. Stahlbeton-Winkelstützmauern sind material- und prozessintensiv. Sie erfordern Aushub, Gründungspolster, Sauberkeitsschicht, Schalung, Bewehrung, Betonage, Aushärtungszeiten, Abdichtung, Schutzlagen und anschließende Hinterfüllung. Dadurch entstehen mehrere aufeinanderfolgende Arbeitsschritte mit entsprechenden Abhängigkeiten. Witterung, Betonierfenster, Qualitätssicherung des Betons, Schalungsarbeiten und Arbeitssicherheit beim Umgang mit schweren Bauteilen beeinflussen Bauzeit und Ausführungsrisiken.

Geogitterbewehrte Stützkonstruktionen werden dagegen lagenweise hergestellt. Der Bauprozess besteht im Wesentlichen aus Planum, Verfüllung, Verdichtung, Einbau der Bewehrungslagen und Ausbildung der Front. Dieser zyklische Ablauf ist gut kontrollierbar, lässt sich mit üblichen Erdbaumaschinen ausführen und kann häufig zügig an den Baufortschritt angepasst werden. Durch den weitgehenden Verzicht auf Schalung, Betonage und lange Aushärtungszeiten können Bauzeit und Bauablauf vereinfacht werden. Dies ist insbesondere bei Verkehrswegeprojekten relevant, bei denen Sperrpausen, Bauphasenplanung und Logistik einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben.

Eine vergleichende Abschätzung der Bauzeiten beider Varianten zeigt unter Berücksichtigung sämtlicher Bauphasen einen deutlichen zeitlichen Vorteil der geobaustoffbewehrten Stützkonstruktion. Für deren Herstellung werden einschließlich der Baustelleneinrichtung und -räumung etwa 20 Arbeitstage veranschlagt, während für die konventionelle Betonwinkelstützmauer rund 55 Arbeitstage erforderlich sind. Auf Grundlage dieser Angaben ergibt sich für die Geobaustofflösung eine ca. 64%-ige Verkürzung der Bauzeit. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den in der Fachliteratur dokumentierten Erfahrungen aus vergleichbaren Bauvorhaben (Al-Rawi, 2017).

Der höhere Zeitbedarf der Betonwinkelstützmauer ist insbesondere auf die zusätzlichen, technologisch aufeinander abgestimmten Arbeitsschritte des Stahlbetonbaus zurückzuführen. Hierzu zählen die Herstellung der Bewehrung und Schalung, die abschnittsweise Betonage, die Erhärtung und Nachbehandlung des Betons sowie die anschließende Abdichtung und Hinterfüllung der Konstruktion. Bei der geogitterbewehrten Stützkonstruktion entfallen demgegenüber insbesondere die betonbaubedingten Arbeitsgänge und Wartezeiten. Darüber hinaus weist die Bauzeitenanalyse für die konventionelle Betonwinkelstützmauer im Mittel einen etwa doppelt so hohen Personaleinsatz auf. Die geogitterbewehrte Bauweise ermöglicht somit nicht nur eine Verkürzung der Gesamtbauzeit, sondern auch einen effizienteren Einsatz der personellen Ressourcen auf der Baustelle.

Bei der Stahlbeton-Winkelstützmauer führte der Nachweis der Gleitsicherheit zu zusätzlichen Erdarbeiten und daraus resultierend zu einem größeren Gründungspolster. Dieser Mehraufwand wirkt sich sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich ungünstig aus.

Aus Sicht der Ausführungssicherheit bietet die geogitterbewehrte Bauweise weitere Vorteile. Die Konstruktion ist vergleichsweise verformungsverträglich und kann Setzungen in vielen Fällen robuster aufnehmen als starre Stahlbetonbauwerke. Gleichzeitig ist die Qualität der Ausführung entscheidend: Verfüllmaterial, Verdichtungsgrad, lagenweiser Einbau, Geogitterausrichtung, Überlappungen, Anschlüsse und Frontausbildung müssen fachgerecht geplant, ausgeschrieben und überwacht werden. Nachhaltigkeit entsteht hier nicht allein durch die Wahl des Baustoffs, sondern durch das Zu-

sammenspiel von Planung, Bemessung, Bauausführung und Qualitätssicherung.

4. Personalaufwand

Aufbauend auf der in Kapitel 3 beschriebenen Bauzeitdifferenz lässt sich der Personalaufwand beider Bauweisen auch auf Ebene einzelner Arbeitsphasen abschätzen. Grundlage sind die Mengen aus der zugrunde liegenden Ökobilanzierung sowie in der Baubetriebslehre dokumentierte Aufwandswerte, die den für eine Leistungseinheit erforderlichen Personalaufwand in Stunden angeben (Ahmed, 2022; Weiss, 2010).

