

HILLIG, J. und LIEBERENZ, K., Deutsche Reichsbahn, Reichsbahnbaudirektion, DDR

TRAGFÄHIGKEITSERHÖHUNG DURCH GEOTEXTILIEN IM EISENBahnUNTERBAU

GEOTEXTILE REINFORCEMENT OF A RAILROAD STRUCTURE

RENFORCEMENT D'UNE STRUCTURE DE VOIE FERREE PAR UNE NAPPE TEXTILE

Geotextilien müssen im Schichtsystem des Eisenbahnunterbaues zum Abbau der Spannungen und Verformungen aus der Betriebsbelastung beitragen und die Festigkeitseigenschaften der eingebauten Kiessande verbessern bzw. langfristig erhalten. Die Auswertung der Feldversuche von 1977 bis 1984 zeigt, daß die Tragfähigkeit eines Schichtsystems mit Vlies im Langzeitverhalten höher ist als ohne Vlies und daß mit sinkender Tragfähigkeit des Erdplanums der Einfluß des Vlieses zunimmt. Es wurde eine Modellvorstellung abgeleitet, nach der die Wirkung des Vlieses der aufliegenden Kiessandschicht zugeordnet wird und das Schichtsystem mit Vlies nach der Mehrschichttheorie bemessen werden kann.

1. Einleitung

Der Bahnkörper der Eisenbahnen wird durch statische und dynamische Belastungen aus dem Eisenbahnverkehr und der Witterung beansprucht. An vielen Streckenabschnitten ist der Eisenbahnunterbau nicht mehr in der Lage, die Belastungen aufzunehmen; es kommt zu Verformungen des Erdplanums und zu Tragfähigkeitsschäden.

Ursache hierfür sind die gestiegenen Verkehrsbelastungen, neue Oberbauformen und der Erhaltungszustand der Entwässerungseinrichtungen.

Zur Erhaltung bzw. Wiederherstellung der Stabilität der Gleislage wird der Bau funktionsfähiger Entwässerungsanlagen und, wo dies nicht ausreicht, die Sanierung des Eisenbahnunterbaues notwendig.

Diese Arbeiten sind mit einem hohen Bauaufwand verbunden und beeinträchtigen den Eisenbahnverkehr. Die bisherigen technischen Lösungen haben sich zudem insbesondere hinsichtlich der Filterstabilität nicht ausreichend bewährt, und die zur Verfügung stehenden Kiessande genügen mitunter nicht mehr den Anforderungen.

Geotextilien sind auf Grund ihrer Struktur und Eigenschaften in der Lage, einen Beitrag zur

- Trennung und Filtration von Lockergesteinen
- Entwässerung und Stabilisierung von Lockergesteinen
- Tragfähigkeit von Schichtsystemen

zu leisten.

Deshalb werden zur Rationalisierung der Bauprozesse und zur Erhöhung der Funktionssicherheit

Geotextiles placed in the layer system of the substructure of the track are supposed to help to decrease the tensions and deformations which result from operational loads and to improve or preserve the strength properties of the gravel sand placed in the substructure. The analysis of the field tests made in the years from 1977 to 1984 revealed that the load carrying capacity of a layer system with incorporated non-woven fabrics is higher in terms of long-time behaviour than that of systems without non-woven fabrics and that non-woven fabrics gain increased importance in cases of sub-grades with a lower load carrying capacity. Given this there was developed a model according to which the effect of non-woven fabrics was adjoined to the gravel sand layer lying upon it.

und Lebensdauer der Bahnanlagen seit 1974 bei der Deutschen Reichsbahn (DR) Geotextilien erprobt und eingesetzt.

