

Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

FA 5.194

Forschungsstelle: Technische Universität München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), MPA BAU (Prof. Dr.-Ing. C. Gehlen)

Bearbeiter: Birle, E. / Henzinger, C. / Barka, E.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: November 2018

1 Ausgangssituation

Als Bankett (unbefestigter Seitenstreifen) wird im Straßenbau jener Bereich des Straßenquerschnitts verstanden, der an der Außenseite des befestigten Fahrbahnbereichs oder des Standstreifens anschließt. Dieser Streifen hat vor allem zwei Funktionen: a) die Ableitung von Verkehrslasten, wenn Fahrzeuge vom befestigten Teil der Fahrbahn abkommen, und b) die Weiterleitung des von der befestigten Fahrbahn abfließenden Oberflächenwassers in den Böschungsbereich sowie die gleichzeitige Rückhaltung von Schadstoffen aus diesen Wässern bei der Passage der Bankettoberfläche. Auch aufgrund zweier Forschungsarbeiten (FE 05.0177/2012/MRB, FE 05.0160/2010/MGB) ist im Zusammenhang mit der aktuellen Fassung der ZTV E-StB 17 als Bankettmaterial nun ein gemischtkörniges Material der Bodengruppe GU oder GT nach DIN 18196 mit einem Feinkornanteil zwischen 8 und 12 M.-% vorgesehen. Allerdings wurden im Rahmen der genannten Forschungsprojekte keine sandreichen Bankettmaterialien untersucht. Die erarbeiteten Ergebnisse waren außerdem nur für den Zustand unmittelbar nach Einbau aussagekräftig. Welche Tragfähigkeitswerte auf diesen Materialien nach Bewitterung erreicht werden können, war bisher noch ungeklärt. Ebenso bestanden Fragen dazu, wie die Tragfähigkeit der Bankette in der Praxis nachgewiesen werden kann. In diesem Zusammenhang war zu klären, welchen Einfluss die Querneigung des Banketts von 6 beziehungsweise 12 % auf die Ergebnisse des statischen und dynamischen Plattendruckversuchs hat.

2 Laborversuche zu sandreichen Bankettbaustoffen

2.1 Untersuchungskonzept

Im Rahmen von Laborversuchen wurden typische Bankettmaterialien der Bodengruppen GU und GT (Feinkornanteile vorrangig 8 bis 12 M.-%) in Bezug auf ihre Verdichtungseigenschaften, ihre Tragfähigkeit (CBR) und ihre Durchlässigkeit im Verdichtungsoptimum untersucht. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf sandreiche Mischungen gelegt. Zur Beurteilung des Einflusses einer Bewitterung auf die Tragfähigkeit wurden die CBR-Versuche vergleichend an Proben direkt nach Verdichtung durchgeführt, aber auch an Proben, die vor den CBR-Versuchen Nass-Trocken-Wechseln (beziehungsweise Nasslagerung) oder Frost-Tau-Wechseln unterzogen worden waren.

2.2 Material

Die Basismaterialien für die Herstellung der Versuchskörnungen wurden in Anlehnung an die Untersuchungen in FE 05.0177/2012/MRB ausgewählt. Zusätzlich wurde gemischtes RC-Material aus Bauschutt in die Untersuchungen mit aufgenommen. Als grobkörnige Bestandteile für die Mischungen wurden also gewählt: a) gebrochene Gesteinskörnung, b) gebrochener RC-Beton sowie c) gebrochener RC-Mix. Als feinkörnige Materialien für die Mischungen wurden gewählt: a) ein leicht plastischer Ton mit mindestens 70 % Schluffanteil (TL gem. DIN 18196) sowie ein ausgeprägt plastischer Ton (TA/OT gem. DIN 18196). Um die angestrebten Versuchskörnungen zu erhalten, wurden diese Materialien in unterschiedlichen Anteilen gemischt. Die Feinanteile der so erhaltenen Materialien bewegen sich, wie vorgesehen, im Bereich leicht unter bis leicht über 10 M.-%. Insgesamt sind die Mischungen mit Anteilen < 2 mm zwischen etwa 35 und 60 M.-% als sandreich zu bezeichnen.

