

Chemische Beanspruchung von im Boden eingebauten Geokunststoffen durch im Boden und Wasser natürlich anwesende Stoffe

Teil 1: Hydrolyse von Polyesterweben – Festigkeitsmechanische Untersuchungen

Teil 2: Hydrolyse von Polyesterweben – Chemische Untersuchungen

FA 5.100 und FA 5.117

Forschungsstellen: Forschungs- und Materialprüfanstalt Baden-Württemberg, Otto-Graf-Institut, Stuttgart / Universität Rostock, FB Landeskultur und Umweltschutz (Teil 1) / Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin (Teil 2)

Bearbeiter: Nimmegern, M. / Lange, B. und Schröder, H.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Juni 2000

1. Aufgabenstellung

Zum chemischen Langzeitverhalten der polymeren Werkstoffe in der Geotechnik gibt es noch manche offene Frage. Gesicherte Erfahrungen zur Langzeitbeständigkeit sind über etwa 3 Jahrzehnte vorhanden. Die Erwartungen liegen aber vielfach bei deutlich längeren Funktionszeiten. Beim Einsatz von Geokunststoffen in natürlichen Böden ist bei Materialien auf der Basis von Polyolefinen und Polyamiden in der Regel das oxidative Verhalten, bei solchen auf der Basis von Poly(ethylenterephthalat) (PET) das hydrolytische Verhalten, lebensdauerbestimmend.

PET-Gewebe sind wegen ihrer hervorragenden armierenden Eigenschaften und ökonomischen Vorteile viel eingesetzte Baumaterialien. Wegen der seit langem bekannten Empfindlichkeit dieses Werkstoffes gegenüber stark alkalischen Einwirkungen ist in solchen Bereichen ein permanenter Schutz der Fasern erforderlich.

Bei den üblichen Anwendungen in nahezu neutralen Böden bestehen hinsichtlich der Langzeitanwendung jedoch häufig weniger Bedenken, da bei den normalen Bodentemperaturen von 10 bis 20 °C die Innere Hydrolyse bei hochwertigen PET-Garnen recht langsam verläuft. Es gibt jedoch Überlegungen, dass selbst in neutralen Böden beim direkten Kontakt von Geotextilfasern mit Bodenpartikeln mit starker alkalischen Randzonen eine signifikante Schädigung durch Äußere (alkalische) Hydrolyse stattfinden könnte. Dabei wurde vor allem an Calcit- und Dolomit-haltige Böden gedacht, die recht weit verbreitet sind. Im Eluat solcher Böden treten nach Literaturangaben pH-Werte bis 10 auf, die bei Langzeitbeanspruchungen schädigend wirken könnten.

2. Untersuchungsmethodik

Daher sollte in einem Vorhaben einerseits bei der Forschungs- und Materialprüfanstalt (FMPA) Stuttgart und der Universität Rostock und andererseits bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin mit einer für mehrere Jahrzehnte aussagekräftigen Lagerungsbeanspruchung das Verhalten von zwei den Stand der Technik repräsentierenden typischen Geogeweben mit PET-Kettgarnen in 5 typischen eher alkalischen Böden und deren Eluaten untersucht werden.

Die Lagerung der beiden Geogewebe in den Böden und deren Eluaten, die Ermittlung der Bodenkennwerte und die Ermittlung der Festigkeitskennwerte der Gewebe fand in dem gemeinschaftlich durchgeführten Vorhaben der FMPA-Stuttgart und der Universität Rostock statt. Die Charakterisierung der Morphologie der Faseroberflächen und der chemischen Veränderungen des PET-Werkstoffes sowie ergänzende Messungen zu den Filamentfestigkeiten erfolgten anschließend in dem zugeordneten Vorhaben der BAM in Berlin. Diese Arbeiten wurden ergänzt

durch polymerchemische Untersuchungen in den Forschungslaboratorien der AKZO (jetzt Acordis Research Arnhem).

Aus dem großen Spektrum der typischen natürlichen Böden im Erdbau wurden ausgewählt:

- Zwei Neutralböden (Geschiebemergel bzw. Quarzsand) mit S4-Eluaten im Bereich pH 8,1 bis 8,3.
- drei alkalische Böden (Kreide aus Rügen, Muschelkalksplitt aus Ehningen, Moränekies aus Hiltzingen) mit S4-Eluaten im Bereich pH 9,0 bis 9,4.

Als typische Geokunststoffe mit hochfesten PET-Fasern in Deutschland wurden ausgewählt:

- Stablenka 200/45 des Herstellers Huesker Synthetik, dessen tragende Kettfäden aus hochverstrecktem PET des Typs Diolen 770 des Herstellers AKZO NOBEL (jetzt Acordis) stammen,
- Terram WB/20-5 des Herstellers EXXON, Weberei Olbo, Kettfäden aus hochverstrecktem PET-Garn Typ 100 (ex USA) des Herstellers Hoechst Trevira (jetzt KoSa).