In Entwässerungsanlagen des Bahnkörpers wurden verschiedene Gewebe, Gewirke und Vliese mit der Richtlinie (1) 1980 zugelassen. Danach können die Geotextilien bei fehlender Filterstabilität in der Kontaktzone zwischen dem anstehenden Lockergestein und dem Kiessand als Grabenfilter und in der Kontaktzone zwischen dem Kiessand und der Rohrperforation als Rohrfilter eingebaut werden. Ihre Öffnungsweite als Porenkenngröße O_{90} wird in Abhängigkeit vom anliegenden Lockergestein bemessen. Die Langzeituntersuchungen (2) über einen Beobachtungszeitraum von 5 bis 9 Jahren beweisen, daß Filter in Entwässerungsanlagen, die mit Geotextilien aufgebaut wurden, funktionssicher und erhaltungsarm sind. Die Wasserdurchlässigkeit ist gewährleistet, schädliche Kornumlagerungen (Erosion und Kolmation) werden ausgeschlossen und eine anfängliche Kontaktsuffosion wird gestattet. Negative Einflüsse durch Alterung wurden nicht festgestellt. Für die Bemessung der Öffnungsweite wird in Auswertung der Untersuchungen (2) ein neues Bemessungsdiagramm vorgeschlagen, nach dem das Verhältnis O_{90}/D_{50} in Abhängigkeit von der Ungleichförmigkeit zwischen den Grenzlinien für Erosion und Kolmation gewählt werden kann.

Als Element des Schichtsystems des Eisenbahnunterbaues wurden Vliese mit einer Richtlinie (3) 1981 zugelassen. Danach können Vliese auf dem Erdplanum in der Kontaktzone zwischen dem an-

stehenden Lockergestein und dem Schutzschicht- bzw. Bettungsmaterial eingebaut werden. Sie dienen als Trenn- und Filterelement zur Verhinderung schädlicher Kornumlagerungen und der gegenseitigen Durchdringung. Als Bewehrungselement behindern sie Verformungen der aufliegenden Schicht, nehmen Zugkräfte auf und beteiligen sich am Tragvermögen des Schichtsystems. Die Langzeituntersuchungen über einen Beobachtungszeitraum von 5 bis 8 Jahren beweisen die Eignung von Vliesen als Element des Schichtsystems im Eisenbahnunterbau. Dies gilt sowohl für die Einsatzfälle mit direkter Schotterauflage bei zwischenzeitlich wirkenden und vorbeugenden Maßnahmen als auch für den Einbau im Zusammenhang mit Schutzschichten aus Kies-sand.

Über einige ausgewählte Ergebnisse insbesondere zur Tragfähigkeitserhöhung von Schichtsystemen mit Vliesen soll berichtet werden.

2. Grundlagen der Tragfähigkeit des Schichtsystems

Im Tragsystem des Eisenbahnbaues übernimmt jedes Element (Schiene, Schwelle, Schotterbettung, Schutzschicht) einen differenzierten Anteil am Abbau der Belastung aus dem Eisenbahnverkehr. Die auftretenden Spannungen müssen für das Tragsystem insgesamt, aber auch bei jedem Element, von den gegebenen Festigkeiten aufgenommen werden. Die Verformung des Tragsystems darf die zulässigen Grenzwerte nicht überschreiten. Maßgebend für die Bemessung ist die Einhaltung der zulässigen Schienenspannung. Die dazu notwendige Tragfähigkeit des Schichtsystems anstehendes Lockergestein - Schutzschicht - Bettung setzt sich aus den Tragfähigkeitsanteilen der Schichten zusammen. Je geringer die Tragfähigkeit des anstehenden Lockergesteins ist, desto größer muß der Tragfähigkeitsanteil der einzubauenden Schichten sein. Maßgebend hierfür sind jeweils der spezifische Verformungsmodul des einzubauenden Materials und die Schichtdicke. Der Anteil der Bettung wird bei vorschriftengerechter Körnung des Schotters und Schichtdicke unter Schwellenunterkante sowie mittlerem Verschmutzungsgrad als konstant angesehen. Dem Kies- bzw. Stein-sand der Schutzschicht wird in gültigen Vorschriften ein konstanter spezifischer Verformungsmodul E_{ps} zugeordnet.

Als variable und beeinflussbare Größen verbleiben in den gültigen Vorschriften die Schichtdicke der Schutzschicht und die Tragfähigkeit des anstehenden Lockergesteins. Entsprechend kann nach TGL 24756/09 die Dicke der einzubauenden Schutzschicht aus Kiessand in Abhängigkeit der Mindesttragfähigkeit des Erdplannums bzw. unter Berücksichtigung einer Stabilisierung des anstehenden Lockergesteins mit Kalk bemessen werden.

Neu in das Schichtsystem einzubeziehende Elemente sollen sich diesen Wirkprinzipien anpassen. Sie müssen zum Abbau der Spannungen und Verformungen beitragen bzw. die Festigkeitseigenschaften der verwendeten Materialien verbessern und langfristig erhalten.

