

F Beurteilung des Langzeitverhaltens von Dichtungsbahnen aus PEHD auf der Grundlage von projektbezogenen Erfahrungen und Nachweisen

Dipl.-Ing. Stefan Baldauf/Dipl.-Ing. Catrin Tarnowski,
Hamburg

Beurteilung des Langzeitverhaltens von Dichtungsbahnen aus PEHD auf der Grundlage von projektbezogenen Erfahrungen und Nachweisen

Abstract

Kunststoffdichtungsbahnen aus PEHD werden seit mehreren Jahrzehnten zum Zweck des Grundwasserschutzes eingesetzt. Aufgrund intensiver, weltweiter Forschungsarbeit liegen heute verlässliche Daten zur Abschätzung der Funktionsdauer, insbesondere für abgedeckte Anwendungen wie Deponiebasisabdichtungen vor. Je nach zugrunde gelegtem Modell kann von Funktionsdauern von mehreren hundert bis mehr als eintausend Jahren ausgegangen werden. Insofern sind ausreichend dicke und fachgerecht eingebaute Dichtungsbahnen, die aus qualitativ hochwertigen Polyethylen-Formmassen fachgerecht hergestellt werden, als dauerhaftes Abdichtungselement anzusehen.

Im Gegensatz zu abgedeckten Anwendungen, bei denen der thermo-oxidative Alterungsmechanismus dominiert, wird die Alterung bei permanent offenliegenden Anwendungen insbesondere durch die im natürlichen Sonnenlicht enthaltene UV-Strahlung verursacht. Dieser Erfahrungsbericht zeigt anhand von ausgewählten Projektbeispielen, dass PEHD-Dichtungsbahnen mit einer Dicke von 2,5 mm, abhängig von der regionalen, durchschnittlichen jährlichen Globalstrahlung, eine Funktionsdauer von >> 30 Jahre haben.

Keywords

PEHD-Dichtungsbahn, oxidative Alterung, Funktionsdauer, Witterungsbeständigkeit, Spannungsrissbeständigkeit

1. Einleitung

Dichtungsbahnen aus PEHD (im weiteren Text kurz als Dichtungsbahnen bezeichnet) werden seit vielen Jahrzehnten erfolgreich als Flüssigkeits- und/oder Gasbarriere in den Bereichen Umweltschutz, zur Bauwerksabdichtung sowie vielfältigen industriellen Anwendungen eingesetzt. Aufgrund ihrer ausgezeichneten Beständigkeit gegenüber verschiedensten physikalischen, chemischen und biologischen Einflüssen sind Dichtungsbahnen in vielen Anwendungen zur Regelabdichtung geworden, sowohl als primäres Abdichtungselement von Kombinationsdichtungen als auch als alleiniges Abdichtungselement.

Heutzutage stehen besonders geeignete Rohstoffe bzw. Rezepturen sowie Herstellungs- und Schweißverfahren zur Verfügung, so dass in Verbindung mit einem lückenlosen Qualitätssicherungssystem, beginnend mit der Eigenüberwachung bei der Formmassenherstellung, über die Rohstoffeingangskontrolle, die Eigen- und Fremdüberwachung während der Produktion, bis hin zur Eigen- und Fremdüberwachung auf der Baustelle, Abdichtungssysteme hergestellt werden, die höchsten Ansprüchen genügen. In der Tat kann mit keinem anderen Abdichtungssystem ein gleiches Maß an kontrollierter Zuverlässigkeit gewährleistet werden.

Maßgebliches Kriterium für die Akzeptanz von Dichtungsbahnen ist die Frage der Langzeit- bzw. dauerhaften Beständigkeit von Dichtungsbahnen. In manchen Veröffentlichungen wird selbst Dichtungsbahnen, die gemäß dem Stand der Technik hergestellt werden, je nach Anwendung keine langfristige bzw. keine dauerhafte Funktion zugeschrieben. [1, 2].

Im Gegensatz zu diesen Veröffentlichungen muss auf Grundlage des heutigen Kenntnisstandes davon ausgegangen werden, dass gemäß dem Stand der Technik hergestellte und installierte Dichtungsbahnen ausreichender Dicke in Anwendungen wie Deponiebasis- und -oberflächenabdichtungen ihre Funktion dauerhaft erfüllen [3]. In Deutschland wird dies durch die BAM-Zulassung sichergestellt. Gemäß der Definition des DIBt können Dichtungsbahnen als „dauerhaft“ klassifiziert werden, wenn sie eine Funktionsdauer von mehreren hundert Jahren aufweisen.

Im Folgenden werden auf Grundlage heutiger Forschungsergebnisse die thermo- und photooxidativen Alterungsmechanismen sowie die Spannungsrissbeständigkeit von Dichtungsbahnen skizziert. Weiterhin werden zwei Modelle zur Abschätzung der Funktionsdauer von abgedeckten Dichtungsbahnen vorgestellt.

Die Funktionsdauer von dauerhaft freibewitternden Dichtungsbahnen – dem weniger erforschten Bereich - wird in einem separaten Kapitel anhand von ausgewählten Projektbeispielen dargestellt.

2. Langzeitbeständigkeit von Dichtungsbahnen

2.1 Formmassen

Die heutzutage üblicherweise zur Herstellung von Dichtungsbahnen eingesetzten Formmassen sind im Niederdrucksyntheseverfahren hergestellte Polyethylene mittlerer Dichte (PE-MD) welche häufig aufgrund ihrer linearen Kettenstruktur auch als PE-LLD (Polyethylene-

Linear Low Density) bezeichnet werden. Hierbei handelt es sich um Kopolymere des Ethylens und α -Olefinen. Aufgrund der verzweigten Kettenstruktur und des niedrigen Kristallisationsgrads sind diese Formmassen, im Gegensatz zu PE-HD-Formmassen, außerordentlich spannungsrissempfindlich und weisen gleichzeitig die positiven Eigenschaften des PE-HD auf. Durch Zugabe von Ruß (und Antioxidantien) hat die fertige Dichtungsbahn eine Dichte von $\geq 0.940 \text{ g/cm}^3$ und wird somit als PEHD-Dichtungsbahn bezeichnet [4].

2.2 Alterungsmechanismen

Je nach Art der Anwendung können in Dichtungsbahnen Alterungsprozesse durch einen oder mehrere der folgenden äußeren Einflußfaktoren hervorgerufen werden, welche auch synergistisch wirken können:

- Thermo-oxidativer Abbau (Wärmealterung)
- Spannungsrissskorrosion
- UV-Strahlung (insbesondere kurzwellige UVB-Strahlung)
- Chemikalien
- Radioaktivität
- Biologischer Abbau (z.B. durch Mikroorganismen)
- Tiere (insbesondere Nagetiere)

2.2.1 Oxidative Alterung

In der Praxis sind insbesondere die thermo-oxidative Alterung sowie die durch UV-Strahlung hervorgerufene Alterung von Bedeutung. Nichtausgerüstete Polyolefine werden durch Sauerstoff unmittelbar oxidiert. Es handelt sich dabei um Radikalreaktionen, die zur Spaltung, Verzweigung und zur Vernetzung der Polymerketten und zur Bildung niedermolekularer Reaktionsprodukte führen. UV-Strahlung bewirkt einen photo-oxidativen Abbau der Polymerketten durch Absorption von UV-Strahlung, was ebenfalls zur Bildung von freien Radikalen führt. Diese Kettenreaktion bricht nicht ab, solange Sauerstoff zur Verfügung steht und setzt sich auch im Dunkeln fort. Dieser Kreislauf der Autooxidation sowie die Wirkungsweise der verschiedenen primären und sekundären Antioxidantien ist in [6, 7] detailliert beschrieben.

