

Untersuchungen zum Langzeitverhalten verschiedener

2. Kunststoffrohre aus Rezyklaten für die Verwendung als Regentransportrohre

3.

4. 1. Einleitung

Am Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH wurde bekannt, dass für Regentransport-Rohre nach DIN 4262-1 „Sicker- und Mehrzweckrohre aus PVC-U und PE-HD für Verkehrswege- und Tiefbau“ auch Rezyklate bei der Produktion dieser Rohre verwendet werden.

Der Einsatz von Rezyklaten begann in den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts zunächst bei Kabelschutzrohren und ab dem Jahr 2000 auch bei Sickerrohren und Mehrzweckrohren nach DIN 4262-1 [1]. So war in dieser DIN auch ein ungeschlitztes Mehrzweckrohr (Transportrohr) genormt. Durchgesetzt hat sich dabei das Verbundrohr aus PE-HD (außen gewellt, innen glatt).



Abbildung 1: Verbundrohr aus PE-HD, außen gewellt, innen glatt, aus Rezyklaten



Abbildung 2: Vollwandrohr aus Rezyklaten

Im Fernstraßenbau, vor allem bei den Verkehrsprojekten Deutsche Einheit, wurde diese Rohrart gegen Betonrohre angeboten. Zunächst in den kleinen Nennweiten DN/ID 250 und als Rohre aus PP-Neuware, schließlich bis heute in Nennweiten bis DN/ID 800.

Bediente diesen Markt zunächst erst eine Firma, so legten bald alle Wettbewerber nach. Dieser Wettbewerb führte dann zur Verwendung von Rezyklaten bei der Rohrherstellung. Da Rezyklate in Polyethylen besser zur Verfügung standen und stehen, wurden die Rohre von allen Wettbewerbern auf dieses Material umgestellt.

Lange ist bekannt, dass Rezyklate eine Erhöhung der Kurzzeitringsteifigkeit bedeuten. Gemessen wird diese Ringsteifigkeit nach DIN EN ISO 9969 „Thermoplastische Rohre – Bestimmung der Ringsteifigkeit“ [2]. Damit wurde eine anscheinende Vergleichbarkeit der Rohre verschiedener Hersteller geschaffen ohne teure Langzeitmessungen durchführen zu müssen. Plötzlich hatten die Kunststoffrohre aus Rezyklaten die höchsten Kurzzeit-Werte. Weniger bekannt ist, dass die Langzeitwerte nach 50 Jahren schlecht sind.

Bei der Belieferung der Verkehrsprojekte Deutsche Einheit kam es zu Beanstandungen bei den Qualitäten der Verbundrohre von mehreren Lieferanten. So kam es zur Rissbildung in den Formtrennnähten, zu Beschädigungen der Innenhaut bei Reinigungsspülungen und Brüchen bei Kälte.

Dies war ausschlaggebend für die Untersuchungen am Forschungsinstitut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH.

Dabei spielte auch die Neufassung der Werkstoffkennwerte-Tabelle in der DWA-A 127-10 "Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen - Teil 10: Werkstoffkennwerte" (09/2020) [3] eine große Rolle.

Erdverlegte Kunststoffrohrsysteme müssen nach ATV-DVWK-A 127 [4] auf ihre statische Belastbarkeit für den vorgesehenen Einbau berechnet werden. Ihre Mindestlebensdauer muss 50 Jahre betragen. Dazu sind die Kriechmodule entscheidend. So ist bekannt, dass Kunststoffe unter Belastung kriechen. Der E-Modul nimmt kontinuierlich ab. In die Berechnung gehen daher der Kurzzeit-E-Modul (24h-Wert) (Kurzzeitkriechmodul) und der Langzeit-E-Modul (50a-Wert) (Langzeitkriechmodul) ein. Für die gängigsten Kunststoffe aus Neuware wurden diese Daten von den Rohstoffherstellern bereits ermittelt und in der Werkstofftabelle der DWA-A 127-10 "Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen – Teil 10: Werkstoffkennwerte" [3] übernommen. Die alte Werkstofftabelle ist in der ATV-DVWK-A 127 [4] enthalten; und damit 22 Jahre alt. Da mittlerweile auch Kunststoffrohre aus Rezyklaten hergestellt werden, wurde im Vorwort der DWA-A 127-10 [3] folgendes festgestellt:

Die in den Tabellen angegebenen Rechenwerte repräsentieren normative Anforderungen an die aufgeführten Werkstoffe. Daher dürfen die Rechenwerte, sofern nicht unter den Tabellen anders angegeben, für die aufgeführten Werkstoffe in den angegebenen Regelwerkspublikationen der DWA ohne gesonderten Nachweis verwendet werden. Die tatsächlichen Werkstoffkennwerte können von den Anforderungen teilweise erheblich abweichen. Solche Werte dürfen für eine Berechnung verwendet werden, wenn sie herstellerbezogen von einem akkreditierten Prüfinstitut durch ein geeignetes Verfahren nachgewiesen werden. Hierdurch dürfen andere bemessungsrelevante Parameter sowie die Gebrauchstauglichkeit nicht negativ beeinflusst werden.

Die in den Tabellen angegebenen Werte sind charakteristische Werte (Index k). Die Angaben der nachfolgenden Tabellen gelten nur für die in den aufgeführten Normen beschriebenen Rohrwerkstoffe. Modifikationen von Werkstoffen außerhalb der genannten Normen, beispielsweise durch einen gefüllten oder geschichteten Wandaufbau, sind in den nachfolgenden Tabellen nicht abgedeckt.

In der neuen DWA-A 127-1 „Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen – Teil 1: Grundlagen“ [5] wird auf die Verwendung von neuen Werkstoffen verwiesen.

„9.8.1 Grundlegende Versuche

Versuche zur Standsicherheit sind unerlässlich, insbesondere bei neuen Techniken oder bei der Überschreitung bisheriger Anwendungsgrenzen.

...

9.8.2 Tragsicherheitsnachweise durch Versuche

In besonderen Fällen, wenn zum Beispiel gesicherte Erkenntnisse fehlen, sind Versuche ausdrücklich gefordert, beispielsweise

- **zum Nachweis der örtlichen Stabilität von profilierte Kunststoffrohren mit dünnen Wandungsteilen (Stege, Flansche);**
- *zum Nachweis der (Rest-)Tragsicherheit von Großprofilen (z. B. MAC, Mechanical-Assessment-of-Conduits-Verfahren);*
- **Langzeitkennwerte von neuen Werkstoffen;**
- *Verhalten von Werkstoffen unter zyklischer Belastung (Betriebsfestigkeitsnachweis).“*

Bei Rezyklaten mit unbekanntem Langzeitwerten sind Versuche zur Ermittlung der Langzeitwerte unerlässlich.

5. Materialprüfungen

In der Bundesrepublik Deutschland gibt es viele Kunststoff Rezyklat-Hersteller.

Jeder Hersteller hat seine Verpackungsabfall-Lieferanten und sortiert diese möglichst rein. Aber jedes Rezyklat ist anders. So gibt es Polyethylen-Abfall, PVC-U-Abfall, PET-Flaschen als Abfall, Waschmittelflaschen, Gelber Sack etc...

Im Vorfeld der Untersuchungen war auch bekannt geworden, dass ein Kunststoff-Rohrhersteller mit allen Rezyklat Lieferanten unzufrieden war und deshalb selbst rezykliert. Angeblich besteht sein internes Rezyklat zu ca. 60% aus Inhalten aus dem gelben Sack, also Haushalt Rezyklat.