Geotextilien (speziell Vliese) sind relativ dünne, flexible, dehnfähige, gleichmäßige und strukturstabile Flächengebilde. Auf Grund be-

stimmter textilphysikalischer und geohydraulischer Parameter können sie folgende Einflüsse auf das Tragverhalten von Schichtsystemen nehmen:

- Trenn- und Filterwirkung
Das Geotextil verhindert ein Aufsteigen von Kornbestandteilen aus dem anstehenden Lockergestein in die Schutzschicht bzw. die Bettung. Dadurch bleiben die Materialien sauber, scherfest und damit tragfähig. Es kommt zu keinem Abfall des spezifischen Verformungsmoduls infolge Verunreinigung von unten; die Tragfähigkeit wird erhalten.
- Trennwirkung
Das Geotextil verhindert ein Vermischen (gegenseitige Durchdringung) des Kiessandes mit dem anstehenden Lockergestein und erhält einen klaren Schichtenaufbau, damit bleibt die wirksame Schichtdicke vorhanden und die Tragfähigkeit erhalten.
- Bewehrungswirkung
Das Geotextil wirkt eingespannt im Schichtsystem als Bewehrungselement der aufliegenden Schicht. Es behindert die Verformung der Schicht, nimmt Zugkräfte auf und erhöht die Tragfähigkeit der Schicht.

Diese Einflüsse auf das Tragverhalten treten nicht getrennt auf; sie drücken sich insgesamt in einem erhöhten Verformungsmodul an der Oberkante der aufliegenden Schicht und in einer höheren Langzeitbeständigkeit des Schichtsystems aus.

3. Ergebnisse der Feldversuche

3.1. Versuchsumfang

In den Jahren 1976 bis 1980 wurden bei der DR insgesamt 10 Erprobungsbaustellen mit einer Schutzschicht aus Kiessand und Vlies angelegt. Es kamen ca. 10300 m² Vlies bei 2250 m Gleis zum Einbau.

Spezielle meßtechnische Auswertungen wurden bei 3 Erprobungen vorgenommen, die 1976 und 1977 ausgeführt wurden. Hier wurden turnusmäßig die Tragfähigkeit gemessen sowie Boden-, Kiessand- und Vliesproben entnommen, im Labor ausgewertet und bewertet.

Die Erprobung auf einer Versuchsbaustelle der DR in Theißen (4) war auf Grund der einheitlichen geologischen und hydrologischen Bedingungen besonders aussagefähig. Sie wird deshalb speziell dargestellt; die weiteren Erprobungen werden nur ergänzend einbezogen.

3.2. Feldversuch Theißen

3.2.1. Charakteristik

Einbau eines Vlieses im Zusammenhang mit einer Schutzschicht aus Kiessand

Baulänge: 530 m, davon
480 m mit Vlies und 50 m ohne Vlies
(Nullabschnitt)

Meßfelder: je 25 m

Anstehendes Lockergestein: Lößlehm (UT), sehr gleichmäßig über die gesamte Baustelle,
 $w_L = 0,29 \dots 0,37$, $w_p = 0,14 \dots 0,19$
 $I_p = 0,1 \dots 0,2$

Entwässerung: Bahngraben bahnlinks z.T. bewachsen und verschmutzt

Schutzschicht: Kiessand

- Schichtdicke nach TGL 24756/08 und 09:
Für das Lockergestein UT und den hydrologischen Fall 2 ($I_c = 0,75 \dots 1,0$) ergibt sich ein Berechnungsmodul $E_H = 15,0 \text{ MPa} \rightarrow$ Dicke $h = 25 \text{ cm}$, vorhandene Dicke $h \sim 28 \text{ cm}$
- Filterstabilität nach TGL 24756/09
 $w_L = 0,302 \rightarrow d_{17}; \text{zul.} = 0,19 \text{ mm}$
 $d_{17, \text{vorh.}} = 0,46/1,3 \text{ mm} > 0,19 \text{ mm} = d_{17}; \text{zul.}$

Der Kiessand ist nicht sicher gegen Kontakt-erosion aus dem anstehenden Lößlehm. Der Einbau eines Vlieses als Filterelement ist notwendig.