Der oxidative Abbau ist stark temperaturabhängig. Bei Umgebungstemperatur verläuft der Prozess nur äußerst langsam und steigt mit zunehmender Temperatur exponentiell an. Dieser Zusammenhang zwischen der Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Reaktionen und der

Temperatur wird durch das Arrhenius-Gesetz beschrieben, welches auch zur Abschätzung der Funktionsdauer von Dichtungsbahnen verwendet wird. In [10] ist dies sehr anschaulich beschrieben.

Die bei permanent freibewitterten Dichtungsbahnen zusätzlich auftretende Photo-oxidation durch kurzweilige UV-Strahlung beschleunigt die Alterung erheblich.

Sämtliche Einwirkungen, die zur Kettenspaltung bzw. zum Aufspalten chemischer Verbindungen der Dichtungsbahn führen, wirken sich nachteilig auf die Langzeitstabilität aus. Langfristig führt der Abbau der Polymerketten zur Versprödung der Dichtungsbahn. Auf die mechanischen Eigenschaften wirkt sich die Alterung i.d.R. folgendermaßen aus:

- Abnahme der Reißdehnung
- Anstieg des E-Moduls
- Anstieg der Zugfestigkeit zu Beginn des Versprödungsprozesses, dann Abnahme
- Zunahme der Tendenz zur Spannungsrissbildung
- Grundsätzliche Abnahme der Biegsam- und Dehnbarkeit

Zum Schutz vor thermo-oxidativem Abbau werden der Formmasse Antioxidantien zugesetzt. Ein wirksamer UV-Schutz wird durch Zusatz von speziellem, in der Polymermatrix feinst verteiltem Ruß [5] sowie weiteren Antioxidantien erreicht (insbesondere HALS = Hindered Amine Light Stabiliser), die gezielt die durch UV-Strahlung induzierten Abbauprozesse hemmen. Ein detaillierter Bericht von Wagner und Ramsey beschreibt das Verhalten von Dichtungsbahnproben bei verstärkter UV-Bestrahlung unter Laborbedingungen [9].

Die übliche Methode zum Nachweis der Oxidationsstabilität bzw. von Antioxidantien sowie deren Abbau nach Ofen- oder UV-Alterung ist die DSC-Analyse (Differential Scanning Calorimetry). Hierbei wird bei einer konstanten Temperatur und einem bestimmten Sauerstoffpartialdruck die oxidative Induktionszeit – kurz OIT – bestimmt. Standard-Prüfmethoden sind DIN EN ISO 728:1997-03 und ASTM D 3895-95. Aufgrund der hohen Prüftemperatur (i.d.R. 200°C für Polyethylen) können die Mengen besonders temperaturempfindlicher Antioxidantien fehlerhaft zu gering interpretiert werden. Als weiteres Verfahren steht deshalb das Hochdruck-OIT-Verfahren nach ASTM D5885-95 zur Verfügung. Hierbei wird der OIT bei niedrigerer Temperatur unter höherem Sauerstoffpartialdruck bestimmt. Der höhere Sauerstoffpartialdruck ist notwendig, um die Prüfzeiten auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. In den USA werden weitere Überlegungen angestellt, den OIT bei noch niedrigeren Temperaturen (und somit abermals erhöhtem Sauerstoffpartialdruck) zu messen. Die Ergebnisse aus

dem Hochdruckmeßverfahren sind laut Müller et. al. aufgrund des erhöhten Sauerstoffpartialdrucks mit Vorsicht zu verwenden [3].

Eine weitere Methode zum Nachweis der Alterungsbeständigkeit von Dichtungsbahnen ist die Messung der Änderung der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Zugfestigkeit und Bruchdehnung. Allerdings ist dieses Bewertungskriterium weniger selektiv und es lässt keine Rückschlüsse über den Verbrauch der Antioxidantien zu.

2.2.2 Spannungsrisssbeständigkeit / Spannungsrisssbildung

Die Spannungsrisssbildung ist neben dem oxidativen Abbau von sehr großer Bedeutung für die Alterung und das damit einhergehende Versagen von Dichtungsbahnen. Die Spannungsrisssbeständigkeit von PEHD ist ein wichtiges Kriterium in Bezug auf die Auswahl geeigneter Formmassen für die Herstellung qualitativ hochwertiger Dichtungsbahnen gemäß dem Stand der Technik. Die Spannungsrisssbeständigkeit ist eine Eigenschaft, die bereits durch die Formmasse festgelegt wird und durch den Herstellungsprozess der Dichtungsbahn nicht mehr positiv beeinflusst werden kann.

Es handelt sich um die Rissbildung im Kunststoff, die schließlich zum Zerschneiden des Materials führt, ausgelöst durch Spannungen, die unterhalb der Streckspannung des Kunststoffs liegen. Bei Spannungsrisssbildung wächst eine augenscheinlich glatte Bruchfläche allmählich in den Materialquerschnitt, bis durch die entstandene Querschnittsverringerung die entsprechend angewachsene lokale Spannung die Materialfestigkeit übersteigt und das Material am Rand der Bruchfläche reißt. Der Bruch ist weitgehend durch eine glatte, ebene Bruchfläche charakterisiert. Es handelt sich somit um ein sprödes Versagen des Materials.

Die Beständigkeit gegen Spannungsrisssbildung steigt mit wachsender Molekülmasse, der Zahl der Kettenverzweigungen, dem Komonomergehalt sowie der Molekülmasse der Komonomere. Eine detaillierte Betrachtung zum Spannungsrisssverhalten beschreibt Müller in [4].

Die Einwirkung von bestimmten Medien kann die Spannungsrisssbildung sehr stark beschleunigen, ohne chemische Veränderungen im Werkstoff hervorzurufen.

Detaillierte Untersuchungsergebnisse werden von Hsuan in [13] beschreiben. Als Prüfmethode zur Bestimmung der Spannungsrisssbeständigkeit von PEHD-Dichtungsbahnen hat sich weltweit die so genannte NCTL-Methode (notched constant tensile load) gemäß ASTM D 5397 etabliert. Hierbei werden senkrecht zur Verformungsrichtung eingekerbte Schulterstäbe

bei unterschiedlichen prozentualen Werten der Streckspannung im Wasserbad bei 50°C belastet. Durch die Zugabe eines spannungsrisssauslösenden Mediums wird die Tendenz zur Spannungsrisssbildung erhöht. Im Rahmen der regelmäßigen Qualitätskontrolle wird die Standzeit bei 30 % der Streckspannung des Materials ermittelt. Die mittlerweile in den USA geforderte Standzeit für PEHD-Dichtungsbahnen liegt bei >300 Stunden. Der NCTL-Test wurde im Rahmen der Erarbeitung harmonisierter europäischer Normen zur Charakterisierung von Dichtungsbahnen als europäische Norm prEN 14576 übernommen. Die geforderte Standzeit beträgt hier lediglich >200 Stunden. Hochwertige PEHD-Dichtungsbahnen erreichen Standzeiten von mehr als 1.000 Stunden und können somit als spannungsrissempfindlich bezeichnet werden.