2.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche zur Wasserdurchlässigkeit (DIN 18130-1) von im Optimum verdichteten Proben (DIN 18127) sind zusammenfassend in Bild 1 dargestellt, wobei die Ergebnisse von FE 05.0177/2012/MRB einbezogen wurden. Bei der Betrachtung der Umhüllenden der Daten ist erkennbar, dass die in den ZTV E-StB 17 geforderte schwache Durchlässigkeit (entspricht nach DIN 18130-1 einer Vorgabe von $k < 1 \cdot 10^{-6}$ m/s) bei den genannten Bodengruppen etwa zwischen 6 und 15 M.-% Feinkornanteil erreichbar ist. Bei näherer Betrachtung zeigt Bild 1 mit Ausnahme weniger Datenpunkte, dass die geforderte Durchlässigkeit von nahezu allen Materialien ab 10 M.-% eingehalten wird. Anhand der vorliegenden Daten kann festgestellt werden, dass für Bankettbaustoffe nach ZTV E-StB 17 keine systematische Beeinflussung der Durchlässigkeit aufgrund des Anteils < 2 mm zu befürchten ist. In Bezug auf die Abhängigkeit der Durchlässigkeit vom Feinkornanteil kann zusätzlich festgestellt werden, dass für die untersuchten Materialien insgesamt keine systematischen Unterschiede zwischen den Bodengruppen GU und GT identifiziert werden konnten (nicht dargestellt).

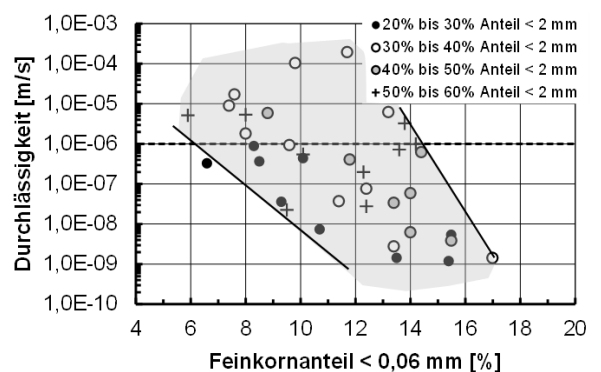


Bild 1: Durchlässigkeit aller Mischungen (inklusive Daten von FE 05.0177/2012/MRB), getrennt für Böden mit unterschiedlichen Anteilen an Material < 2 mm

An den Versuchsmischungen wurden außerdem jeweils drei Tragfähigkeitsversuche direkt nach Verdichtung (CBR_0), jeweils drei Tragfähigkeitsversuche nach sechs Nass-Trocken-Wechseln beziehungsweise mehrtägigem Einstau (CBR_{NT}) und jeweils drei Tragfähigkeitsversuche nach sechs Frost-Tau-Wechseln (CBR_{FT}) durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten gemäß TP BF-StB, Teil B 7.1 und wurden an der Unterseite von Proben durchgeführt, die jeweils im Verdichtungs optimum (Verdichtung mit Proctorenergie) hergestellt wurden. In Bild 2 und 3 ist die Änderung der Tragfähigkeit durch Bewetterung in Form von Nass-Trocken-Wechseln ($\Delta CBR_{NT} = CBR_{NT} - CBR_0$) und Frost-Tau-Wechseln ($\Delta CBR_{FT} = CBR_{FT} - CBR_0$) dargestellt. Es lässt sich dabei weder für die Materialien mit Größtkorn 8 mm noch für die Materialien mit Größtkorn 32 mm eine ausgeprägte Abhängigkeit der Werte vom Sandanteil feststellen. Die Dauerhaftigkeit der untersuchten Materialien im Sinne der Tragfähigkeitsänderung durch Bewetterung ist außerdem, wenn überhaupt, wohl nur in untergeordnetem Maße von der Bodengruppe (GU oder GT) und dem Feinkornanteil abhängig (nicht dargestellt). Bankettmaterialien mit Recyclingmaterial im Grobkorn verhalten sich aufgrund des Verfestigungspotenzials bei der Untersuchung im Labor allerdings günstiger als Bankettbaustoffe aus natürlichen Materialien.