Vlies: Wurzener Bauvlies

- WT 2 - 450 g/m^2 , $O_{90} = 0,10 \text{ mm}$
- WT 3 - 600 g/m^2 , $O_{90} = 0,10 \text{ mm}$
- WT 5 - 450 g/m^2 , $O_{90} = 0,12 \text{ mm}$

Streckenbelastung: 54 000 Brutto-Mg/24 h

Seit der Inbetriebnahme am 24.10.1977 bis zur Messung am 30.03.1984 ca. 125 Mio Brutto-Mg

3.2.2 Auswertung:

Die Gleislage ist stabil. In Längshöhe, Querhöhe und Verwindung sind keine unzulässigen Abweichungen vorhanden. Der Schotter ist durch Rieselverluste normal bzw. stark verschmutzt. Die Bettungsdicke liegt zwischen 40 und 50 cm. Zwischen dem Schotter und dem Kiessand hat sich eine ca. 3 cm dicke Mischzone ausgebildet.

Das Vlies bildet eine klare Trennschicht zwischen dem Lößlehm und dem Kiessand, verhindert Vermischungen und sichert die Filterstabilität.

Demgegenüber hat sich im Nullabschnitt ohne Vlies bis März 1984 eine Mischzone Lößlehm-Kiessand von 6 ... 10 cm ausgebildet.

Das Vlies ist unverletzt und gelblich verfärbt. Es haftet fest an Lößlehm; beim Ablösen werden Erdstoffteilchen mit herausgerissen. Die entnommenen Vliesproben sind relativ steif und fest und bilden nach der Austrocknung eine stabile Platte. An der Oberfläche des Vlieses sind Kiessandkörner angelagert. Das Wirrfasergeflecht des Vlieses ist vom Lößlehm durchdrungen.

Dies drückt sich in einer Zunahme der Flächenmasse der entnommenen kolmatierten Proben von 450 g/m^2 auf $\sim 2875 \text{ g/m}^2$ aus. Im Wirrfasergeflecht sind folglich $\sim 2425 \text{ g/m}^2$ Feinstkorn abgelagert.

Diese Kolmation führt zu einer Abnahme der Öffnungsweite O_{90} von $O_{90} = 0,10 \text{ mm}$ auf $0,12 \text{ mm}$ auf $O_{90} \sim 0,06 \text{ mm}$.

Trotz dieser Kolmationserscheinungen hat sich die Wasserdurchlässigkeit k des Vlieses nur wenig verringert. Die Laborversuche ergaben:

WT 5 neu	1977	$k = 8,52 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
WT 5 erdgelagert	1979	$k = 5,54 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
WT 5 erdgelagert	Oktober 1984	$k = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$

Damit kann das Wasser aus dem anstehenden Lößlehm mit $k = 10^{-6} \dots 10^{-7} \text{ m/s}$ weiterhin staufrei durchtreten. Um die Veränderung in der Stabilität des Vlieses maßtechnisch auszu-drücken, wurden Streifenzugversuche nach TGL O-53857 an 5 cm breiten Textilstreifen mit neuen und erdgelagerten Proben durchgeführt (Bild 1). Die höhere Stabilität des erdgelagerten Vlieses drückt sich in einer höheren Reißkraft, einer geringeren Reißdehnung und vor allem in einem veränderten Verlauf der Kurve aus. Erdgelagerte Proben weichen nicht so unter der Belastung aus, sondern nehmen schon bei geringen Dehnungen Zugkräfte auf.

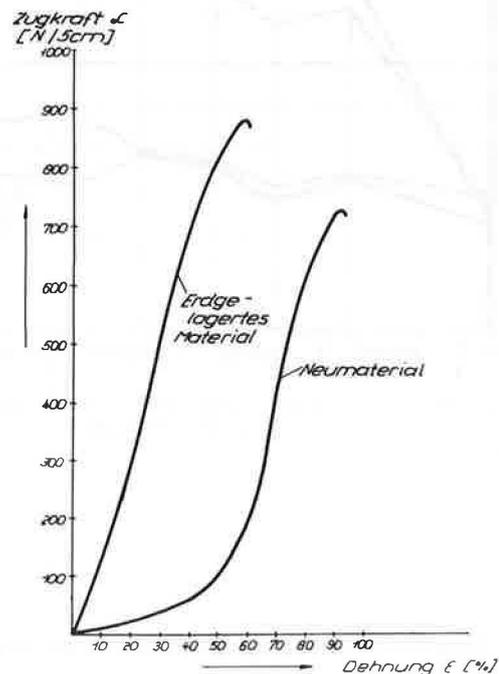


Bild 1: Zugkraft-Dehnungsverlauf WT 5 (parallel zur Herstellungsrichtung)