2.3 Methoden zur Abschätzung der Lebensdauer von PEHD-Dichtungsbahnen

Die geforderte Funktionsdauer variiert je nach Anwendung beträchtlich und liegt für Bauwerke üblicherweise im Bereich zwischen 25 und mehreren hundert Jahren. Sehr lange Funktionsdauern werden in der Regel immer dann gefordert, wenn ein Reparieren oder Ersetzen der Dichtungsbahn nicht oder nur unter schwierigsten Bedingungen möglich ist und gleichzeitig eine dauerhafte Dichtwirkung gewährleistet sein muss. Beispiele hierfür sind Deponiebasisabdichtungen sowie im Bergbau die Abdichtung von Erzhalde und Schlamm-speicherbecken. Da von diesen Bauwerken aufgrund der Zusammensetzung der eingelagerten Stoffe langfristig ein erhebliches Gefährdungspotential für die Umwelt, insbesondere für das Grundwasser, ausgeht, müssen Dichtungsbahnen für diese Anwendungen eine dauerhafte Funktion als Flüssigkeitsbarriere aufweisen.

2.3.1 Funktionsdauer von Dichtungsbahnen in abgedeckten Anwendungen

Für Anwendungen, bei denen die Dichtungsbahnen unmittelbar nach dem Einbau dauerhaft abgedeckt werden, und somit nicht dem Sonnenlicht ausgesetzt sind, liegen verschiedene Untersuchungen und Berechnungsmodelle zur Abschätzung der Funktionsdauer vor. Zwei Modelle werden im Folgenden kurz vorgestellt.

In den USA werden Dichtungsbahnen mit einer Dicke von 1,5 mm seit mehreren Jahren den simulierten Umgebungsbedingungen einer Deponiebasisabdichtung ausgesetzt [8]. Als Auflager wird von außen belüfteter trockener Sand verwendet. Oberhalb der Dichtungsbahnproben wird ebenfalls Sand und zur Simulation der Flüssigkeitseinwirkung Wasser in 30 cm Höhe aufgestaut. Die Druckbelastung beträgt 260 kPa. Zur Verkürzung der Prüfzeit wird bei erhöhten Temperaturen geprüft. Um eine Extrapolation hin zu Umgebungstemperaturen vor-

nehmen zu können wird bei 4 unterschiedlichen Temperaturen gemessen (55, 65, 75, 85 °C).

Es werden 3 Phasen der Alterung beschrieben. In Phase A werden die vorhandenen Antioxidantien verbraucht. Dies wird auch als „antioxidant depletion time“ bezeichnet [12]. Phase B, die so genannte Induktionszeit, beschreibt die Dauer zwischen vollständigem Verbrauch der Antioxidantien und beginnender Versprödung des Materials. In Phase C findet die tatsächliche Veränderung der Molekülstruktur mit einhergehender Verschlechterung der maßgeblichen mechanischen Eigenschaften statt. Das Absinken des Wertes der betrachteten Eigenschaft auf 50% des Ausgangsniveaus wird beispielhaft als Endpunkt der Phase C für die Extrapolation zugrunde gelegt.

Die prognostizierte Funktionsdauer beträgt insgesamt 970 Jahre, wobei Phase A mit ca. 200 Jahren, Phase B mit ca. 30 Jahren und Phase C mit ca. 740 Jahren abgeschätzt wurde [8, 11].

Anzumerken ist, dass die Dichtungsbahnen nach Beendigung von Phase C weiterhin als Flüssigkeits- und/oder Gasbarriere funktionieren würden, da die Verminderung einer relevanten Eigenschaft auf 50% ihres Ausgangswertes in der Regel noch nicht zu einem Versagen der Dichtungsbahn führt.

Einen anderen Weg beschreiben Müller und Jacob in [3]. Unterschiedliche Dichtungsbahnen mit einer Dicke von 2,5 mm wurden sowohl in Luft als auch im Wasserbad bei jeweils 80°C über einen Zeitraum von mehr als 13 Jahren (Luft) bzw. 6 Jahren (Wasser) gelagert. Untersucht wurden die Veränderungen der Reißdehnung sowie der oxidativen Induktionszeit. Dabei ergab sich, dass die Alterung im Wasserbad deutlich schneller voranschreitet, als an der Luft. Es findet eine Migration/Auslaugung der Antioxidantien statt, die den Alterungsprozess und somit die Funktionsdauer von Dichtungsbahnen maßgeblich beeinflusst. Die oxidative Alterung an der Luft erfolgt vergleichsweise langsam und spielt im Vergleich zur Migration/Auslaugung nur eine untergeordnete Rolle. Im Wasserbad trat bei einigen Proben nach vollständigem Verlust der Antioxidantien ein schnelles Absinken der Reißdehnung ein.

Die untere Grenze der Funktionsdauer der getesteten Dichtungsbahnen wurde mit mindestens 300 Jahren berechnet (bezogen auf 20°C Gebrauchstemperatur). Hierbei wurde eine sehr niedrige Aktivierungsenergie zugrunde gelegt. Führt man die Berechnung mit höheren Aktivierungsenergien durch, die für einige hochmolekulare Stabilisatoren in PEHD ermittelt wurden, kommt man zu Funktionsdauern von über 1000 Jahren. Needham et. al. haben un-

ter Zugrundelegung der höheren Aktivierungsenergie die Funktionsdauer sogar auf über 5.000 Jahre hochgerechnet [10].

PEHD-Dichtungsbahnen mit BAM-Zulassung sind somit als dauerhaft beständiges Bauprodukt nach der Definition des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBT) anzusehen.

2.3.2 Funktionsdauer von Dichtungsbahnen in freibewitterten Anwendungen

Der Alterungsprozess von freibewitterten Dichtungsbahnen ist aufgrund der im Sonnenlicht enthaltenen UV-Strahlung im Vergleich zu abgedeckten Anwendungen, deutlich beschleunigt.

Den besten UV-Schutz für PEHD bietet spezieller, feinst verteilter Ruß. Ebenfalls einen relativ guten UV-Schutz stellt die Beimischung von Titandioxid in weißen Dichtungsbahnen dar. Eine weitere Verbesserung der UV-Beständigkeit wird durch Zugabe von chemischen UV-Stabilisatoren (Antioxidantien) erreicht. Die Stabilisatoren werden unter Einfluss von UV-Strahlung kontinuierlich verbraucht. Konstruktiv kann die UV-Beständigkeit sehr effektiv durch die Verwendung ausreichend dicker Dichtungsbahnen verbessert werden, da die Eindringtiefe der UV-Strahlung durch den Ruß gering ist. Die Schädigung findet somit nur im oberflächennahen Bereich der Dichtungsbahn statt, so dass diese ihre dichtende Funktion nicht verliert.

