

Seedruckleitung aus HDPE: Restlebensdauer nach 47 Betriebsjahren im Ossiacher See

Von Ulrich Schulte, Joachim Hessel und Herbert Terwyen

Um die österreichischen Seen effektiv und wirkungsvoll vor einzuleitendem Abwasser zu schützen, wurde im Ossiacher See in Kärnten bereits 1971 eine etwa 13 km lange Seedruckleitung aus Polyethylen hoher Dichte verlegt. Dabei ging man von einer Einsatzzeit von 50 Jahren aus. Während diese Leitung bis heute zur Zufriedenheit aller funktioniert, erreicht sie nun das Ende der geplanten Einsatzzeit. Im Rahmen einer generellen Risikoabschätzung der Seedruckleitungen in den österreichischen Seen wurden Untersuchungen zur Restlebensdauer an einem Muster durchgeführt, das seit 1971 eingebaut war. Diese basieren auf vom schwedischen Physiker Arrhenius im 19. Jahrhundert entdeckte Zusammenhänge und führten zu dem Ergebnis, dass sowohl hinsichtlich Zeitstand als auch Wärmealterung der eingesetzte Werkstoff für mindestens weitere 50 Jahre verwendet werden könnte.

Ausgangssituation

Die Wasserqualität des Ossiacher Sees hatte sich in den Jahren 1964 bis 1967 durch die Einleitung von bestenfalls mechanisch gereinigtem Abwasser drastisch verschlechtert, so dass klar wurde, dass die aus der Stadt Feldkirchen und den am Ossiacher See liegenden Ortschaften stammenden häuslichen Abwässer vom See ferngehalten werden mussten. Man entschloss sich nach Untersuchung verschiedener Lösungsansätze zur Ableitung des Abwassers der Ortschaften am Seeufer zu einer Kläranlage westlich des Ossiacher Sees oder zur geplanten Kläranlage der Stadt Villach [1]. Da die Schwerpunkte des Abwasseranfalles am Ufer des Ossiacher Sees naturgemäß auf derselben Ebene lagen, war eine Ableitung des Abwassers zum Westende des Sees nur mit einem System aus Pumpstationen und Druckleitungen möglich. Eine Verlegung der Druckleitungen am Lande hätte neben der Zustimmung aller betroffenen Grundeigentümer auch eine lange Bauzeit benötigt. Die Zivilingenieure schlugen daher die Verlegung von verschweißten Kunststoffrohren am Boden des Ossiacher Sees vor; diese Verfahren war bislang nur für Transportleitungen von Trinkwasser angewendet worden.

Die Seedruckleitungen verbinden neun Hauptpumpstationen bei den Siedlungsschwerpunkten mit dem Anlandungsschacht am Westende des Ossiacher Sees. Vom Anlandungsschacht weg fließt das gepumpte Abwasser im freien Gefälle zur Kläranlage Villach, wo es entsprechend dem Stand der Technik gereinigt in die Drau eingeleitet wird. Die Pumpstationen und Druckleitungen mit einer Gesamtlänge von etwa 13 km wurden 1970 errichtet und konnten 1971 bereits in Betrieb gehen (**Tabelle 1**). Die Schmutzwasserkanalnetze an Land wurden bis 1976 fertiggestellt und werden seither nach Bedarf erweitert und verdichtet (**Bild 1**).

Insgesamt sind heute im Ossiacher See ca. 27,7 km Seedruckleitungen verlegt.

Technische Umsetzung

Als Werkstoff für die Leitungen wurde das damals noch recht neue Polyethylen hoher Dichte (Ziegler-Polyethylen) gewählt. Zum Zeitpunkt der Installation lagen grundlegende Berichte über die zu erwartende Lebensdauer der daraus gefertigten Rohre vor [2]. Langzeituntersuchungen bei verschiedenen Drücken und Temperaturen erlaubten,

Tabelle 1: Daten der verbauten Seedruckleitungen

Bezeichnung Strang (von – bis)	Baujahr	Länge [m]	max. Absenktiefe [m]	D [mm]	SDR	Material
Steindorf – Stiegl	1971	1.455	10	200	17	GM5010
Stiegl – Bodensdorf	1971	1.572	11	200	17	GM5010
Bodensdorf – Tschöran	1971	1.100	9	200	17	GM5010
Tschöran – Sattendorf	1971	3.860	49	355	17	GM5010
Sattendorf – Annenheim	1971	1.999	46	355	17	GM5010
Annenheim – Sammelschacht	1971	1.123	33	355	17	GM5010
Lido – Sammelschacht	1971	690	16	355	17	GM5010
Ossiach – Bodensdorf	1971	865	10	200	17	GM5010