Das Erdplanum ist fest, eben und quergeneigt; Deformationen sind nicht eingetreten. Die Verschlechterung der hydrologischen Verhältnisse durch den inzwischen verwachsenen Bahngraben drückt sich in einer geringen Zunahme des natürlichen Wassergehaltes w_n und einer geringen Abnahme des Konsistenzindex I_c aus. Die Probenahmen an den Meßpunkten ergaben, daß die Bindigkeit des Lößlehms abschnittsweise unterschiedlich ist (Plastizitätsindex $I_p = 0,11$ bzw. $0,18$). Somit ergaben sich trotz etwa gleichem natürlichem Wassergehalt $w_n = 0,178 \pm 0,03$ Abschnitte mit unterschiedlichem Konsistenzindex $I_c = 0,71 \dots 1,13$ bzw. $I_c = 0,91 \dots 1,23$.

Verformungsmodul
 E_{dyn} [MPa]

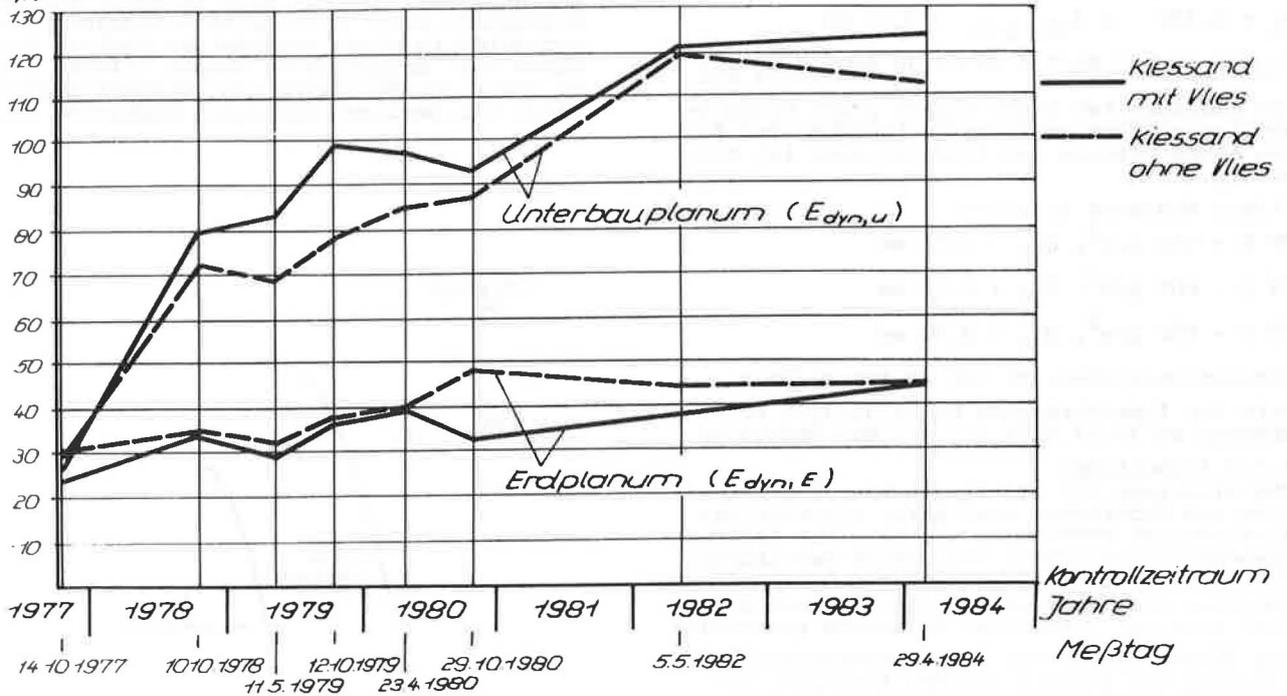


Bild 2: Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessung

Die 4 Meßpunkte mit Vlies liegen überwiegend im Bereich mit steifer Konsistenz, während der Nullabschnitt mit 2 Meßpunkten im Bereich mit halbfester Konsistenz angelegt wurde.