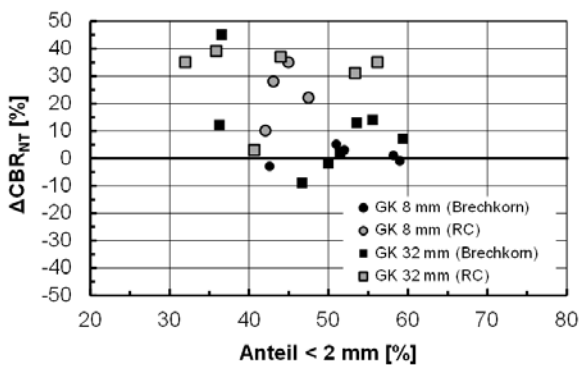


Bild 2: Änderung der Tragfähigkeit (ΔCBR_{NT}) aller Mischungen nach sechs Nass-Trocken-Zyklen (beziehungsweise mehrtägigem Einstau)

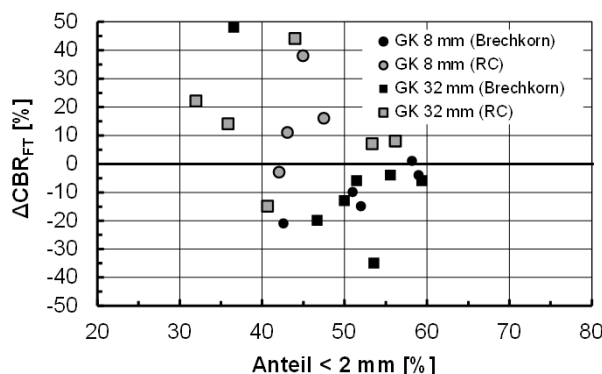


Bild 3: Änderung der Tragfähigkeit (ΔCBR_{FT}) aller Mischungen nach sechs Frost-Tau-Zyklen

¹ Verdichtungsgrade direkt nach Verdichtung: Kalksteinschotter 0/32 mm – D_{Pr} = 94 bis 98 %, RC-Mix 0/32 mm – D_{Pr} = 96 bis

2.4 Folgerungen und Empfehlungen

Die Laboruntersuchungen zur dauerhaften Tragfähigkeit (Nass-Trocken-Wechsel und Frost-Tau-Wechsel) und Durchlässigkeit von sandreichen Bankettbaustoffen nach ZTV E-StB 17 haben die im Regelwerk definierten Anforderungen an Baustoffe (inklusive Angaben zum Feinkornanteil) und den Verdichtungsgrad bestätigt. Aus derzeitiger Sicht sind keine zusätzlichen Anforderungen oder Anpassungen zu den Vorgaben erforderlich.

3 Feldversuche zur dauerhaften Tragfähigkeit

3.1 Untersuchungskonzept

In einem Feldversuch wurden mit vier Bankettmaterialien Versuchsfelder angelegt (verdichtet in zwei Lagen mit je etwa 30 cm) und über den Winter 2017/2018 versuchstechnisch begleitet. Während dieses Zeitraums erfolgte zu vier Zeitpunkten die Beprobung der Felder unter anderem in Form von Dichtebestimmungen sowie statischen und dynamischen Plattendruckversuchen.

3.2 Material

Die in den Feldversuchen verwendeten Materialien wurden von einem Schotterwerk nahe Ingolstadt und von einem Recyclingunternehmen aus Dachau speziell auf die Anforderungen an Bankettbaustoffe nach den neuen ZTV E-StB 17 hergestellt. Es handelt sich einerseits um einen Kalksteinbruch der Kornklasse 0/32 mm und Kornklasse 0/8 mm sowie um ein Recyclingmaterial aus gemischtem Bauschutt in den Kornklassen 0/32 mm und 0/8 mm. Die Materialien wiesen im nicht-eingebauten Zustand Feinkornanteile hauptsächlich zwischen etwa 8 und 9 M.-% auf.