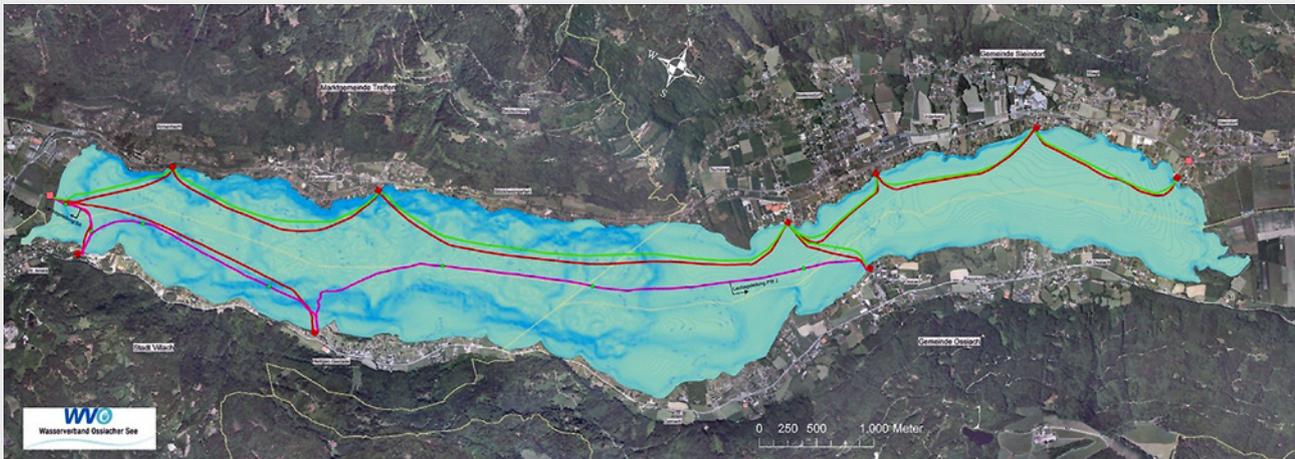


Bild 1: Seedruckleitungen im Ossiacher See (in grün: Verlegung 1971)

auf Basis des Arrhenius-Gesetzes [3] auf entsprechend längere Betriebszeiten bei niedrigeren Temperaturen zu extrapolieren. In der Auswertung konnte daraus ein sog. Zeitstanddiagramm für den entsprechenden Polyethylen-Werkstoff erstellt werden (**Bild 2**). Es wurde von einer kalkulatorischen Lebensdauer unter Betriebsbedingungen von 50 Jahren ausgegangen.

Da das Material leichter ist als Wasser, schwimmen die Leitungen, auch wenn sie vollständig mit Wasser gefüllt sind. Um sie am Seeboden ablegen zu können, müssen die Leitungen mit Gewichten beschwert werden. Die Betonelemente wurden so gewählt, dass die Leitungen durch Füllen mit Luft wieder aufgeschwommen werden können. In der ersten Ausbaustufe (1970) wurden die Rohre in 50 m langen Stangen per Eisenbahn antransportiert und nachts (bei ruhendem Bahnbetrieb) auf der Strecke ausgeladen; die Rohre wurden an Land verschweißt, mit Gewichten versehen und über den Zulauf in den See eingeschwommen; nachdem sie durch Motorboote richtig platziert waren, wurden die Leitungen durch Füllen mit Wasser auf den Seegrund abgesenkt; dies ist nur durch die Flexibilität der HDPE-Leitungen möglich. In einer zweiten Ausbaustufe (1978, Bau einer Doppelleitung) wurden bis zu 300 m lange Rohre vor Ort mit einer mobilen Extrusionsanlage produziert und entsprechend im See platziert.

Betriebsicherheit und Reparaturen

Im Betrieb werden die Rohre nicht besonders stark beansprucht, da durch die Pumpen nur der Druck zur Überwindung der Reibungsverluste aufgebracht werden muss; eine größere Beanspruchung stellen eventuell erforderliches Heben und Absenken der Leitungen sowie Druckprüfungen dar. Um die Alterung der Rohre durch Druckprüfungen zu vermeiden, wird die Dichtheit der Rohre durch den Vergleich der Mengenmessungen bei den Pumpstationen und dem Anlandungsschacht ständig überwacht. Bislang

gab es keine großen Rohrbrüche, die zu einem Ausfall der Druckleitungen geführt hätten, wohl aber gab es kleinere Beschädigungen von Rohren besonders im Anlandungsbereich durch Auflagerung auf spitzen Steinen oder bei Wanddurchführungen im Beton, wobei diese Beschädigungen bei Bauwerken durch Aufqualmen von Wasser beim Pumpvorgang oder durch einen ständig geringen Abfluss bei den Ausläufen in der Zeit bei Pumpenstillstand bemerkt werden konnten. Reparaturen waren durch Ersatz der fehlerhaften Stellen leicht möglich. Im Bereich des Anlandungsschachtes wurden nach ca. 35 Jahren Betriebszeit das Schachtbauwerk und ca. 300 m des abführenden Kanals wegen der starken Betonkorrosion durch das in den Druckleitungen anfallende Abwasser erneuert. Ebenso mussten die Pumpstationen saniert werden. Dabei wurden

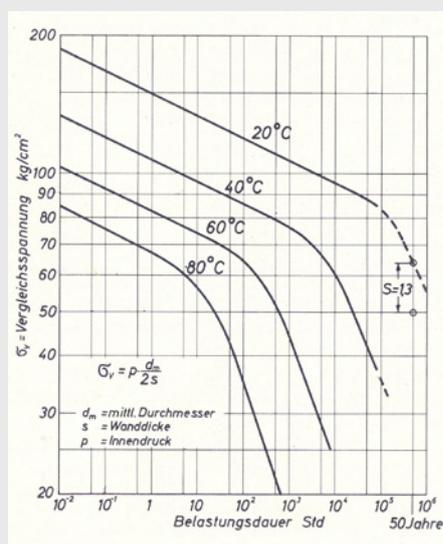


Bild 2: Zeitstandkurve Hostalen GM5010 (1. Generation)