Folglich wurde an den Meßpunkten mit Vlies immer eine geringere Tragfähigkeit des Erdplanums gemessen. Die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen mit der dynamischen Fallplatte (E_{dyn}) nach TGL 11461/10 auf dem Erd- und Unterbauplanum zeigt Bild 2. Die Mittelwerte der Messungen und die Entwicklung der Tragfähigkeit über den Zeitraum von ca. 7 Jahren sind dargestellt. Das Schichtsystem, das bei der Abnahme im Oktober 1977 nicht die erforderlichen Tragfähigkeiten aufwies, hatte sich bis Oktober 1978 konsolidiert und die Normwerte erreicht. Die Tragfähigkeit des weicheren Erdplanums an den Meßpunkten mit Vlies ist durchweg geringer. Trotzdem wurden, bis auf die Anfangsmessung, auf dem Unterbauplanum stets höhere Tragfähigkeiten gemessen. Dies ist auch im Bild 3 zu erkennen, das den

(E_{dyn}) Baustelle Theißen

Tragfähigkeitszuwachs durch die Schutzschicht mit bzw. ohne Vlies und seine Entwicklung über die Zeit zeigt.

Die Schicht Kiessand mit Vlies erbringt einen höheren Zuwachs als ohne Vlies; der Verbesserungsfaktor $v = E_{dyn,u} / E_{dyn,E}$ beträgt für die Schutzschicht aus Kiessand $v = 2,23$ und für die Schutzschicht aus Kiessand mit Vlies $v = 2,74$. Die höhere Tragfähigkeit der Schutzschicht mit Vlies und die Abhängigkeit der Wirkung des Vlieses von der Tragfähigkeit des Erdplanums bringen deutlich die Regressionsgeraden aller Meßwerte im Bild 4 zum Ausdruck. Der Einfluß des Vlieses ist bei weichem Erdplanum am größten, und er nimmt mit steigender Tragfähigkeit des Erdplanums ab.

Zwischen den verwendeten Vliesqualitäten konnten bezüglich Filterstabilität und Einfluß auf die Tragfähigkeit keine Unterschiede festgestellt werden.