Bei der geogitterbewehrten Stützkonstruktion entfällt der weit überwiegende Teil des Personalaufwands auf die Herstellung des bewehrten Erdkörpers, also auf Verfüllung, Verdichtung, Geogittereinbau und Frontausbildung, sowie auf die vorgelagerten Erdarbeiten. Zusammen machen diese beiden Arbeitsschritte rund 97 % des Gesamtaufwands aus, während auf die Absturzsicherung mit rund 28 Personenstunden nur ein geringer Anteil entfällt. Dieser Ablauf lässt sich mit üblichen Erdbaumaschinen in einem durchlaufenden Arbeitszyklus mit einer durchgehend besetzten, rund siebenköpfigen Kolonne ausführen.

Bei der Winkelstützmauer verteilt sich der Aufwand dagegen auf die drei Bauleistungen Schalung, Bewehrung und Beton. Anders als bei der kostenseitigen Betrachtung, bei der die Schalung den größten Anteil ausmacht, bindet zeitlich vor allem die Bewehrung den größten Personalaufwand, da das Verlegen von Betonstahl vergleichsweise personalintensiv ist (Hofstadler, 2011; Ahmed, 2022). Rechnet man diesen Aufwand mit den in Kapitel 3 genannten Bauzeiten in eine mittlere Kolonnenstärke zurück, ergibt sich für den reinen Betonbauteil ein Wert von rund 7 bis 16 Personen – deutlich mehr als die für den gesamten Bauablauf der geogitterbewehrten Stützkonstruktion. Ursächlich hierfür ist das bei Ortbetonwänden übliche taktversetzte Zusammenwirken mehrerer Kolonnen für Schalung, Bewehrung und Betonage.

Für die Praxis bedeutet dies, dass bei der Personal- und Terminplanung von Winkelstützmauern mehrere parallel arbeitende Gewerke zu berücksichtigen sind, während bei geogitterbewehrten Stützkonstruktionen eine kleinere, durchgehend eingesetzte Kolonne ausreicht.

Dieser Zusammenhang ergänzt die in Kapitel 3 dargestellte Bauzeitanalyse um eine personalwirtschaftliche Perspektive. Wird die Konstruktion alternativ in Fertigteilbauweise ausgeführt, kann die

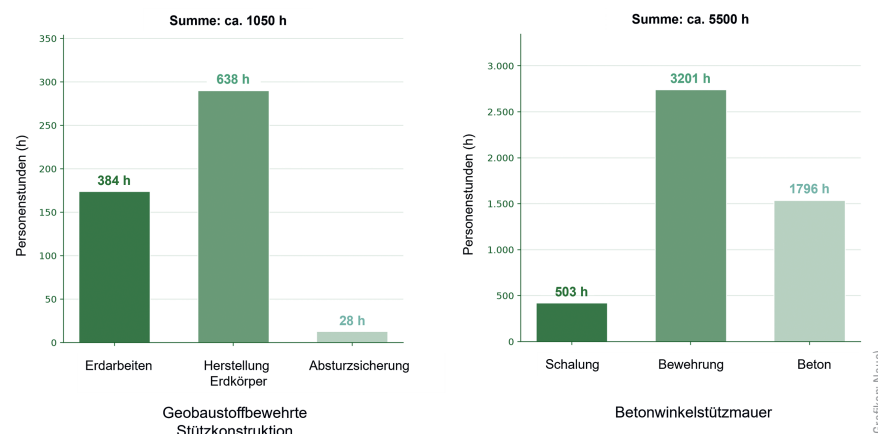


Bild 4 Gegenüberstellung des Personalaufwandes beider Konstruktionsvarianten

Bauzeit der Betonlösung etwa um 25–30 % reduziert werden, da insbesondere die erforderlichen Aushärtezeiten auf der Baustelle entfallen. Ein Teil des personellen Aufwands verlagert sich dabei in das Fertigteilwerk. Gleichzeitig kann der Gesamtaufwand sinken, da standardisierte Systembauteile eingesetzt werden und aufwendige temporäre Hilfskonstruktionen, insbesondere Schalungen und weitere Baubehelfe, auf der Baustelle weitgehend entfallen. Der Vorteil der Geobastofflösung hinsichtlich des erforderlichen Personaleinsatzes bleibt jedoch auch gegenüber einer Fertigteilbauweise deutlich bestehen.

Bild 4 stellt den Personalaufwand beider Bauweisen je Arbeitsphase gegenüber. Da die zugrunde gelegten Aufwandswerte überwiegend aus dem Hochbau stammen und den bei einem gleichförmigen, 100 m langen Bauwerk zu erwartenden Wiederholungseffekt nicht vollständig abbilden, sind die Werte als Orientierungsgrößen zu verstehen. Sie bestätigen jedoch die in Kapitel 3 beschriebene, deutlich einfachere und personalreduzierende Bauausführung der geogitterbewehrten Stützkonstruktion.