Bild 3: Pröfmuster

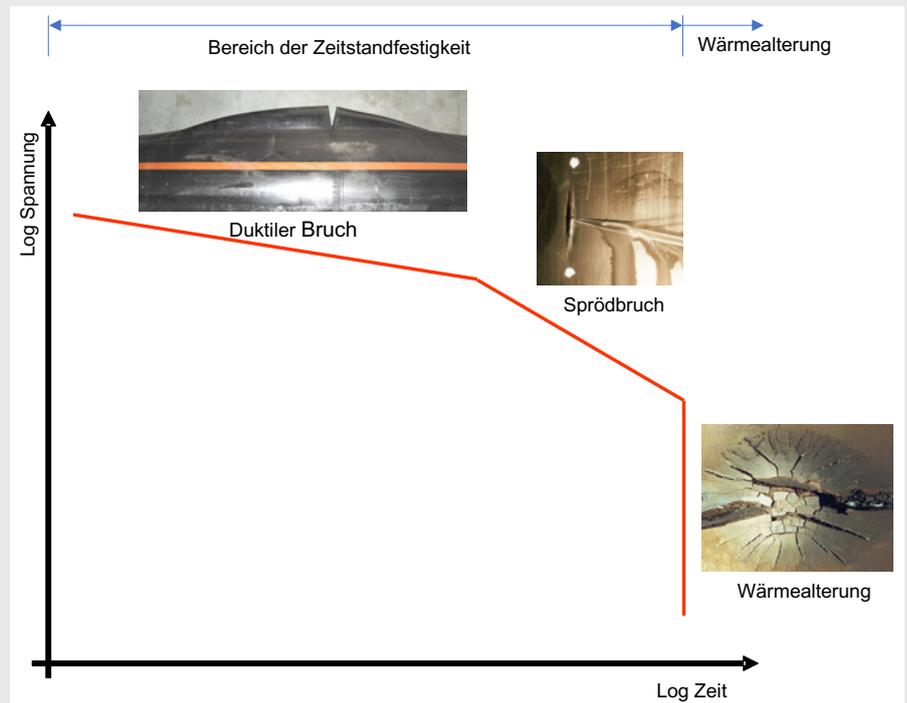


Bild 4: Schematische Darstellung der drei Bereiche der Zeitstandkurve

die elektrischen und elektronischen Bauteile erneuert. Die verwendeten Abwassertauchpumpen werden regelmäßig gewartet; ein Ersatz der 1970 angeschafften Pumpen war noch nicht erforderlich. Das System als Ganzes hat sich als sehr betriebsicher und zuverlässig herausgestellt und fördert pro Jahr ca. 1,1 Mio. m³ Abwasser.

Risikoabschätzung

Da die verwendeten Leitungen ihre damals kalkulierte Lebensdauer von 50 Jahren in naher Zukunft erreichen, stellte sich nun die Frage nach dem von ihnen ausgehenden Risiko, insbesondere in Verbindung mit der starken touristischen Nutzung des Sees.

Die besondere Art der Verlegung von Abwasserleitungen im Seebereich erfordert nach den gemeinschaftlichen Regelwerken der EU besondere Aufmerksamkeit. Hierbei ist vor allem die EU-Badegewässer-Richtlinie (RL 2006/7/EG) zu nennen. Des Weiteren wird gefordert, dass die zuständigen Behörden Maßnahmen zur Detektion und Reparatur bereits im Vorfeld treffen müssen. Eine Studie [5] beschäftigte sich ausführlich mit der Erhebung des Zustandes der in Österreich verlegten Seedruckleitungen aus (vorwiegend) Polyethylen und damit auch der 1971 verlegten Abwasserdruckleitung im Ossiacher See. Ob die in (naher) Zukunft geplanten Neubau- bzw. Sanierungsprojekte für die Polyethylen-Rohre wirklich mit ihrer Lebensdauer zu begründen sind oder andere Faktoren eine Rolle spielen, war zwar Thema während der Untersuchungen, eine Abschätzung der Restlebensdauer der verlegten Rohre wurde allerdings nicht vorgenommen.

Entsprechende Untersuchungen wurden nun vom Prüfinstitut Hessel Ingenieurtechnik in Roetgen, Deutschland, durchgeführt. Die Ergebnisse werden berichtet [4].

Vorbereitung der Untersuchungen zur Restlebensdauer

Das entsprechende Pröfmuster (schwarzes Rohr mit Stumpfschweißnaht und Vorschweißbund, Außendurchmesser 355 mm und 22,5 mm Wanddicke) wurde in der Nähe von Bodensdorf entnommen (Bild 3).

Bei einem Betriebsmedium von Abwasser wurde davon ausgegangen, dass die maximale Betriebstemperatur 15 °C betrug. Aufgrund der Betriebsbedingungen (konservativ angenommenen) wurde eine Auslegespannung von 3,4 N/mm² angesetzt.