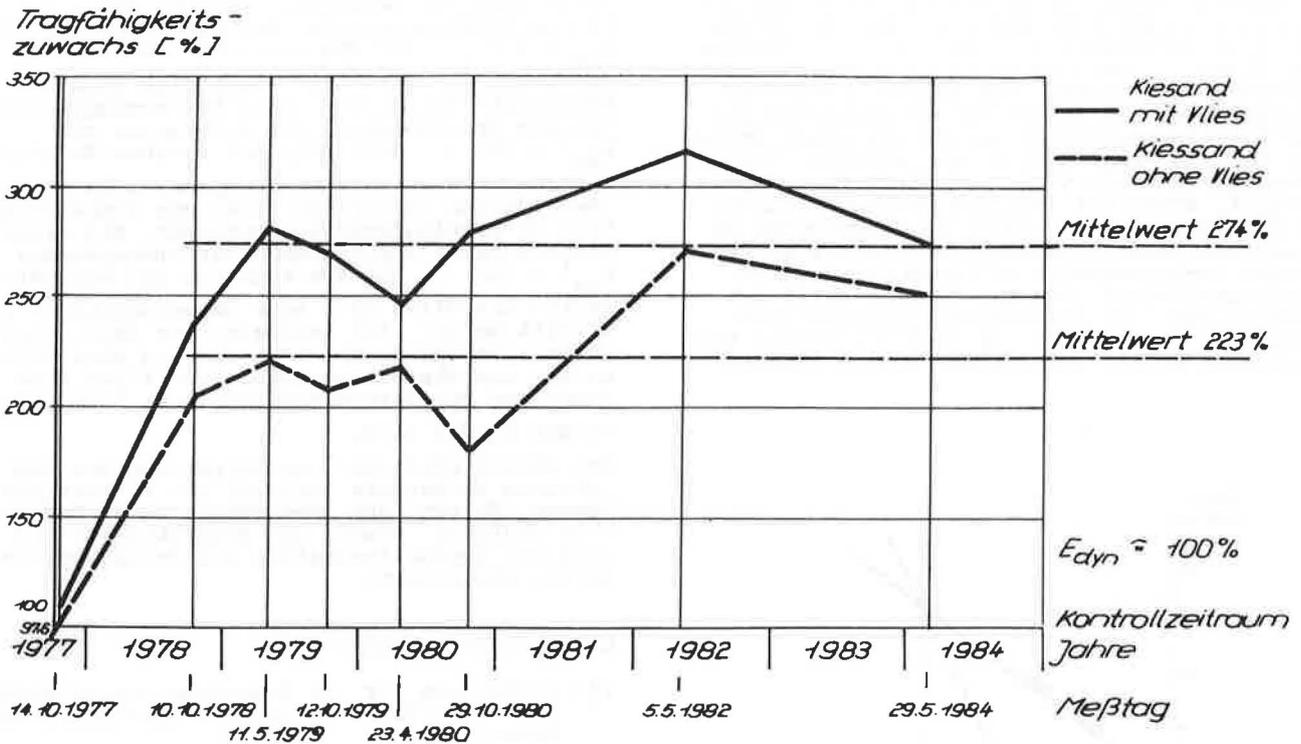


Bild 3: Tragfähigkeitszuwachs Baustelle Thälßen

3.3 Schlußfolgerungen zur Wirkung des Vlieses

Labor- und Feldversuche zeigen eine positive Beeinflussung der Tragfähigkeit des Schichtsystems durch Geotextilien. Die Tragfähigkeit eines Schichtsystems mit Vlies ist im Langzeitverhalten höher als ohne Vlies und mit sinkender Tragfähigkeit des Erdplanums nimmt der Einfluß des Vlieses zu.

Das Vlies hat sich als Trenn- und Filterelement bewährt. Es verhindert Vermischungen und schädliche Kornumlagerungen. Die Festigkeitseigenschaften der aufliegenden Schutzschicht werden langfristig erhalten.

Eine Schutzschicht mit Vlies ist in der Lage, örtlich begrenzte Stellen bzw. zeitliche Phasen mit niedriger Tragfähigkeit ohne kritische Verformungen und mit einer klaren Schichten-trennung zu überstehen.

Auf der Schutzschicht mit Vlies wird eine geringere Verformung (Einsenkung der Fallplatte) gemessen. Das Vlies behindert folglich die Ver-

formung der aufliegenden Schutzschicht. Es wirkt als Zugelement und nimmt einen Teil der Vertikalkräfte aus der Betriebsbelastung als Zugkraft in der Vliesebene auf ($P = R + Z \cdot \sin \beta$). Dieser Bewehrungseffekt steigt mit weicher werdendem Erdplanum, da die Verformungen ($\sin \beta$) größer werden.

Die tragfähigkeitserhöhende Wirkung des Vlieses tritt aber nicht unmittelbar nach dem Einbau auf, sondern erst nach einer Phase, in der das Schichtsystem sich stabilisiert. Ein gewisser Anteil davon ist dem Kiessand zuzuschreiben, der unter Betriebsbelastung weiter verdichtet wird und eine höhere Lagerungsdichte erreicht. Der entscheidende Anteil dieser Änderung kommt aber dem Vlies bzw. dem Zusammenwirken des Vlieses mit den anliegenden Lockergesteinen zu. Im Wirrfasergeflecht des Vlieses haben sich Körner aus dem umgebenden Lockergestein ab- bzw. angelagert und zu einer durch Erdstoffteilchen stabilisierten Faserstruktur geführt.

Vorhandene Hohlräume im Wirrfasergeflecht werden ausgefüllt, eine Verschiebung der Fasern be- bzw. verhindert und damit eine Verformung des Vlieses sowohl in als auch senkrecht zur Vliesebene behindert. Die Körner übertragen Druckkräfte; die Fasern nehmen Zugkräfte auf. Der Streifenzugversuch an erdgelagerten Proben (s. Bild 1) zeigt wesentlich geringere Reißdehnungen (30 bis 57 %) und einen veränderten Verlauf. Schon bei geringen Dehnungen können Kräfte aufgenommen werden. Im eingebauten Zustand bei direkter Einspannung in die anliegenden Lockergesteine und beim 2-achsialen Spannungszustand wird die Dehnfähigkeit des Vlieses bzw. des Boden-Vlies-Systemes noch geringer sein, so daß bei noch geringeren Verformungen Kräfte aufgenommen werden können.