Schließlich wurden 3 Rohre zur Prüfung ausgewählt:

1. Verbundrohr DN/ID 250, außen gewellt, schwarz (100% Rezyklat), innen glatt, grün (60% Rezyklat; 40% Neeware), Rezyklat-Lieferant bekannt
2. Verbundrohr DN/ID 250, außen gewellt, schwarz (92,4% Rezyklat + 7,6% Kreide), innen glatt, blau (100% Rezyklat), Rezyklat-Lieferant nicht bekannt, Firma rezykliert selbst und füllt auf?
3. Vollwandrohr DN/OD 280 aus 100% Rezyklat, wie bei 1. verwendet

Zunächst wurden die Prüfungen aus der zutreffenden DIN-Norm 4262-1 „Rohre und Formstücke für die unterirdische Entwässerung im Verkehrswege- und Tiefbau – Teil 1: Rohre, Formstücke und deren Verbindungen aus PVC-U, PP und PE“; (2009) [6] durchgeführt. Dies sind Maße, Beschaffenheit, Schlagbeanspruchung. Alle Normvorgaben wurden erfüllt.

Um die Langlebigkeit der Rohre bewerten zu können wurden weitergehende Prüfungen durchgeführt. Zunächst Materialprüfungen:

1. Probenvorbereitung

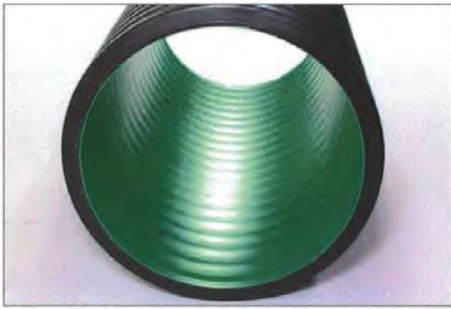


Bild 3: PE-Verbundrohr außen schwarz, innen grün

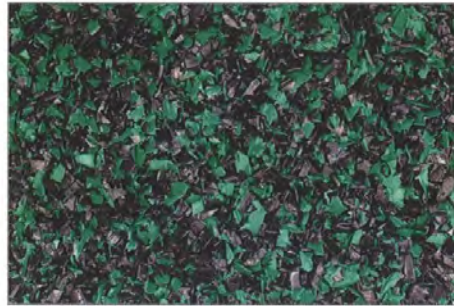


Bild 4: Rohr gehäckselt, außen schwarz, innen grün

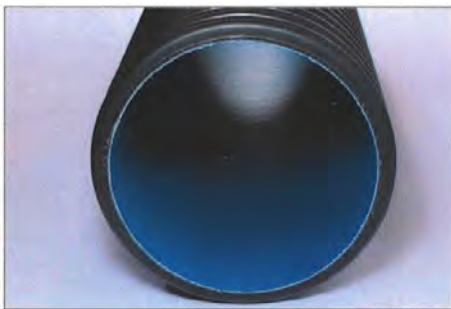


Bild 5: PE-Verbundrohr außen schwarz, innen blau



Bild 6: Rohr gehäckselt, außen schwarz, innen grün

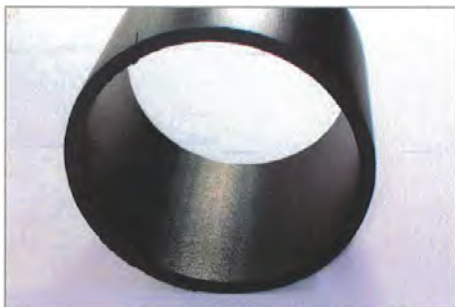


Bild 7: PE-Vollwandrohr schwarz



Bild 8: Rohr schwarz gehäckselt

1. Bestimmung der flüchtigen Bestandteile in Anlehnung an DIN EN ISO 585 [7]
 - keine Auffälligkeiten
2. Bestimmung der Schmelze-Massefließrate/Schmelze-Volumenfließrate (MFRIMVR) nach DIN EN ISO 1133 [8]
 - keine Auffälligkeiten
3. Herstellung von Prüfkörpern nach DIN EN ISO 294 [9]
 - keine Probleme

4. Bestimmung des Glührückstands nach DIN EN ISO 3451 [10]

Tabelle 1: Ergebnisse Glührückstand

Probe	Glührückstand [%]		
	350 °C	550 °C	850 °C
PE Rohr Blau MG (blauer Anteil)	93,4	1,5	1,3
PE Rohr Blau MG (schwarzer Anteil)	94,2	25,0	14,7
PE Rohr Grün MG (grüner Anteil)	94,1	1,4	1,2
PE Rohr Grün MG (schwarzer Anteil)	92,7	1,6	1,4
PE Rohr Schwarz PK	96,4	2,3	1,8
PE Rohr Blau PK	97,2	18,9	11,3
PE Rohr Grün PK	97,3	1,6	1,4

Sehr hoch ist der Glührückstand in der schwarzen Außenhaut des innen blauen Rohres. Dieser Rückstand wurde als Kreide identifiziert. Damit beträgt der Anteil der Kreide 7,6% des Rohrgewichtes.