Verschiedene Labormethoden zur Bewitterung von Dichtungsbahnen verwenden UV-Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge und Intensität. Bewertungskriterium ist je nach Prüfmethode die Abnahme der Zugeigenschaften oder die Abnahme der oxidativen Induktionszeit. Aufgrund der Temperaturempfindlichkeit der häufig verwendeten HALS-UV-Stabilisatoren wird in den Empfehlungen des Geosynthetic Research Institute, Philadelphia, USA zur Bestimmung der Abnahme der UV-Stabilisatoren die Hochdruck-OIT-Prüfmethode empfohlen.

Präzise Modelle zur Übertragung von Laborergebnissen aus Bewitterungsversuchen auf die Abschätzung der Funktionsdauer von freibewitterten Dichtungsbahnen liegen nicht vor. Deshalb sind zur Abschätzung der Funktionsdauer von freibewitterten Dichtungsbahnen Feldversuche unerlässlich. Besonders hilfreich sind hierbei Untersuchungen an alten Dichtungsbahnen aus noch in Betrieb befindlichen Projekten, da die Dichtungsbahnen unter realen Gebrauchsbedingungen gealtert sind.

3. Alterung von freibewitterten Dichtungsbahnen / Projektbeispiele

Im Folgenden werden die Ergebnisse von 4 verschiedenen Projekten vorgestellt:

Bauvorhaben	Baujahr / Prüfwahl	Nennstärke [mm]	Formmassentyp
Galing I	1974 / 1994	2,5	Vestolen A 4541 R
Galing II	1984 / 2000	2,5	Vestolen A 3512 R
Rechlin	1992 / 2005	2,5	Vestolen A 3512 R
Sar-Chesmeh (Iran)	1975 / 2000	2,5	Vestolen A 3512 R

Tabelle 3.1 Projektübersicht

3.1 Jarositschlammdeponie Galing I+II:

1974 wurde am Standort Galing das erste Schlammbecken zur Deponierung von Jarositschlamm errichtet, der als Abfall bei dem Produktionsprozess einer Zink- und Bleihütte anfällt. Der Jarositschlamm wurde mit einem Wassergehalt von ca. 50-60 % und einem pH-Wert von ca. 2-4 eingelagert. Die Deponie liegt ca. 10 km nördlich von Nordenham in Galing, in der Nähe der Nordsee. Die abgedichtete Fläche betrug 11ha.

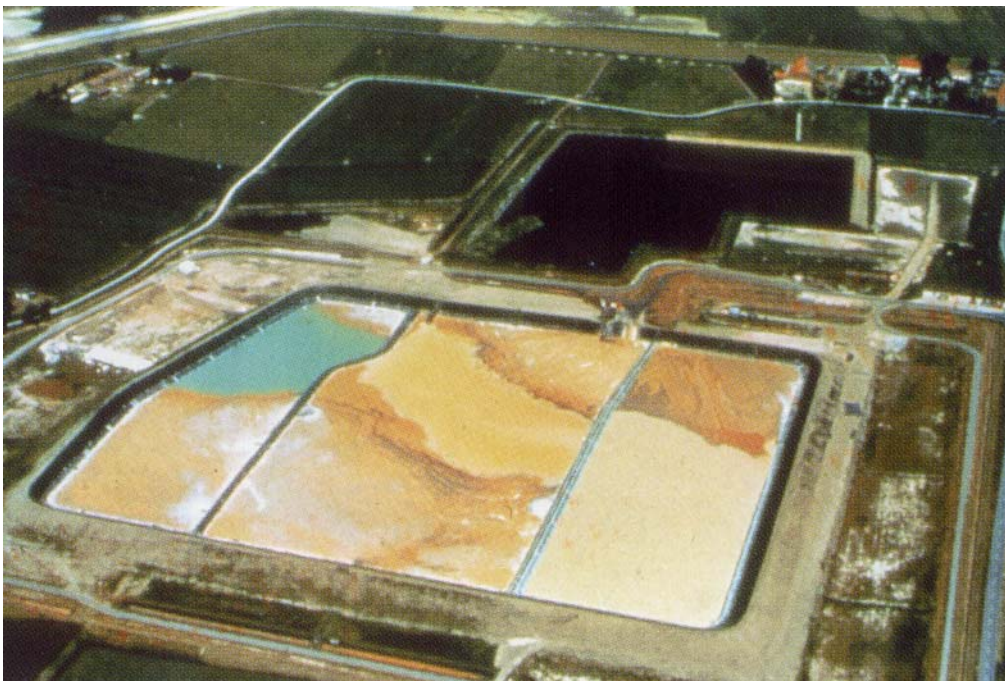


Bild 3.1 Jarositschlammdeponie Galing I + II (1974 / 1984)

Zum Einsatz kam eine 2,5 mm dicke Dichtungsbahn der Schlegel Lining Technology GmbH, welche im so genannten Web-Extrusionsverfahren in einer Breite von 10,20 m aus der Formmasse Vestolen A 4541 R hergestellt wurde. Die maßgeblichen Eigenschaften von Vestolen A 4541 R sowie der anderen untersuchten Typen sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. 1994 wurde Proben aus der Böschungsabdichtung entnommen und beim SKZ Würzburg sowie im Labor Büro Dr. Knipschild / Rosengarten getestet. Die vorliegenden Ergebnisse sind weniger detailliert, als für Galing II (siehe unten). Die Oxidationsstabilität der Bahn hatte insbesondere an der Bahnenober- und Unterseite abgenommen, die Funktion der Dichtungsbahn insgesamt war jedoch noch nicht beeinflusst [15, 16, 17]. Das beprobte Dichtungsbahnstück liegt auch heute noch freibewittert auf einem der Beckenaussendämme und soll in diesem Jahr – nach über 30 Jahren Freibewitterung – erneut überprüft werden.

1984 wurden am selben Standort ein weiteres Schlammbecken zur Lagerung von Jarositschlamm im Auftrag der Metalleurop GmbH / Nordenham gebaut, da die maximale Aufnahmekapazität der Deponie Galing I erreicht war. Die Basisfläche misst ca. 400 x 300 m, die umschließenden Dämme haben eine Höhe von 10 m und eine Neigung von 1:2. Als primäres Abdichtungselement kam erneut eine 2,5 mm dicke Dichtungsbahn derselben Fertigungsmethode zum Einsatz. Für dieses Bauvorhaben wurde der speziell für Dichtungsbahnen entwickelte, weniger spröde Formmassentyp Vestolen A 3512 R verwendet, welcher in den darauf folgenden Jahren weit verbreitet, auch für BAM-zugelassene Dichtungsbahnen eingesetzt wurde. Unterhalb der Dichtungsbahn wurde eine 50 cm mächtige Kleischicht eingebaut, so dass eine Kombinationsabdichtung entstand. Im Sohlbereich wurde unterhalb der Dichtungsbahn eine Kontrolldränage vorgesehen; oberhalb der Dichtungsbahn wurde zur Entwässerung des Jarositschlammes eine Flächendränage eingebaut. Die verlegten Dichtungsbahnen sind auf den freiliegenden Böschungsbereichen permanent der Witterung ausgesetzt.