Aus einem alten Projektbericht [6] ging hervor, dass 1971 als Rohrwerkstoff Hostalen GM5010 der damaligen Farbwerke Hoechst AG in Frankfurt am Main eingesetzt wurde. An Proben aus dem Pröfmuster wurde eine Dichte von 0,957 g/cm³ und eine Schmelze-Massefließrate (MFR) von 0,27 g/10 min bei 190 °C und 5 kg gemessen. Diese Werte entsprechen den damals veröffentlichten Daten des eingesetzten Werkstoffes.

Zur Beurteilung der Lebensdauer der verwendeten PE-Rohre müssen zwei Versagensmechanismen betrachtet werden:

1. die Zeitstandfestigkeit und
2. die Wärmealterung

Die Zeitstandfestigkeit ist eine Funktion der Temperatur und der Belastung und wird begrenzt durch den nahezu spannungsunabhängigen Versagensmechanismus

der Wärmealterung. Der Beginn der Wärmealterung ist hauptsächlich abhängig von der Temperatur, der Strömungsgeschwindigkeit, dem Sauerstoffgehalt am Rohr sowie der Stabilisierung der Formmasse. Beide Versagensmechanismen, Bruch im Bereich der Zeitstandfestigkeit und Bruch durch Wärmealterung, laufen unabhängig voneinander ab. In **Bild 4** sind die Bereiche der Zeitstandkurve schematisch dargestellt.

Restlebensdauer bezüglich Zeitstandfestigkeit

Hinsichtlich der Zeitstandfestigkeit wurde das potenzielle Versagen der Rohre durch langsames Risswachstum als bestimmend erkannt. Ein duktilen Versagen der Rohre wird wegen der niedrigen Betriebsspannung innerhalb des betrachteten Lebensabschnittes als unrealistisch angesehen.

Zur Bestimmung der Restlebensdauer durch langsames Risswachstum wurde das „MAC-Konzept“ (Modified Arrhenius Concept) angewendet [7].

Die Grundidee des MAC-Konzepts besteht in der gleichzeitigen Änderung von Prüfspannung und Prüftemperatur der zu prüfenden Proben bei der Betrachtung des temperaturabhängigen Festigkeitsverhaltens.

Der Vorteil des MAC-Konzepts besteht in der beliebigen Wahl einer Ausgangsspannung σ (Prüfspannung bei erhöhter Temperatur T) und der Zielspannung (z. B. Auslegungsspannung bei Betriebstemperatur oder reale Betriebsspannung, hier 3,4 N/mm²).

Unter der Voraussetzung, dass die Aktivierungsenergie für den verformungsarmen Zeitstandbruch („2. Ast“) invariant gegenüber der Prüfspannung ist, können die variablen Prüfspannungen zwischen Ausgangsspannung und Zielspannung nach der Funktion $\log \sigma \sim 1/T$ berechnet werden.

Bei der Prüfung wurden die Standzeiten bis zum Bruch im Full Notch Creep (FNCT) in Anlehnung an DIN EN 12814-3

Anhang A.1 im Betriebsmedium (Abwasser) und deionisiertem Wasser gemessen. Die Probestäbe mit quadratischem Querschnitt und umlaufender Kerbe waren in Längsrichtung aus der Innenschicht des Rohres herausgearbeitet worden. Die Ergebnisse der Spannungsrißprüfung sind in **Bild 5** dargestellt.

Der Korrelationskoeffizient der FNCT-Versuche liegt über 0,999. Damit werden die theoretischen Voraussetzungen des MAC-Konzepts bestätigt.

Die extrapolierte Mindeststandzeit im FNCT bei 15 °C liegt bei > 50 Jahren (Zugspannung 3,4 N/mm²; Abwasser).

Restlebensdauer bezüglich Wärmealterung

Polyethylen hoher Dichte ist wie viele andere Kunststoffe sehr stabil gegenüber Wärmealterung. Im Kontakt mit Sauerstoff oder unter energiereicher Strahlung (UV-Anteil des Sonnenlichtes) kommt es allerdings langfristig zur Zerstörung der Polymerketten und der Bildung freier Radikale. Dadurch wird der Abbau weiter beschleunigt, was äußerlich als Versprödung der Bauteile sichtbar wird.

Werkstoffe für Rohre sind in der Regel schwarz eingefärbt und haben damit einen effektiven Schutz gegen Witterungseinflüsse.

Für Langzeitanwendungen werden Polyethylene mit einem zusätzlichen Schutz in Form von Stabilisatoren (Antioxidantien) versehen. Auch der hier betrachtete Werkstoff war bereits mit entsprechenden Additiven ausgerüstet.

Im Laufe der Einsatzzeit kommt es aufgrund des Wirkungsmechanismus zu einer langsamen Abnahme dieser Additive. Nachdem diese verbraucht sind, stellt sich allerdings nicht sofort das Phänomen der Wärmealterung ein. Es vergeht eine gewisse „Inkubationszeit“.