3. Untersuchungsergebnisse

- Es wurde eine Apparatur erstellt, in der sich gleichzeitig die Boden- und Eluat-Lagerung von Geweben durchführen lässt. Die Apparatur wurde durch das beheizte, umlaufende Eluat auf 60 °C temperiert. Dieses umströmte sowohl die im Boden als auch die im Eluatbehälter positionierten Proben. Das Eluat hatte Kontakt zur Umgebungsluft, so dass aerobe Bedingungen vorlagen.
- Der Kontakt zur Umgebungsluft bewirkte, dass durch die Einwirkung des Kohlendioxids der Luft der anfänglich höhere pH-Wert der Eluate sich deutlich erniedrigte. So wurden die anfänglichen Eluatwerte im Bereich pH 10 jeweils etwa in 4 Monaten auf pH 9 und weiter auf den stationären Wert von etwa pH 8 neutralisiert. Insofern beziehen sich alle Ergebnisse des Vorhabens auf Systeme mit einem derartigen Gasaustausch.
- Allein durch die kurzzeitige Einwirkung von Wasser bei 60 °C wurden Minderungen der Höchstzugkraft in Kettrichtung der Gewebe im Bereich von etwa 9 % beobachtet.
- Die in den verschiedenen Böden beobachteten Minderungen der Höchstzugkraft in Kettrichtung betragen je nach Boden- und Gewebearbeit nach 4-wöchiger Einlagerung zwischen 4 und 22 %, nach 104-wöchiger Einlagerung zwischen 15 und 38 %.
- Bezieht man die bei den Streifenzugversuchen gefundenen Restfestigkeiten auf den Bezugszustand 4 Wochen Lagerung bei 60 °C, so würden die langzeitversuchsbedingten mittleren Festigkeitsminderungen über alle Lagerungen gemittelt inklusive Standardabweichung etwa 25 % betragen.

Aus orientierenden Festigkeitsuntersuchungen an den Garnfilamenten der Zugprobengarne kann vermutet werden, dass als Resultierende aus den möglichen physikalischen und chemischen Veränderungen bei den 100 Wochen Lagerungen bei 60 °C insgesamt Festigkeitsminderungen (incl. Variationskoeffizient) gegenüber dem Zustand nach 4 Wochen Lagerung von etwa 10 % angesetzt werden können. Die so gefundene Schädigung ist erwartungsgemäß niedriger als die bei den Streifenzugversuchen, da bei den Versuchen an Filamenten die mechanischen Schädigungen durch garngängige eingelagerte Bodenpartikel beim Zugversuch weitgehend reduziert werden.

Als Ursachen für diese festgestellten Minderungen der Festigkeit sind physikalische und chemische Veränderungen unter den Lagerungsbedingungen zu diskutieren.

Bei physikalischen Vorgängen wird dabei an mechanische Schädigungen der Garne und an physikalische Veränderungen der Struktur der Garne unter den Lagerungsbedingungen

gedacht. Dabei wird durch physikalische Alterungsvorgänge, die auf eine Verringerung des sogenannten Freien Volumens zwischen den Polymermolekülen hinauslaufen, in der Regel eine gewisse Vergrößerung der Höchstzugkraft bewirkt. Andererseits wurde sehr wahrscheinlich auch bei der Lagerungstemperatur die Glastemperatur des PET-Materials im Nasszustand überschritten, so dass eine gewisse Relaxation der von der Herstellung herrührenden Verstreckung eintreten konnte. Dieser Effekt führt zu einer gewissen Verringerung der Höchstzugkraft und Vergrößerung der zugehörigen Dehnung, auf die auch die Untersuchungen mit reinem Wasser von 60 °C, wie oben berichtet, hinweisen. Beide sich teilweise kompensierende Effekte bedürfen aber genauerer Untersuchung, die hier nicht erfolgen konnte.

Die weitere Untersuchung wurde auf die Frage eingeschränkt, ob signifikante mechanische Schädigungen zu beobachten sind und ob sich chemische Änderungen nachweisen lassen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die untersuchten beiden PET-Materialien unterscheiden sich im Ausgangszustand deutlich hinsichtlich ihres Molekulargewichts, des Carboxylendgruppengehaltes und des Diethylenglykolgehaltes.
- Die chemischen Untersuchungen zeigten, dass sich bei demselben PET-Garn innerhalb der Genauigkeit der Analyseverfahren keine signifikanten Unterschiede zwischen den Lagerungen in den 5 untersuchten Böden und deren Eluaten hinsichtlich der prozentualen Veränderungen der Molekulargewichte und der Carboxylendgruppen feststellen ließen.
- Die Molekulargewichte M_w (sog. Gewichtsmittel) der beiden verwendeten PET-Werkstoffe hatten sich nach den 2 Jahren Lagerung bei 60 °C jeweils um etwa 22 % verringert.
- Die Carboxylendgruppengehalte sind nach den Lagerungen jeweils etwa um 55 % erhöht.
- Eine signifikante Veränderung der Diethylenglykolgehalte, die auf oxidative Veränderungen hinweisen würde, hatte nicht stattgefunden.