Bereits 1984 während des Baus des 2. Beckens wurde ein umfangreiches Prüfprogramm zur Untersuchung des Langzeitverhaltens der freibewitterten Dichtungsbahnen festgelegt. Hierzu wurde im nord-östlichen Böschungsbereich auf voller Länge eine zusätzliche Dichtungsbahn mit mittig angeordneter Schweißnaht auf die vorhandene Abdichtung aufgeschweißt. Aus diesem Probestück wurden turnusmäßig (letztmalig in 2000) Proben entnommen und beim Süddeutschen Kunststoffzentrum - SKZ Würzburg geprüft [14]. Die Prüfergebnisse sind in Anlage 1 zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich nach 16 Jahren Freibewitterung die relevanten mechanischen Eigenschaften nicht signifikant verändert haben. Dies gilt sowohl für die Dichtungsbahn als auch für die Festigkeit der Schweißnähte.

Deutliche Veränderungen kann man bei der oxidativen Induktionszeit feststellen, die bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen wurde (Bild 3.2). Die oxidative Induktionszeit nahm im Laufe der Jahre stetig ab, was gleichbedeutend mit dem langsamen Verbrauch der Antioxidantien ist. Um den Restgehalt der Antioxidantien bei der Wiederholungsprüfung im Jahr 2000 besser bestimmen zu können, wurde bei niedrigen Temperaturen gemessen. Bezogen auf das weiter oben skizzierte Modell von Koerner lässt sich das Ergebnis dahingehend interpretieren, dass sich der Alterungsprozess der Dichtungsbahn immer noch in Phase A befindet, in der die Antioxidantien allmählich verbraucht werden, ohne dass die Dichtungsbahn geschädigt oder in ihrer Funktion beeinträchtigt wird. Die in Zukunft geplanten Prüfungen an der weiterhin freibewitterten Probe soll Aufschluss über das Ende der Phase A bringen. Des Weiteren soll die Geschwindigkeit der Abnahme der mechanischen Festigkeit nach vollständigem Verbrauch der Antioxidantien ermittelt werden (Phase C), um letztendlich eine genauere Aussage über die tatsächliche Funktionsdauer der Dichtungsbahn zu erhalten.

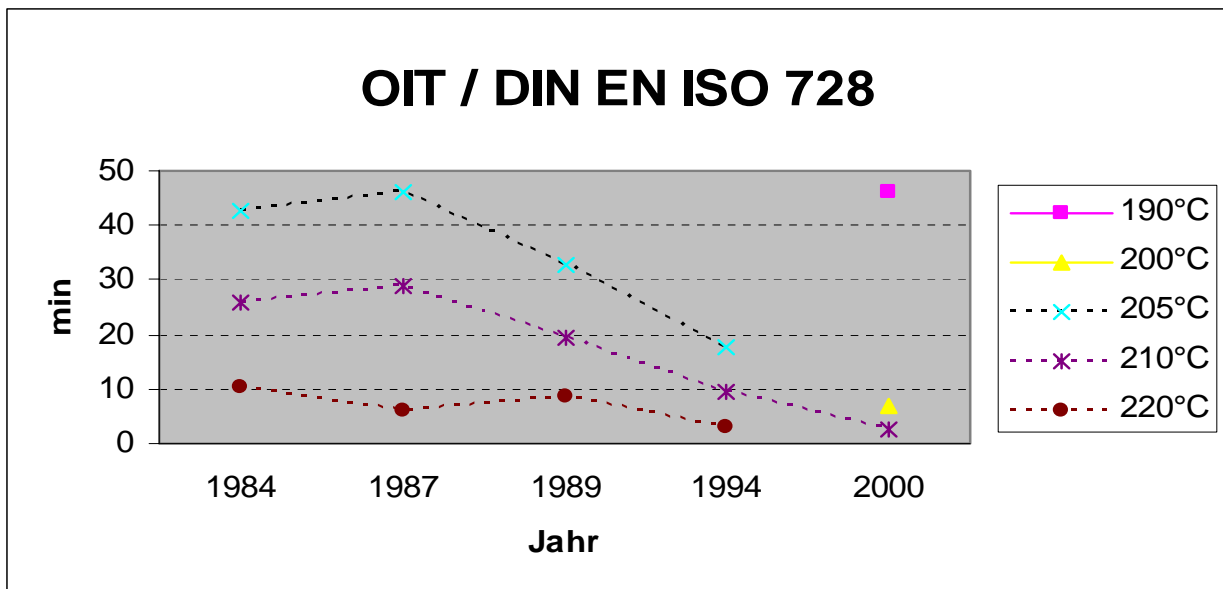


Bild 3.2 OIT-Werte, freibewitterte Probe, Galing II

Ende 2004 wurden im Labor in Rechlin zusätzliche Vergleichsuntersuchungen zwischen der Originalrückstellprobe aus 1984 (Galing II Nullprobe) und einer heute BAM-zugelassenen Dichtungsbahn aus Dowlex 2342M (Rückstellprobe aus 1998) durchgeführt. Beide Proben wurden unter vergleichbaren Bedingungen lichtgeschützt bei normalen Umgebungstemperaturen gelagert. Beide Proben wurden gemäß dem ursprünglichen Prüfprogramm Galing II vor und nach Warmlagerung im Wärmeschrank bei 85°C (gemäß prEN 14575:2002) getestet, um eine vergleichende Abschätzung der Oxidationsstabilität zu erhalten. Die erste Probeent-

nahme erfolgte nach 42 Tagen Warmlagerungszeit, um die Ergebnisse im Rahmen dieser Fachtagung veröffentlichen zu können. Die Warmlagerung wird fortgesetzt und es ist geplant, nach 90 sowie 180 Tagen weitere Proben zu entnehmen. Die Ergebnisse sind in Anlage 2 zusammengestellt.

Die über 20 Jahre als Rückstellmuster eingelagerte Probe (Galing II Nullprobe aus Vestolen A 3512 R) stimmt hinsichtlich der gemessenen Werte sehr gut mit den 1984 bestimmten Werten überein. Die Rückstellprobe ist quasi nicht gealtert, denn auch die OIT-Werte korrelieren hinreichend genau mit den 1984 ermittelten Werten. Vergleicht man die Ergebnisse dieser Probe vor und nach 42-tägiger Ofenalterung, stellt man eine deutliche Reduzierung der OIT-Werte um ca. 25% fest (die Änderung bei 210°C ist noch größer). Ebenfalls festzustellen ist die Abnahme der Zugfestigkeit, der Reißdehnung und der Spannungsrißbeständigkeit. Die Bestimmung der Spannungsrißbeständigkeit wurde gemäß der oben beschriebenen NCTL-Methode bestimmt, da die ursprünglich verwendete Methode (ASTM D 1693) für heutige Dichtungsbahnen nicht mehr selektiv ist.