Auch diese Zusammenhänge folgen in Abhängigkeit von der Einsatztemperatur T_E und der Prüftemperatur T_p der Arrhe-

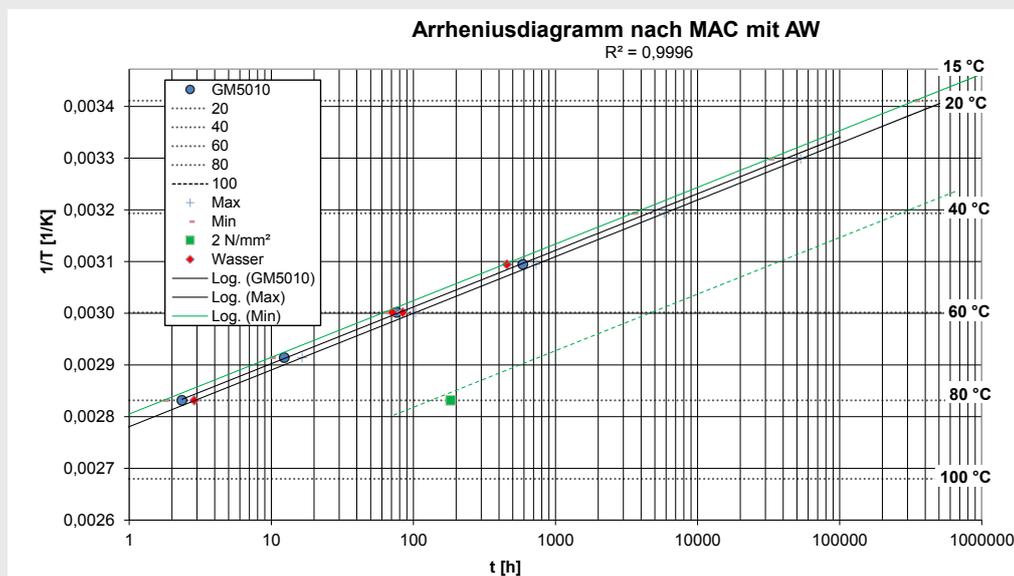


Bild 5: Arrhenius-Diagramm (MAC) für Hostalen GM5010 im Kontakt mit Abwasser (blaue Punkte) bzw. deionisiertem Wasser (rote Punkte)

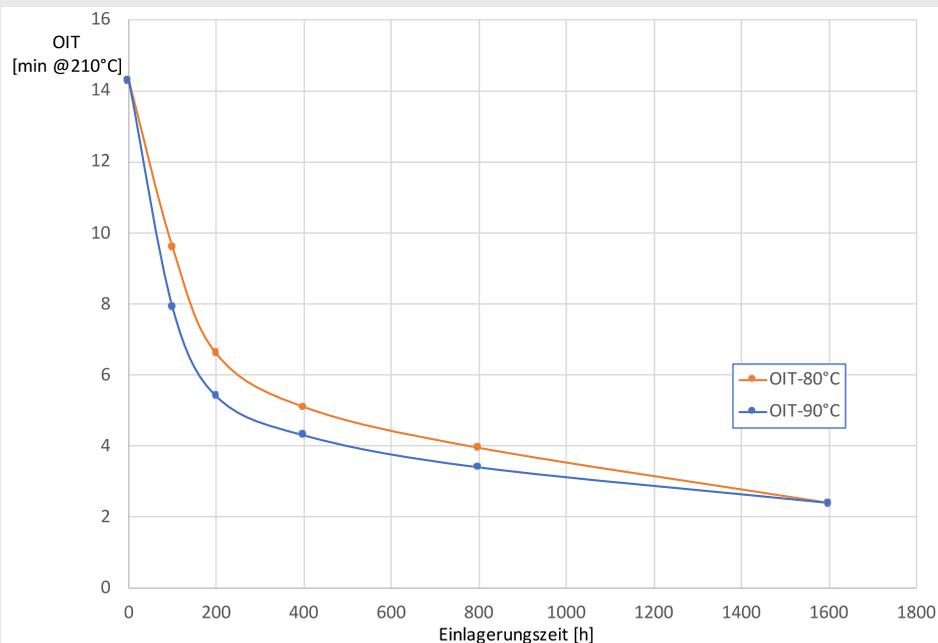


Bild 6: Stabilisatorverbrauch

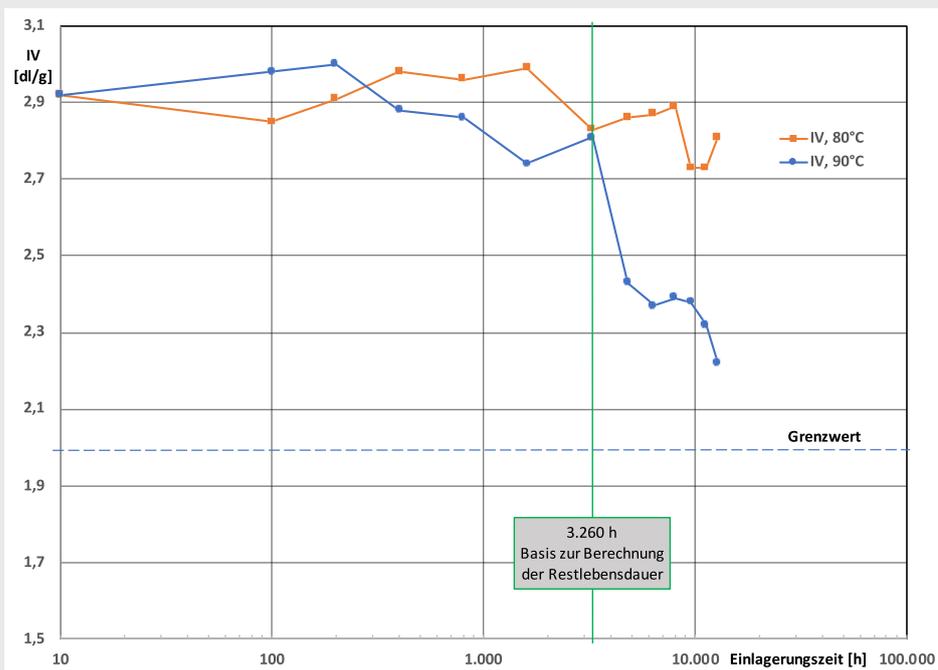


Bild 7: Änderung der mittleren Viskosität ausgedrückt als Intrinsic Viscosity IV über der Einlagerungszeit