3.3 Ergebnisse

Der Vergleich der gemessenen Trockendichte¹ (Densitometer) der Felder in Bild 4 legt vor allem in der Frostperiode des Winters 2017/2018 (bis zum 3. Beprobungstermin) eine zumindest oberflächliche Auflockerung aller Materialien nahe. Zwischen dem 3. und 4. Beprobungstermin (nach der Frostphase, Frühsommer 2018) sind unter anderem zu dieser Auflockerung gegenläufige Tendenzen erkennbar, die auf eine Art "Selbstheilung" der aufgelockerten Oberflächen hindeuten.

Die an der verdichteten Oberfläche über die Zeit dokumentierten E_{V1} -Werte der Plattendruckversuche in Bild 5 zeigen, dass bei den natürlichen Materialien (Kalksteinschotter) die Tragfähigkeit bei Erstbelastung über die Frostphase (1. bis 3. Beprobungstermin) hinweg abnimmt. Nach der Frostphase (zwischen 3. und 4. Beprobungstermin) ist die Entwicklung unterschiedlich, tendenziell verbleiben die Werte aber auf einem ähnlichen Niveau. Die beiden Felder mit RC-Materialien zeigen in der Frostphase unterschiedliche Entwicklungen. Nach der Frostphase steigt aber auch der E_{V1} -Wert konsistent an. Es wird vermutet, dass die beobachtete Entwicklung mit den gegenläufigen Einflüssen aus tieferreichender Nachverfestigung und oberflächlicher, witterungsbedingter Auflockerung zu tun haben.

101 %, Kalksteinschotter 0/8 mm – D_{Pr} = 93 bis 100 %, RC-Mix 0/32 mm – D_{Pr} = 94 bis 100 %