5. Fazit

Der Vergleich zeigt, dass geogitterbewehrte Stützkonstruktionen bei geeigneten Randbedingungen eine technisch gleichwertige, ökologisch vorteilhafte und wirtschaftlich attraktive Alternative zu Stahlbeton-Winkelstützmauern darstellen können. Im betrachteten Beispiel wurden gegenüber der Winkelstützmauer ca. 70 % der Treibhausgasemissionen, 60 % des Primärenergiebedarfs, 59 % der Baukosten und 64 % der Bauzeit bei der Geobastofflösung eingespart. Unter Einbeziehung monetarisierter Umweltkosten verstärkt sich der Vorteil zusätzlich.

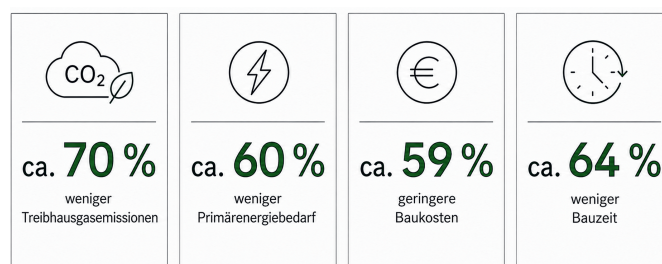


Bild 5 Ökologischer und ökonomischer Vergleich der betrachteten Bauweisen

Entscheidend ist jedoch, dass beide Bauweisen projektbezogen bewertet werden. Baugrund, verfügbare Flächen, zulässige Verformungen, Anforderungen an die Frontgestaltung, Verfügbarkeit geeigneter Füllböden, Transportentfernungen und Bauablauf können das Ergebnis beeinflussen. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen dennoch deutlich: Geobastoffbewehrte Erde ist nicht nur eine alternative Lösung zu konventionellen Bauweisen für beengte oder schwierige Situationen, sondern eine leistungsfähige Bauweise, die einen wichtigen Beitrag zu ressourcenschonendem und wirtschaftlichem Bauen im Verkehrswegebau leisten kann.

Gerade vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an Klimaschutz, Ressourceneffizienz und Baukostenstabilität sollten geobastoffbewehrte Stützkonstruktionen daher frühzeitig in Variantenvergleichen berücksichtigt werden. Nachhaltiges Bauen beginnt nicht

erst bei der Baustoffwahl, sondern bereits bei der Entscheidung, welche Konstruktionsweise mit möglichst geringem Ressourceneinsatz eine dauerhaft sichere Funktion erfüllt.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT) *Empfehlungen für den Entwurf und die Bewehrung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen – EB GEO*. Berlin: Ernst & Sohn, 2010.
- [2] Deutsches Institut für Normen e.V. (2021-04) *DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [3] Deutsches Institut für Normen e.V. (2017-08) *DIN 4085: Baugrund – Berechnung des Erddrucks*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [4] Deutsches Institut für Normen e.V. (2021a) *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 1404:2006 + Amd 1:2020)*; Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [5] Deutsches Institut für Normen e.V. (2021b) *DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020)*; Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2008 + A2:2020. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [6] Deutsches Institut für Normen e.V. (2022) *DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*; Deutsche Fassung EN 15804:2012 + A2:2019 + AC:2021. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [7] Göbel, K., Lieberenz, K., Weisemann, U. (Hrsg.) (2022) *Handbuch Erdbauwerke der Bahnen*. Leverkusen: GRT Global Rail Academy and Media GmbH.
- [8] DB InfraGO AG (2022) Ril 836: *Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten*.
- [9] Wittl, T., Klügel, S., Vollmert, L. & Ehrenberg, H. (2024) *Vergleichende Ökobilanzierung und wirtschaftliche Bewertung von Stützkonstruktionen am Beispiel eines Eisenbahndammes*. Tagungsband zur 38. Baugrundtagung 2024, Bremen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Essen.
- [10] Al-Rawi, O. (2017) *Cost Evaluation and Management for Adopting Reinforced Earth Retaining Structures in Jordan*, Civil & Environmental Research, Volume 9, No. 9, ISSN 2224-5790.
- [11] Ahmed, F. (2022) *Baubetriebliche Rahmenbedingungen, Gegenüberstellung und Wirtschaftlichkeitsanalyse zwischen Betonfertigteiltbau und Ort betonbauweise anhand von Decken- und Wandsystemen im Hochbau*. Masterarbeit, Technische Universität Wien.
- [12] Weiss, M. (2010) *Kennzahlen für Stahlbetonarbeiten – Anwendung bei Hochbauprojekten*. Diplomarbeit, Technische Universität Graz.
- [13] Hofstadler, C. (2011) *Kalkulation von Stahlbetonarbeiten*. Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft, Technische Universität Graz.
- [14] Lieberenz, K., Großmann, S. & Göbel, C. (2013) *Geogitterbewehrte Stützkonstruktionen im Eisenbahnbau*. Vortrag, HTW Dresden.

www.naue.com