Im Gegensatz zur Vestolen-Probe lässt sich an der ofengealterten Dowlex-Probe keine signifikante Änderung von Zugfestigkeit und Reißdehnung feststellen. Allerdings sind die Werte für die Schlagzugzähigkeit und die zugehörige bleibende Dehnung deutlich reduziert, insgesamt aber liegen sie immer noch ca. um den Faktor 3 höher als bei der Vestolen-Probe. Die Dowlex-Probe weist eine deutlich höhere Oxidationsstabilität als die Vestolen-Probe auf. Die Abnahme der OIT-Werte ist hier <10%. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass diese Ergebnisse keine direkten Rückschlüsse auf die Oxidationsstabilität in Kontakt mit flüssigen Medien zulassen.

Vergleicht man abschließend die Spannungsrißbeständigkeit beider Proben, wird der Unterschied zwischen den beiden Formmassen am deutlichsten. Während die Standzeit für die Vestolen-Probe im Mittel bei ca. 50 Stunden liegt, wurden die Versuche an den Dowlex-Proben nach mehr als 1.000 Stunden Standzeit abgebrochen, ohne dass ein Probekörper gebrochen ist. Der Wert der Spannungsrißbeständigkeit für die Dowlex-Probe nach der Ofenalterung lag zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichts noch nicht vor.

Aufgrund der unterschiedlich langen Einlagerungszeit der Rückstellproben (20 Jahre bzw. 7 Jahre) muss die vergleichende Bewertung mit einem gewissen Maß an Vorsicht betrachtet werden. Allerdings kann man, ohne exakte Werte zu quantifizieren, davon ausgehen, dass heutige Dichtungsbahnen mit BAM-Zulassung vergleichbaren Produkten aus der Zeit Mitte bis Ende der 80er-Jahre deutlich überlegen sind.

Eigenschaft	Einheit	Vestolen A 4541 R ⁽¹⁾	Vestolen A 3512 R ⁽¹⁾	Dowlex 2342 M ⁽²⁾
Dichte	g/cm ³	0,956	0,944	0,932 (0,942)
Schmelze- Massefließrate MFR 190/5	g/10 min	0,3	1,6	2,6
Zugeigenschaften				
Streckspannung	N/mm ²	23	18	16
Streckdehnung	%	-	12	14
Zugfestigkeit	N/mm ²	-	30	30
Reißdehnung	%	> 700	> 700	> 800

⁽¹⁾ mit Ruß eingefärbte Formmasse

⁽²⁾ uneingefärbte Formmasse (Wert in Klammern, mit Ruß eingefärbter Formstoff - nach Verarbeitung)

Tabelle 3.2 Nennwerte wichtiger Formmasseneigenschaften im Ursprungszustand

3.2 Feuerlöschteich Rechlin

1992 wurde im Zuge der Verlagerung der Produktionsstätte von Hamburg nach Mecklenburg-Vorpommern am neuen Standort Rechlin / Müritz ein Feuerlöschteich gebaut. Die Abdichtung erfolgte mittels einer auf einem Sandplanum verlegten Dichtungsbahn, die in 2,5 mm Dicke aus Vestolen A 3512 R hergestellt wurde. Der weitestgehend konstante Wasserspiegel ermöglichte die Beprobung der dauerhaft freiliegenden Dichtungsbahnen oberhalb des Wasserspiegels, im Bereich der Wasserwechselzone sowie unterhalb des Wasserspiegels.



Bild 3.3 Feuerlöschteich Rechlin (1992); der Wasserspiegel wurde zum Zwecke der Beprobung kurzfristig abgesenkt

In Anlage 3 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Die Werte für Dichte, MFR, Zugeigenschaften, Nahtfestigkeit und Schlagzugzähigkeit liegen für alle Beprobungsbereiche in der gleichen Größenordnung und entsprechen denen des Ausgangsmaterials. Änderungen sind für OIT und Spannungsrissbeständigkeit zu erkennen. Auf den ersten Blick lässt sich feststellen, dass die Messergebnisse uneinheitlich sind und keine deutliche Tendenz zeigen.

Die gemessenen OIT-Werte sind oberhalb des Wasserspiegels am größten und für die Wasserwechselzone sowie unterhalb des Wasserspiegels etwa gleich groß, allerdings mit sehr großer Streubreite. Andererseits ist die Spannungsrissbeständigkeit unterhalb des Wasserspiegels am größten und oberhalb des Wasserspiegels am niedrigsten. Dies könnte darauf hindeuten, dass UV-Strahlung die Dichtungsbahnen in geringem Maße bereits in der Phase des Antioxidantien-Verbrauchs durch direkte Spaltung von Molekülketten schädigt.

3.3 Wasserreservoir Sar-Chesmeh / Iran

Das Reservoir wurde 1975 zur Wasserversorgung für eine neuen Kupfermine und die zugehörige Stadt gebaut. Die Gesamtspeicherkapazität beträgt ca. 350.000 m³. Zur Beckenabdichtung wurden 40.000 m² Dichtungsbahn, der Schlegel Lining Technology GmbH, d = 2,5 mm, gefertigt aus Vestolen A 3512 R verlegt. Die offenliegenden Dichtungsbahnen sind auf-

grund der Lage des Reservoirs im Gebirge dauerhaft extremen Witterungsbedingungen ausgesetzt, wie intensive UV-Strahlung, hohe Windgeschwindigkeiten und große Temperaturunterschiede von -26°C bis $+38^{\circ}\text{C}$.



Bild 3.4 Wasserreservoir Sar-Ceshmeh / Iran (1975)

Das Becken und die Abdichtung sind seit 1975 intakt. Im September 2000 wurde aus dem obersten Bereich der Böschungsabdichtung, welcher permanent der Witterung ausgesetzt ist, eine Probe entnommen und im Labor in Rechlin untersucht. Die Ergebnisse sind in Anlage 4 zusammengestellt.

Die Dichte und die Streckspannung zeigen geringfügig höhere Werte als die Ausgangsprobe, während der Schmelzindex geringer liegt. Alle weiteren geprüften Eigenschaften wie Streckdehnung, Reißfestigkeit, Reißdehnung und Weiterreißwiderstand liegen auf dem Niveau des Materials im Ursprungszustand. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Funktion der Abdichtung bis heute nicht beeinträchtigt ist und es keinerlei Anzeichen für den Beginn des Versprödungsprozesses gibt.

Die zusätzliche Messung der oxidativen Induktionszeit bei unterschiedlichen Temperaturen könnte Aufschluss darüber geben, in welchem Maße sich noch wirksame Antioxidantien in

der Polymermatrix befinden. Es ist deshalb beabsichtigt, dass weiterhin intakt befindliche Becken in Zukunft erneut zu beproben.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Bericht wurde der Kenntnisstand zur Abschätzung der Funktionsdauer von Dichtungsbahnen skizziert. Es wird verdeutlicht, dass nur für Dichtungsbahnen, die gemäß dem Stand der Technik hergestellt und installiert werden, die Aussagen zur Funktionsdauer zutreffend sind.