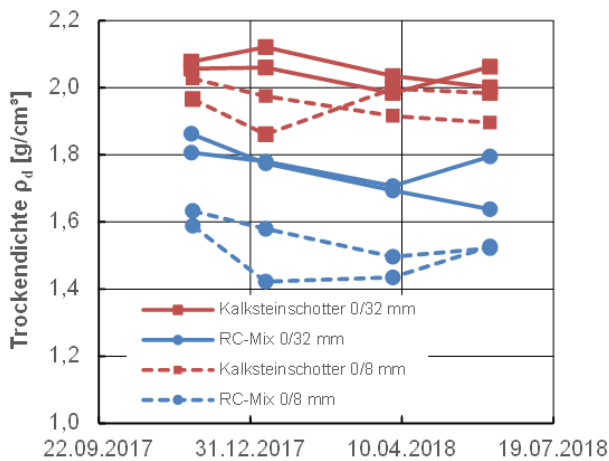


Bild 4: Trockendichte gemessen mit dem Densitometer über die Zeit

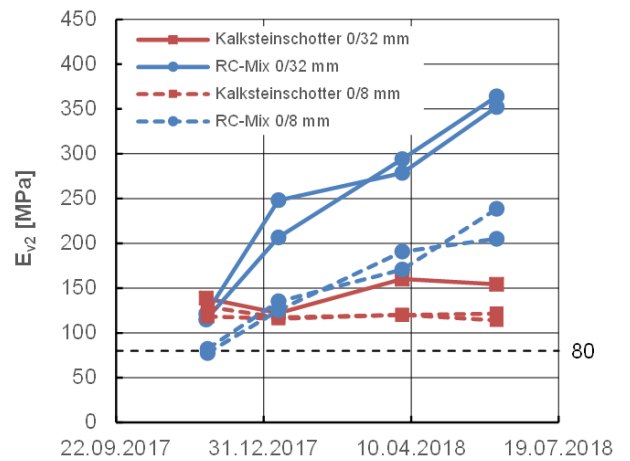


Bild 6: Verformungsmodul E_{V2} über die Zeit

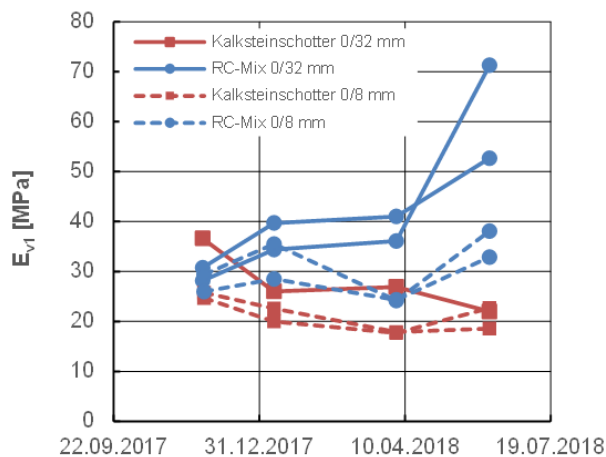


Bild 5: Verformungsmodul E_{V1} über die Zeit

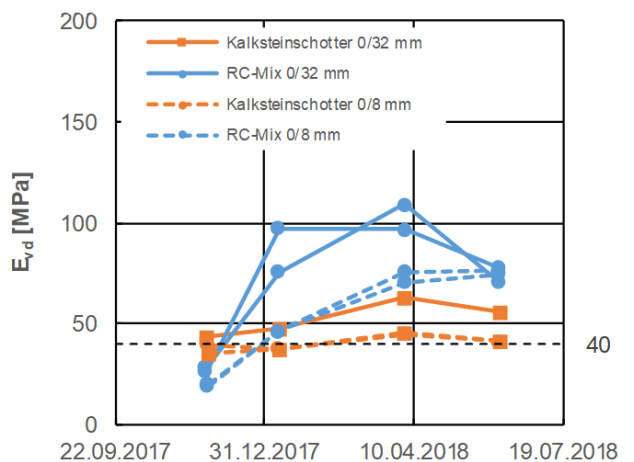


Bild 7: Verformungsmodul E_{Vd} über die Zeit

In Bild 6 sind die bei den Versuchsfeldern dokumentierten E_{V2} -Werte eingetragen. Es ist ersichtlich, dass die Anforderungswerte der ZTV E-StB 17 ($E_{V2} \geq 80$ MPa) bereits beim Einbau eingehalten werden können, teilweise liegen die Werte deutlich über den Anforderungswerten. Der Wiederbelastungsmodul E_{V2} der natürlichen Bankettmaterialien (Kalksteinschotter) bleibt nach Einbau nahezu unbeeinflusst von der Bewitterung konstant. Der Wiederbelastungsmodul der RC-Materialien (RC-Mix) steigt hingegen über die Beprobungstermine stark an und weist somit auf das Nachverfestigungspotenzial dieser Materialien hin.

Bild 7 zeigt die mit dem dynamischen Plattendruckversuch ermittelten E_{Vd} -Werte über die Zeit. Direkt nach Einbau entsprechen die dokumentierten Werte zumeist nicht den Anforderungen der ZTV E-StB 17 ($E_{Vd} \geq 40$ MPa). Die E_{Vd} -Moduln aller Materialien entwickeln sich allerdings über die Zeit hin zu höheren Werten beim 3. Beprobungstermin, woraufhin sie vor allem beim Kalksteinschotter 0/32 mm bis zum 4. Beprobungstermin wieder abfallen. Markant zeigt sich die Nacherhärtung beim RC-Mix. Warum die Verformungsmoduln über die Zeit aber nicht qualitativ ähnlich wie bei den statischen Plattendruckversuchen verlaufen (wie zu erwarten wäre), ist nicht geklärt.