nus-Gesetzgebung. Basis dieses Gesetzes ist, dass chemische Reaktionen (wie z. B. Alterung) oder physikalische Prozesse während ihrer Entwicklung eine Energiebarriere überwinden müssen, die sog. „Aktivierungsenergie“.

Die Korrelation zwischen der absoluten Temperatur T , der Aktivierungsenergie E_A und der Geschwindigkeitskonstanten C_v ist

$$C_v = \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)$$

Dabei ist R die allgemeine Gaskonstante.

Bei einer vorgegebenen Temperaturdifferenz $\Delta T = T_p - T_E$ kann daraus der sog. „Extrapolationsfaktor“ berechnet werden:

$$k_e = \exp\left[E_A \cdot \frac{T_p - T_E}{R}\right]$$

Zwischen der Versagenszeit bei Prüf-temperatur t_p und der aktuellen Lebenserwartung bei Einsatz-temperatur t_E ergibt sich dann der folgende Zusammenhang:

$$t_E = k_e \cdot t_p$$

Die Berechnung der Aktivierungsenergie erfolgt in Anlehnung an Westphal [9] gemäß nachfolgender Gleichung:

$$E_A = 1,91471 \cdot 10^{-2} \frac{\log(t_1/t_2)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

E_A Aktivierungsenergie [kJ/mol]
 t_1, t_2 Bruchzeit bei Temperatur T_1, T_2
 T_1, T_2 Absolute Temperatur [K]

Ein entscheidender Faktor für die Lebensdauervorhersage ist die Kenntnis dieser Aktivierungsenergie, die für die Wärmealterung von HDPE angewendet werden kann. Um eine konservative Betrachtung durchzuführen, wurde hier der niedrigste in der Literatur auffindbare Wert von 88,9 kJ/mol [8] angewendet.

Um diesen Ansatz zur Lebensdauervorhersage durch Wärmealterung anwenden zu können, musste zunächst ermittelt werden, wie der momentane Zustand des Prüfmusters war. Dazu wurden polymerphysikalische Messungen (Oxidationsinduktionszeit OIT, Viskositätszahl „Intrinsic Viscosity IV“, und Gel-Permeations-Chromatografie GPC) durchgeführt.

Obwohl die ursprüngliche Additivierung des vorliegenden Rohrwerkstoffes

heute nicht mehr eindeutig zu ermitteln ist, lässt doch der OIT-Wert mit mehr als 14 min bei 210 °C an einer Probe innerhalb der Rohrwand gemessen den Schluss zu, dass der ursprünglich eingesetzte Stabilisator noch nicht aufgebraucht ist und folglich die Wärmealterung der besagten Rohre noch nicht begonnen hat.

Es galt also, durch beschleunigte Versuche die Zeit bis zur beginnenden Wärmealterung zu bestimmen und

mit diesem Wert unter Anwendung des Arrhenius-Gesetzes die Restlebensdauer bei der Einsatztemperatur abzuschätzen.

Dazu wurden Wärmealterungsprüfungen in mit Luft gesättigtem Wasserbad bei 90 °C bzw. 80 °C bei turbulenter Strömung an aus der Rohrwand des Prüfmusters herausgearbeiteten Plättchen durchgeführt. In zeitlichen Abständen wurden Proben entnommen, an denen die oben erwähnten Daten gemessen wurden. Zum Zweck der Erstellung eines zeitnahen Abschlussberichtes wurden die Prüfungen zunächst bis zu einer Einlagerzeit von 3.260 h ausgewertet.

Die OIT-Werte über der Lagerzeit zeigen deutlich einen Verbrauch des Stabilisators (**Bild 6**). Man kann davon ausgehen, dass nach etwa 300 bis 400 h unter beiden Lagerbedingungen der Stabilisator aufgebraucht ist. Die Viskositätszahl als Maß für das mittlere Molekulargewicht des Prüfmusters der Ausgangsprobe und der entnommenen Proben bis zur Auswertung der Versuche nach 3.260 h (**Bild 7**) zeigt jedoch noch kein Anzeichen von molekularem Abbau und damit von Wärmealterung.

Zusätzlich wurde an der Probe vor und nach der Einlagerung bei 80 °C und 90 °C eine GPC-Messung durchgeführt. Diese Messmethode gibt Aufschluss über die Molmassenverteilung einer Polymerprobe. Bei dem hiermit bestimmten Massenmittel M_w werden die Molmassenwerte mit dem Masseanteil der jeweiligen Fraktion gewichtet, wodurch höhermolekulare Anteile einen größeren Einfluss haben. Das Massenmittel spricht sensitiv auf Polymerabbau an.