Für BAM-zugelassene oder qualitativ vergleichbare Dichtungsbahnen mit einer Mindestdicke von 2,5 mm beträgt die geschätzte Funktionsdauer in Anwendungen ohne UV-Belastung je nach gewähltem Ansatz mindestens 300 bis zu mehr als 1.000 Jahre.

Zur Abschätzung der Funktionsdauer von freibewitterten Dichtungsbahnen des gleichen Typs in offenliegenden Anwendungen wurden Untersuchungsergebnisse von bis zu 30 Jahren alten Proben ausgewertet. Für die betrachteten Projekte ist eine Funktionsdauer der Dichtungsbahn von mindestens 30 Jahren nachgewiesen. Vergleichsuntersuchungen mit einer heutzutage BAM-zugelassenen Dichtungsbahn lassen darauf schließen, dass zukünftig noch längere Funktionsdauern in freibewitterten Anwendungen erzielt werden können.

Das Prüfprogramm wird in den nächsten Jahren fortgesetzt. Dabei sollen auch Proben aus abgedeckten Anwendungen untersucht werden.

Literaturliste

- [1] Burkhardt, G.; Egloffstein, T., (2004)
Vorzeitige Stilllegungen nach § 14 Abs. 6 DepV. anhand eines Beispiels einer Dk II-Deponie, In: Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2004, Erich Schmidt Verlag, Berlin

- [2] Palm, A.; Schmitt-Tegge, J.D.; Sondermann, W.D. (2003)
Technische Maßnahmen zur Deponiestilllegung – Oberflächenabdeckungen,
In: Leitfaden zur Deponiestilllegung (2003), Technisches Kennblatt IV/2-10 – Elemente der Oberflächenabdichtung – Kunststoffdichtungsbahn

- [3] Müller, W.W.; Jakob, I. (2003)
Oxidative resistance of high-density polyethylene geomembranes,
In: Elsevier, Polymer Degradation and Stability 79 (2003) pp. 161-172
- [4] Müller, W.W. (2001)
Handbuch der PE-HD-Dichtungsbahnen, Birkhäuser Verlag
- [5] Accorsi, John V. (1999)
The Impact Of Carbon Black Morphology And Dispersion On The Weatherability of Polyethylene; in: International Wire & Cable Symposium, Atlantic City (1999)
- [6] Grassie, N., Scott, G. (1985)
Polymer Degradation and Stabilization. In: Cambridge University Press, New York, USA, 222p
- [7] Rowe, R.K.; Sangam, H.P. (2002)
Durability of HDPE geomembranes, In: Elsevier, Geotextiles and Geomembranes 20 (2002) pp. 77-95
- [8] Koerner, R.M. (1999)
Designing with Geosynthetics, Fourth Edition, Prentice-Hall, Inc., New Jersey
- [9] Wagner, N.; Ramsey, B.
QUV Accelerated Waethering Study: Analysis of Polyethylene Film and Sheet Samples
- [10] Needham, A.; Gallagher, E.; Peggs, I.; Howe, G.; Norris, J. (2004)
The Likely Medium to Long-Term Generation of Defects in Geomembrane Liners, R&D Technical Report P1-500/1/TR, Environment Agency, United Kingdom
- [11] "1st 'Video' & 'Internet' – Conference on Geomembranes", Hamburg, 16.03.2004
- [12] Koerner, R.M.; Hsuan, Y.G. (2002)
Antioxidant Depletion Time in High Density Polyethylene Geomembranes,
In: Assessment and Recommendations for Improving the Performance of Waste Containment Systems, Appendix B, EPA United States Environmental Protection Agency

- [13] Hsuan, Y.G. (2000)
Data base of field incidents used to establish HDPE geomembrane stress crack resistance specifications,
In: Elsevier, Geotextiles and Geomembranes 18 (2000) pp. 1-22
- [14] Gutachten Nr. 42192/00
Untersuchungen zum Alterungsverhalten von PE-HD-Bahnen (SLT-Platten) aus der Basisabdichtung der Jarosit-Deponie Galing II, SKZ – TeConA GmbH, Würzburg
- [15] Prüfzeugnis Nr. 30676/95
Bestimmung der Oxidationsstabilität an Bahnen aus PE-HD, SKZ – TeconA GmbH, Würzburg
- [16] Gutachten Nr.: 28894/94
Untersuchungen zum Alterungsverhalten von PE-HD-Bahnen (SLT-Platten) aus der Basisabdichtung der Jarosit-Deponie Galing – Untersuchung einer Mitte der 70er Jahre verlegten Probe im Bereich Galing I
- [17] Prüfbericht PB-21/09/95
Untersuchungen zum Alterungszustand der PE-HD-Dichtungsbahnen, Basisabdichtung der Jarosit-Deponie Galing 1, Büro Dr. Knipschild

Eigenschaft	Prüfmethode	Einheit	Ergebnisse									
			1984		1987		1989		1994		2000	
			x	s	x	s	x	s	x	s	x	s
Dichte	DIN 53479-A	g/cm ³	0.947		0.947		0.947		0.949		0.947	
MFR 190/5	DIN EN ISO 1133	g/10 min	1.51		1.47		1.66		1.56		1.68	
Streckspannung												
längs		N/mm ²	20,2	0,6	19,5	0,2	19,0	0,2	20,3	0,1	21,0	0,0
quer		N/mm ²	20,1	0,4	19,3	0,5	18,9	0,4	20,4	0,2	20,5	0,1
Streckdehnung												
längs		%	10,2	0,5	10,7	0,5	10,8	0,5	11,4	0,7	11,6	0,3
quer	DIN EN ISO 527-3	%	9,9	0,5	10,5	0,2	10,8	0,6	11,4	0,3	12,1	0,6
Reißfestigkeit	PK 5; 100 mm/min											
längs		N/mm ²	36,3	1,1	34,7	2,5	33,6	2,2	34,1	1,9	35,9	1,4
quer		N/mm ²	37,4	1,5	32,6	2,9	31,2	5,7	35,4	1,3	36,4	0,8
Reißdehnung												
längs		%	980	21	992	31	982	22	974	26	977	15
quer		%	1012	36	982	50	929	126	1012	13	1003	13
Streckspannung der Überlappnaht;	In Anlehnung an DIN 16726:1986; PK A; 100 mm/min	N/mm ²	20,8	0,4	21,3	0,4	18,5	0,3	20,2	0,1	19,3	0,1
Versagensart			Verstreckung außerhalb der Fügenaht									
Schälwiderstand der Überlappnaht;	In Anlehnung an DIN 16726:1986; PK A; 100 mm/min	N/mm	36,3	1,8	36,0	2,3	37,8	1,3	37,8	0,4	40,4	1,6
Versagensart			Verstreckung außerhalb der Fügenaht									
Spannungsrißbeständigkeit	ASTM D 1693	h	> 2000		> 2000		> 2000		> 2000		> 2000	
Maßänderung n. Warmlagerung												
längs	DIN EN ISO 14632	%	-0.7		-0.9		-0.9		-0.8		-0.7	
quer		%	0.0		0.1		0.0		0.0		0.0	
Oxidationsstabilität												
Induktionszeit bei												
220 °C		min	10,4	0,6	6,3	0,3	8,7	2,2	2,9	0,0	-	
210 °C	DIN EN ISO 728	min	25,7	2,3	28,7	2,6	19,5	2,6	9,6	0,2	2,4	0,3
205 °C		min	42,8	0,7	46,1	2,5	32,7	0,2	17,8	1,3	-	
200 °C		min	-		-		-		-		7,1	0,9
190 °C		min	-		-		-		-		46,3	2,7