5. Materialanalyse mittels DSC nach DIN EN ISO 11357 [11]
 - keine Auffälligkeiten
6. Bestimmung der oxidativen Induktionszeit (OIT) mittels DSC in Anlehnung an DIN EN ISO 11357-6 [11]
 - beim Verbundrohr außen schwarz, innen blau ist die Alterung sehr kurz, dies deutet auf schlechte Langzeiteigenschaften hin
7. Bestimmung der Charpy-Schlagzähigkeit nach DIN EN ISO 179-1 [12]
 - keine Auffälligkeiten
8. Bestimmung der Zugeigenschaften nach DIN EN ISO 527—1/2 [13]
 - beim Verbundrohr außen schwarz, innen blau ist der Kurzzeit-E-Modul sehr hoch, nämlich bei 1.095 MPA
9. Bestimmung der Biegeeigenschaften nach DIN EN ISO 178 [14]
 - auch hier ist beim Verbundrohr außen schwarz, innen blau ist der Kurzzeit-E-Modul sehr hoch - 1.018 MPA
10. Bestimmung der Dichte nach DIN EN ISO 1183 —Verfahren A [8]
 - eigentlich ist Polyethylen leichter als Wasser, aber das Verbundrohr außen schwarz, innen blau hat eine Dichte von 1,08 g/cm³ und ist demnach schwerer als Wasser (es geht aber nicht unter, da in den Wellen Luft enthalten ist)

6. Langzeitprüfungen

In den letzten Jahren sind kaum Langzeitprüfungen an Kunststoffrohren durchgeführt worden. Mit Aufkommen der Verbundrohre (außen gewellt, innen glatt) wurde die Bestimmung der Langzeit-Steifigkeit bedeutender. Die DIN 16961-2 „Rohre und Formstücke aus thermoplastischen Kunststoffen mit profilierter Wandung und glatter Rohrinnefläche“; (1989) [15] stellte einen entsprechenden Versuch zur Verfügung. Gleichzeitig zeigte sie im

Punkt „Erläuterungen“ ein Verfahren zur Ermittlung einer äquivalenten Wandstärke zu Vollwandrohren aus Polyethylen auf.

Die Gleichungen lauten:

$$s_{\text{äq}} = \frac{PN}{10} * \frac{d_i}{2 * \sigma - \frac{PN}{10}}$$

Formel 1: DIN 16961-2 (02/1989)

wobei

$$PN = 10 * \sigma * \sqrt[3]{\frac{12 * SR}{EC}}$$

Formel 2: DIN 16961-2 (02/1989) [15]

Demnach würde die alternative Wandstärke für das Verbundrohr außen gewellt, schwarz, innen glatt, blau wie folgt berechnet:

$s_{\text{äq}}$ = Wanddicke des äquivalenten Vollwandrohres PN
= Nenndruck

d_i = Innendurchmesser = 263,93 mm σ = für Wanddickenberechnung zulässige Spannung nach DIN 8074 = 5.000 kN/m²

E_C = 50a-Kriechmodul = 30.000 kN/m² (nach Berechnung)

S_R = Ringsteifigkeit \approx 20 kN/m² (nach Berechnung)

Demnach wäre

$$PN = 10 * 5000 * \sqrt[3]{\frac{12 * 20}{30000}}$$

$PN = 10.000 \text{ kN/m}^2$

$$s_{\text{äq}} = \frac{10000}{10} * \frac{0,26393}{2 * 5000 - \frac{10000}{10}}$$

die errechnete äquivalente Wandstärke zum damaligen Zeitpunkt

$s_{\text{äq}} = 0,0293 \text{ m} = 29,3 \text{ mm}!!!!$

Diese würde einem Rohr des SDR-Verhältnisses von 11 oder Nennsteifigkeit SN 64 entsprechen. Das dies realitätsfremd war, wurde schnell festgestellt.