Das gemessene M_w ist im Rahmen der Messgenauigkeit gleich und damit werden die Ergebnisse der Viskositätszahl-Messung IV dahingehend bestätigt, dass die zusätzliche Alterung bis 3260 h noch zu keinem signifikanten Polymerabbau führt (**Bild 8, Bild 9**). Die Versuche sind inzwischen bis 12.800 h fortgesetzt worden und man kann nun bei den bei 90 °C eingelagerten Proben einen signifikanten Abfall der Viskositätszahl IV und beim Biegeversuch der Prüfkörper eine Versprödung durch Wärmealterung feststellen. Jetzt wird auch im GPC-Diagramm der 90 °C-Proben ein Abbau im langkettigen Molekülbereich evident (**Bild 10**).

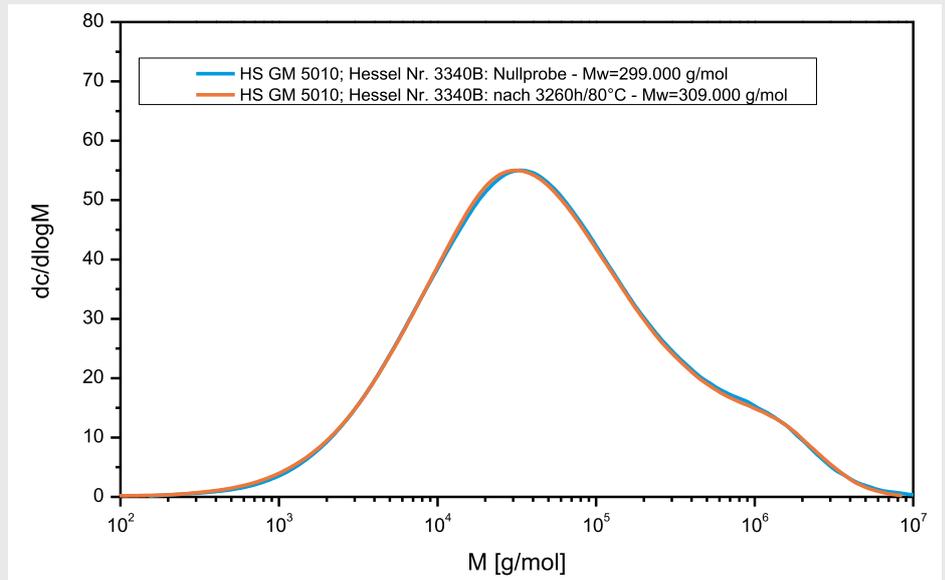


Bild 8: GPC-Messungen für Einlagerungstemperatur 80 °C

HS GM 5010; Hessel Nr. 3340B: Nullprobe – $M_w = 299.000 \text{ g/mol}$

HS GM 5010; Hessel Nr. 3340B: nach 3260h/80°C – $M_w = 309.000 \text{ g/mol}$

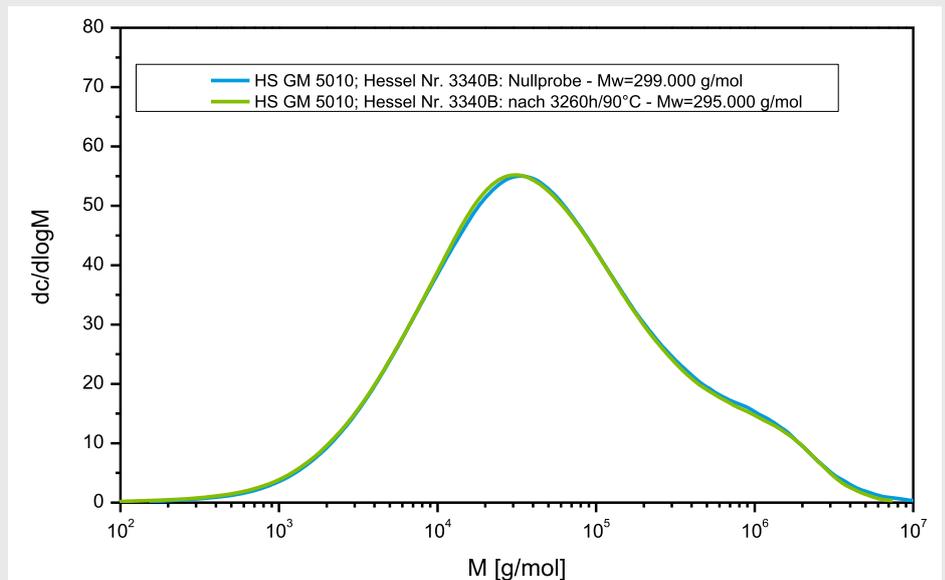


Bild 9: GPC-Messung für Einlagerungstemperatur 90 °C

HS GM 5010; Hessel Nr. 3340B: Nullprobe – $M_w = 299.000 \text{ g/mol}$

HS GM 5010; Hessel Nr. 3340B: nach 3260h/90°C – $M_w = 295.000 \text{ g/mol}$

Für die Auswertung im Prüfbericht wurde jedoch in einem konservativen Ansatz eine Restlebensdauer bei 80 °C und 3.260 h angewendet. Dabei wurde eine intermittierende Temperatur im See gemäß „Hydrographischem Handbuch von Österreich 2003“, 111. Band) zugrunde gelegt. Die Berechnung erfolgte auf der Grundlage der Arrhenius-Gesetze mit einer Aktivierungsenergie von 88,9 kJ/mol. Die rechnerische Standzeit dieser Probe beträgt bei intermittierender Temperatur 178 Jahre.