3.4 Folgerungen und Empfehlungen

Die Felduntersuchungen haben bestätigt, dass der im Regelwerk formulierte Anforderungswert von $E_{V2} \geq 80$ MPa direkt nach Verdichtung eingehalten werden kann, der Anforderungswert $E_{Vd} \geq 40$ MPa aber überprüft werden sollte (für GU/GT voraussichtlich $E_{V2}/E_{Vd} > 2$). Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass die Tragfähigkeiten E_{V2} und E_{Vd} bei den verwendeten Bankettmaterialien über den Winter 2017/2018 erhalten blieben (oder anstiegen). Gleichzeitig sind oberflächliche Auflockerungen durchaus wahrscheinlich und spiegeln sich vor allem im E_{V1} -Wert wieder. Diese Auflockerungen sind für die Beurteilung einer Spurrillenbildung aufgrund des Abkommens eines Fahrzeugs von der Fahrbahn von besonderer Relevanz. Es sollte auch geprüft werden, ob gesonderte Regelungen für Bankette geringer Stärke und bei Tragfähigkeiten des Planums an der Untergrenze der zulässigen Werte sinnvoll sind, da in solchen Fällen die Steifigkeit des unterliegenden Materials die versuchstechnisch ermittelbare Steifigkeit an der Bankettoberfläche maßgeblich beeinflusst. Solche Regelungen könnten Maßnahmen zur Erhöhung der Tragfähigkeit des Untergrunds umfassen.

4 Nachweis der Verdichtung und Tragfähigkeit im Feld

4.1 Untersuchungskonzept

In Bezug auf die durch die planmäßige Querneigung von Straßenbanketten bedingten Schwierigkeiten beim Nachweis der Verdichtung und Tragfähigkeit im Feld wurden im Freifeldbereich des Zentrum Geotechnik der TUM statische und dynamische Plattendruckversuche an unterschiedlich stark geneigten Banketten (verdichtet in zwei Lagen mit je etwa 30 cm) durchgeführt.

4.2 Material

Das in den Feldversuchen verwendete Material wurde von einem Schotterwerk nahe Ingolstadt speziell auf die Anforderungen an Bankettbaustoffe nach den neuen ZTV E-StB 17 hergestellt. Es handelt sich um einen Kalksteinbruch der Kornklasse 0/32 mm (Bodengruppe GU, Feinkornanteil 7 bis 9 M.-%).

4.3 Ergebnisse

Feld 1 wurde in zwei Abschnitten, mit jeweils 6 und 12 % Neigung, hergestellt. Auf den so geneigten Flächen wurden statische und dynamische Plattendruckversuche durchgeführt, wobei die horizontale Prüfoberfläche entweder durch Abgrabung und Herstellung einer Sandausgleichsschicht (SA) oder durch Herstellung eines Sandkeils (SK) erfolgte. Dynamische Plattendruckversuche wurden auch auf der geneigten Oberfläche (oSA) durchgeführt.

Die Ergebnisse der statischen Plattendruckversuche an Feld 1 sind in Bild 8 zusammengefasst. Die Darstellung zeigt, dass die Durchführung der statischen Plattendruckversuche auf einer abgegrabenen und horizontalen Fläche mit einer Sandausgleichsschicht im Vergleich zur einfacheren Durchführung auf einem Sandkeil zum Ausgleich der Bankettneigung offenbar in Bezug auf die E_V -Werte keine maßgeblichen Vorteile bringt.

Bild 9 zeigt die im dynamischen Plattendruckversuch ermittelten E_{Vd} -Werte. Die Durchführung der Versuche auf der ungestörten, geneigten Oberfläche (oSA) liefert höhere Steifigkeiten im Vergleich zum Verfahren mit Sandkeil (SK). Dies ist insbesondere bei der Neigung mit 12 % ersichtlich. Im Vergleich zu den Versuchen mit Sandkeil (SK) und den Versuchen auf der geneigten Oberfläche (oSA) führt die Herstellung einer horizontalen Prüfoberfläche mit der notwendigen Sandausgleichsschicht (SA bei 0 %) zu vergleichsweise niedrigen E_{Vd} -Werten.