Da diese Methoden die molekularen Veränderungen durch innere Hydrolyse erfassen, kann festgestellt werden, dass für die innere Hydrolyse offensichtlich unbedeutend war, ob die PET-Fasern in direktem Kontakt zum Boden standen oder nicht, wichtig war offenbar nur die Benetzung mit dem in beiden Fällen als gleich anzusehenden wässrigen Medium, dem Eluat. Dieses Ergebnis gilt natürlich streng nur für die untersuchten Materialien innerhalb der vorliegenden Versuchsgenauigkeit. Die untersuchten Materialien (Böden/PET-Garne) können jedoch als typisch angesehen werden.

Es ist ferner zu vermuten, dass diese Beobachtung auch für vergleichbare Böden und Eluate gilt.

Als vergleichbar werden Böden angesehen mit Eluaten etwa gleicher Ionenstärke, Acidität und der Abwesenheit signifikanter Konzentrationen von Bestandteilen, die in die PET-Fasern eindringen können.

Geht man davon aus, dass die Zugfestigkeitseigenschaften von PET-Fasern bei Erreichen eines bestimmten minimalen Molekulargewichts bzw. maximalen CEG-Gehaltes verfallen werden, so

würde also die PET-Faser mit dem höheren Molekulargewicht und dem niedrigeren Carboxylendgruppengehalt bei gleicher Abbaukinetik die höhere Lebenserwartung, oder nach gleicher Einbauzeit die höhere Restfestigkeit haben. Es könnten aber auch strukturelle und andere Materialparameter einen Einfluss haben, so dass dies hier nicht entscheidbar ist.

Die rasterelektronenmikroskopischen (REM) Untersuchungen erbrachten folgende Befunde:

- Die PET-Fasern der bodengelagerten Gewebe sind selbst nach gründlichem Spülen mit reinem Wasser deutlich stärker mit kleinen Bodenpartikeln besetzt als die eluatgelagerten.
- Diese garngängigen Bodenpartikel haben Abmessungen von einigen Mikrometern und passen daher von der Geometrie in die freien Volumina zwischen den Garnfilamenten (Durchmesser etwa 20 µm). Sie sind hier dem Feinschluff zuzuordnen. Ihr Schädigungspotenzial ist abhängig von ihrer Kantigkeit.
- Die beobachteten Schäden durch diese Partikel sind meist sehr oberflächennah. Es handelt sich um Einpressungen (Delten), längliche Einkerbungen (Furchen) oder auch Krater, in denen die eingedrunnenen Partikel teilweise noch haften. Eine quantitative Differenzierung war im Rahmen des Vorhabens nicht möglich.
- Auf dem verwendeten Vergrößerungsniveau (30 000fach) konnten weder bei den Boden- noch bei den Eluatlagerungen chemische Schädigungen durch alkalische Hydrolyse festgestellt werden.

Bei einem Lagerungsversuch wurden pH-Einstellungen mit Calciumhydroxid vorgenommen. In diesem Fall ließen sich die durch alkalische Hydrolyse verursachten dramatischen Faseranätzungen leicht bei den Eluatlagerungen nachweisen.

Da die Untersuchungen an den durch die Zugversuche vorbeanspruchten Proben vorgenommen werden mussten, konnte auch nicht festgestellt werden, welche Schädigung allein durch die Lagerung bedingt ist. Die Konstruktionsdrehung von Filamentgarnen verursacht bei Zugbeanspruchung eine Kontraktion des Garndurchmessers und damit eine Pressung der parallel liegenden Filamente gegen die eingeschlossenen Bodenpartikel. Die Geometrie des Filamentgarns begünstigt also diesen Schädigungsmechanismus bei Zug- und Druckbeanspruchungen.

4. Folgerungen für die Praxis

Es kann also nach den REM-Untersuchungen zusammenfassend festgestellt werden, dass durch die Einlagerung von garngängigen Bodenpartikeln ein signifikantes mechanisches Schädigungspotenzial in den armierenden Garnen vorliegt. Es sollte daher über die Vermeidung dieser Situation nachgedacht werden. Eine alkalische Hydrolyse war an den vorliegenden PET-Garnproben innerhalb der Versuchszeit weder lokal noch generell nachweisbar, da die untersuchten calciumcarbonathaltigen Böden offenbar ausreichend durchlüftet waren.

Es findet jedoch eine innere Hydrolyse statt, die nach 2 Jahren bei 60 °C zu einer Minderung der Festigkeit im Bereich von etwa 10 bis 20 % führt. Eine grobe Abschätzung nach Arrhenius zeigt, dass dies einem Zeitraum von mehreren Jahrzehnten bei Bodentemperaturen von 10 bis 20 °C entspricht. □