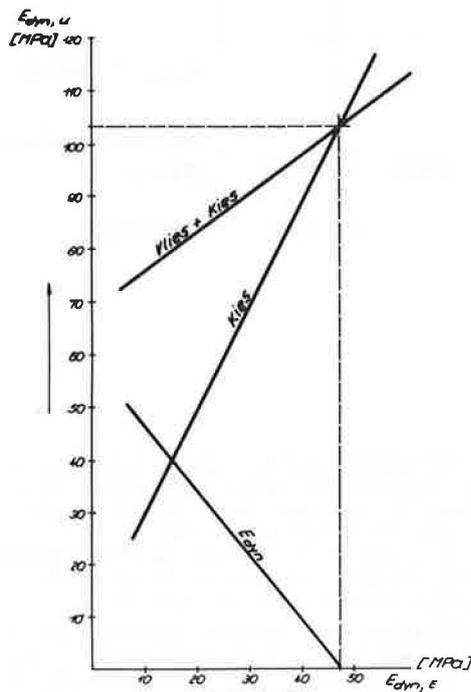


Bild 4: Vergleiche der Tragfähigkeiten von Kiessand mit und ohne Vlies

4. Bemessung des Schichtsystems mit Vlies

Die Bemessung des Schichtsystems erfolgt nach der Mehrschichttheorie. Das Vlies als gesonderte Schicht erbringt auf Grund der geringen Schichtdicke keinen Zuwachs an Tragfähigkeit. Die beweisende Wirkung wird, wie auch meßtechnisch nachgewiesen, der aufliegenden Schicht zugeordnet. Bei der Schutzschicht mit Vlies werden bei gleicher Tragfähigkeit des Erdplanums und gleicher Schichtdicke höhere Tragfähigkeiten des Unterbauplanums gemessen. Folglich muß die Schutzschicht mit Vlies einen höheren spezifischen Verformungsmodul realisieren. Auf Grund der Meßergebnisse (Bild 4)

wurde nach der Mehrschichttheorie der spezifische Verformungsmodul der Schutzschicht mit $E_{ps} = 150 \dots 200$ MPa ermittelt. Für die Schutzschicht mit Vlies ergab sich eine Abhängigkeit des spezifischen Verformungsmoduls von der Tragfähigkeit des Erdplanums mit $E_{ps}' = 240 \dots 1000$ MPa. Bei weichem Erdplanum ist der errechnete Verformungsmodul am höchsten, da das Zugelement Vlies den höchsten Anteil an Vertikalkräften übernimmt. Mit einem abgeminderten spezifischen Verformungsmodul $E_{ps}' = 250 \dots 500$ MPa kann für das Schichtsystem mit Vlies eine neue Bemessungskurve ermittelt werden. Ein Vergleich der Bemessungskurven für Schutzschichten mit und ohne Vlies zeigt, daß die Schutzschicht mit Vlies ihre Anwendung bei Berechnungsmoduln $E_H \approx 15 \dots 20$ MPa finden wird.

Bei diesen niederen Tragfähigkeiten des Erdplanums werden die Vorteile des Vlieses als Trenn-, Filter- und Bewehrungselement besonders deutlich. Sowohl die Tragfähigkeit als auch das Langzeitverhalten des Schichtsystems werden verbessert.

Literaturverzeichnis

- (1) Richtlinie für die Anwendung von polymeren Filterstoffen in Entwässerungsanlagen des Bahnkörpers
MfV, Hv A, DR-A 2004, 1.1.1980
- (2) Lieberenz, K.
Probleme der Filterstabilität von Entwässerungsanlagen des Bahnkörpers unter Berücksichtigung von Geotextilien
Dissertation, HfV Dresden, 1984
- (3) Richtlinie für die Anwendung von Vliesen im Eisenbahnunterbau
MfV, Hv A, DR-A 2006, 1.1.1981
- (4) Lieberenz, K. und Nietzsch, H.
Tragfähigkeitserhöhende Wirkung von Vliesen im Eisenbahnunterbau
Signal und Schiene 29 (1985) 2, S. 44 - 47