Anlage 1 Meßergebnisse aus der Beprobung Galing II

x = arithmetischer Mittelwert; s = Standardabweichung

(entnommen aus SKZ-Gutachten Nr. 42192/00 vom 10.08.2001)

Eigenschaft	Prüfmethode	Einheit	Ergebnisse							
			Dowlex 2342M				Vestolen A 3512 R (Galing)			
Rohstoff			BF2164WH				807			
Rollennummer			unbewittert (1998)*		nach Ofenalterung (42 d)		unbewittert (1984)*		nach Ofenalterung (42 d)	
			x	s	x	s	x	s	x	s
Dichte	DIN 53479-A	g/cm ³	0,944		0,944		0,946		0,946	
MFR 190/5	DIN EN ISO 1133	g/10 min	2,20		2,07		1,60		1,55	
Streckspannung										
längs		N/mm ²	18,0	0,2	18,5	0,2	19,7	0,2	20,2	0,4
quer		N/mm ²	17,9	0,2	18,7	0,2	22,0	0,1	22,4	0,2
Streckdehnung										
längs		%	12,3	0,4	12,9	0,6	11,2	0,5	11,2	0,4
quer	DIN EN ISO 527-3 PK 5; 100 mm/min	%	12,1	0,7	12,7	0,8	10,9	0,5	11,2	0,4
Reißfestigkeit										
längs		N/mm ²	33,4	3,2	37,6	1,3	34,8	2,6	32,0	1,6
quer		N/mm ²	35,0	1,2	31,6	3,8	41,4	1,9	29,2	1,3
Reißdehnung										
längs		%	819	60	909	13	962	58	907	45
quer		%	864	33	811	56	1110	37	837	13
Schlagzugzähigkeit										
längs		mJ/mm ²	1980	8	1478	141	487	27	475	59
quer	DIN EN ISO 8256 - A/3	mJ/mm ²	1980	0	1363	355	534	134	508	35
bleibende Dehnung										
längs		%	750	10	487	76	93	21	93	21
quer		%	743	6	400	80	113	50	97	15
Spannungsriß- beständigkeit	ASTM D 5397, Anhang	h	> 1016	--	in Prüfung		51,6	--	37,6	2,6
Maßänderung n. Warmlagerung										
längs	DIN EN ISO 14632	%	-0,2	0,0	-0,1	0,0	-0,5	0,1	-0,5	0,1
quer		%	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,7	0,0	-0,7	0,0
Oxidationsstabilität Induktionszeit bei										
210 °C	DIN EN ISO 728	min	42,5	2,1	41,5	** (2,4 %) 0,7	22	--	12	** (45,5 %) 0,0
200 °C		min	101,5	0,7	95,5	** (5,9 %) 2,1	56	--	43	** (23,2 %) 1,4
190 °C		min	232,5	6,4	218,5	** (6,0 %) 0,7	131	--	96,5	** (26,3 %) 0,7

Anlage 2 Vergleichsuntersuchung Rückstellproben Galing II + Dowlex 2342 M (BAM)

x = arithmetischer Mittelwert; s = Standardabweichung ; * = Produktionsjahr; ** = prozentuale Abnahme

Eigenschaft	Prüfmethode	Einheit	Ergebnisse					
			oberhalb des Wasserspiegels		im Bereich wechselnder Wasserstände		unterhalb des Wasserspiegels	
			x	s	x	s	x	s
Dichtungsbahn aus Vestolen A3512R								
Dichte	DIN 53479-A	g/cm ³	0.945		0.946		0.944	
MFR 190/5	DIN EN ISO 1133	g/10 min	1.45		1.48		1.42	
Streckspannung								
längs		N/mm ²	19.5	0.2	19.2	0.1	18.8	0.3
quer		N/mm ²	19.5	0.4	19.5	0.3	19.1	0.1
Streckdehnung								
längs		%	12.2	0.0	12.4	0.8	11.4	0.2
quer	DIN EN ISO 527-3 PK 5; 100 mm/min	%	11.9	0.6	12.2	0.5	11.7	0.4
Reißfestigkeit								
längs		N/mm ²	31	4	34	2	37	2
quer		N/mm ²	30	6	32	3	31	6
Reißdehnung								
längs		%	913	108	987	51	1019	19
quer		%	897	141	978	82	868	147
Schlagzugzähigkeit								
längs		mJ/mm ²	744	58	805	17	776	17
quer	DIN EN ISO 8256 - A/3	mJ/mm ²	728	29	723	86	732	143
bleibende Dehnung								
längs		%	187	15	207	15	200	0
quer		%	183	6	193	31	183	55
Schälwiderstand	DVS 2226-3	N/mm	37.8	2.2	36.9	2.1	36.6	3.2
Spannungsris- sbeständigkeit	ASTM D 5397, Anhang	h	61.9	11.2	62.0	1.5	79.7	6.7
Oxidationsstabilität Induktionszeit bei								
210 °C	DIN EN ISO 728	min	22.0	7.0	15.0	8.5	14.3	6.0
200 °C		min	52.3	16.2	31.0	17.7	43.3	16.9
190 °C		min	187.7	44.6	72.0	65.0	118.0	24.3

Anlage 3 Meßergebnisse Feuerlöschteich Rechlin

x = arithmetischer Mittelwert; s = Standardabweichung

Eigenschaft	Prüfmethode	Einheit	Ergebnisse		Nennwerte für Vestolen A 3512 R
			längs	quer	
Dicke	DIN 53370				
Minimum		mm	2.02		
Mittelwert		mm	2.38		
Maximum		mm	2.74		
Dichte	DIN 53479-A	g/cm ³	0.947		0.944
MFR 190/5	DIN 53735	g/10 min	1.24		1.6
Streckspannung	DIN EN ISO 527-3 PK 5; 100 mm/min	N/mm ²	20.1	20.1	18
Streckdehnung		%	11	13	11
Reißfestigkeit		N/mm ²	33	34	35
Reißdehnung		%	1007	1005	>700
Maßänderung n. Warmlagerung	DIN 53377 (120°C/1h)	%	-1.1	-0.43	
Weiterreißwiderstand	DIN 53515	N/mm	168	169	150
Stempeldurchdrückkraft	FTMS 101/2065	N	682		

Anlage 4 Prüfergebnisse Iran Sar-Chesmeh / 1975
Schlegel-Platte; d = 2,5 mm; Vestolen A 3512 R