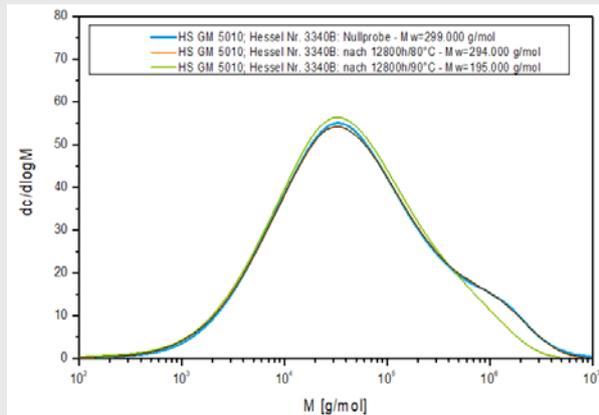


Bild 10: GPC-Messung nach 12.800 h bei 80 und 90 °C gegenüber Nullprobe

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Spannungsriss- und die Wärmealterungsuntersuchungen führen bei den vorgenannten Annahmen zu einer Mindest-Restlebensdauer des untersuchten Prüfmusters von 50 Jahren.

Es muss allerdings bedacht werden, dass bei diesen Untersuchungen lokale Spannungsüberhöhungen, wie z. B. an den Auflagerungen aus Beton, nicht berücksichtigt wurden.

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen in eindrucksvoller Weise die in den 1960er Jahren gemachten Lebensdauerprognosen auf Basis der damaligen Zeitstanduntersuchungen.

Der damals zum Einsatz gekommene Werkstoff wird der „1. Generation“ der HDPE-Rohrwerkstoffe zugeordnet. Heutige Werkstoffe (PE 100, PE 100-RC) weisen nicht nur eine höhere Design-Spannung auf, sondern auch ein Vielfaches an Widerstand gegen langsames Risswachstum. Auch hinsichtlich der Additivierung zum Schutz vor Wärmealterung ist es zu deutlichen Fortschritten gekommen. Wir danken Herrn Dipl.-Ing. Norbert Schwarz und Kollegen vom Wasserverband Ossiacher See, Kärnten, Österreich für das Bereitstellen der Proben und die Zusammenarbeit bei der Erstellung dieser Veröffentlichung.

Literatur

- [1] www.wvo.at/de/abwasserentsorgung/seedruckleitungen: Seedruckleitungen Ossiacher See
- [2] Richard, K., Gaube, E. und Diedrich, G.: Die Entwicklung von Rohren aus Ziegler-Polyäthylen Kunststoffe, 52. Jahrgang (1962), Heft 6, S. 321 – 325
- [3] Arrhenius, S.: Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren Zeitschrift für physikalische Chemie, 1889, S. 226 – 248
- [4] R18 01 3340, Bestimmung der Mindest-Lebensdauer eines Abwasserdruckrohres aus Hostalen GM5010, Prüfbericht der Hessel-Ingenieurtechnik (2018), Auftraggeber: Abwasserverband Ossiacher See

- [5] Pressl, A., Müllner, N., Plihal, H., Sholly, S., Liebert, W., Ertl, T. (2015): Risikobewertung von Druckleitungen der Siedlungswasserwirtschaft in Österreichischen Seen, Studie im Auftrag des BMLFUW sowie Land Oberösterreich, Land Kärnten und Land Salzburg, Hrsg.: BMLFUW, 155 Seiten
- [6] Rohre 1: Hostalen GM5010 – Klares Wasser für den Ossiacher See, Firmenschrift der Farbwerke Hoechst AG, 1971
- [7] VA MAC 2.2-6 (2007-02): Verfahrensweisung für die Festlegung der Prüfbedingungen nach dem MAC-Konzept mit Validierungsnachweis (Anlage zur Akkreditierungsurkunde der Hessel Ingenieurtechnik GmbH)
- [8] Vortrag H. Vogt (Vortragender), H.-F. Enderle, U. Schulte - Basell Polyolefine GmbH, J. Hessel - Hessel Ingenieurtechnik GmbH: „Thermal ageing of PE 100 pipes for accelerated lifetime prediction under service conditions“. Plastics Pipes Conference XIV 2008, Budapest, Ungarn
- [9] Westphal, W. H.: Physikalische Wörterbuch, Berlin/ Göttingen/ Heidelberg: Springer-Verlag, 1952

SCHLAGWÖRTER: Abwasserdruckrohrleitung, Seedruckleitung, HDPE, Polyethylen, Restlebensdauer

AUTOREN



Dipl.-Ing. **ULRICH SCHULTE**
Hessel Ingenieurtechnik GmbH, Roetgen
Tel. +49 2471 920 22 0
ulrich.schulte@hessel-ingtech.de



Dr.-Ing. **JOACHIM HESSEL**
Hessel Ingenieurtechnik GmbH, Roetgen
Tel. +49 2471 920 22 0
joachim.hessel@hessel-ingtech.de



Dipl.-Ing. **HERBERT TERWYEN**
LyondellBasell, Frankfurt/Main
Tel. +49 69 305 20478
herbert.terwyen@lyondellbasell.com