Feld 2 wurde mit ebener Oberfläche aufgebaut, mit dem Zweck, den Einfluss einer Störung der Oberfläche durch eine Abgrabung zu simulieren. Die Erstbelastungs- (E_{V1}) und Wiederbelastungsmodul (E_{V2}) aus den statischen Plattendruckversuchen sind in Bild 10 dargestellt. Die Tragfähigkeit bei Wiederbelastung weist bei der Versuchsdurchführung auf der ungestörten Oberfläche (ohne Sandausgleichsschicht) konsistent höhere Werte gegenüber den Werten bei der Prüfung auf der gestörten Oberfläche (mit SA) auf. Für den Erstbelastungsmodul ergeben sich keine eindeutigen Tendenzen.

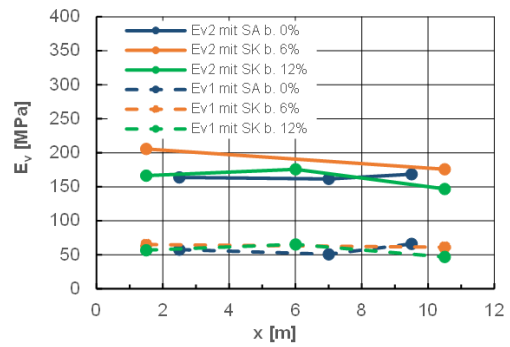


Bild 8: Erstbelastungs- (E_{V1}) und Wiederbelastungsmodul (E_{V2}) - Feld 1

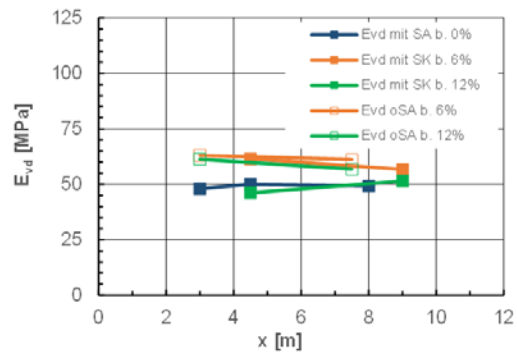


Bild 9: Verformungsmodul E_{Vd} - Feld 1

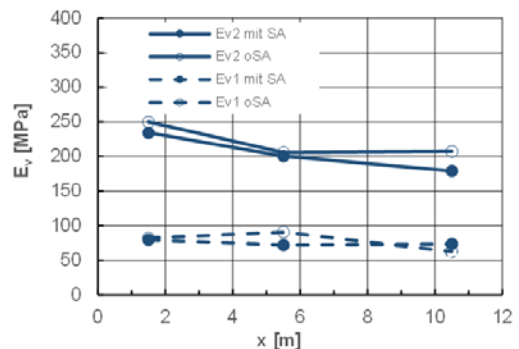


Bild 10: Erstbelastungs- (E_{V1}) und Wiederbelastungsmodul (E_{V2}) - Feld 2

4.4 Folgerungen und Empfehlungen

Bezüglich des Nachweises des geforderten Plattendruckmoduls auf den geneigten Bankettoberflächen kann Folgendes empfohlen werden: Die Prüfung der geneigten Oberfläche ist vorzuziehen. Dies ist beim dynamischen Plattendruckversuch nur bis zu einer Neigung von 6 % und beim statischen Plattendruckversuch nur bei Anpassung des Lastwiderlagers an die Bankettneigung möglich. Die beiden Ersatzverfahren, die Herstellung einer ebenen Prüfoberfläche durch Aufbringung eines Sandkeils beziehungsweise durch Abgrabung und Aufbringung einer Sandausgleichsschicht, sind nur unter bestimmten Bedingungen sinnvoll (die erreichbaren Werte liegen im Allgemeinen unter den tatsächlichen). Von den beiden Verfahren ist aus derzeitiger Sicht wohl das erste (Sandkeil) insgesamt mit weniger Nachteilen verbunden.