In der überarbeiteten DIN 16961-2 von 2018 [16] wurde dieses Berechnungsverfahren nicht mehr angeführt.

Jetzt wird im

Anhang E(normativ) Dauerhaftigkeit profilierter Rohre für drucklose Anwendungen angegeben:

...

Erfüllt ein Werkstoff bzw. eine zu verwendende Werkstoffabmischung diese Anforderungen nicht, so muss die Dauerhaftigkeit des Rohres in Abstimmung mit dem Auftraggeber nachgewiesen werden.

Das Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH entschied sich zu einer Langzeitprüfung von 10.000 h im Zweiplattendruckversuch nach der DIN 16961-2. Über die Rohrverformungen können bei Kenntnis des Kurzzeit-E-Modules die Langzeitwerte ermittelt werden. Diese E-Module wurden nach DIN EN ISO 178 [14] ermittelt.

Dazu wurde die notwendige Belastung ermittelt.

1. Verbundrohr außen gewellt, schwarz, innen glatt, grün
F = 27,16 kg
2. Verbundrohr außen gewellt, schwarz, innen glatt, blau
F = 27,176 kg
3. Vollwandrohr schwarz
F = 115,8 kg

Nach 1.000 bzw. 10.000 h Belastung wurde das Langzeit-E-Modul ermittelt:

1. Verbundrohr außen gewellt, schwarz, innen glatt, grün
 $E_{50a} = 90 \text{ MPa}$

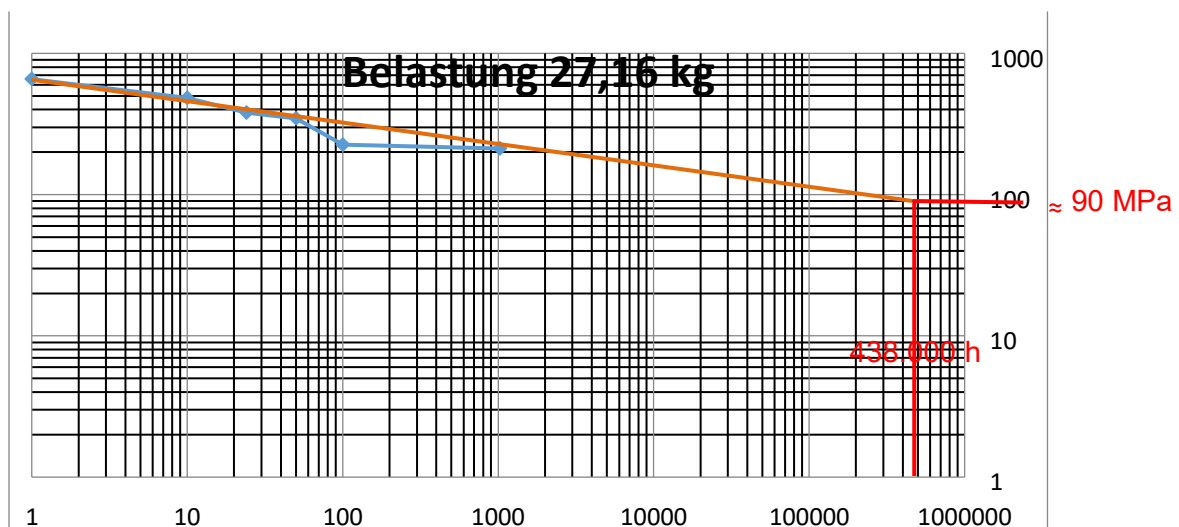


Bild 9: E-Modul-Bestimmung im doppeltlogarithmischen Diagramm

2. Verbundrohr außen gewellt, schwarz, innen glatt, blau
 $E_{50a} = 30 \text{ MPa}$

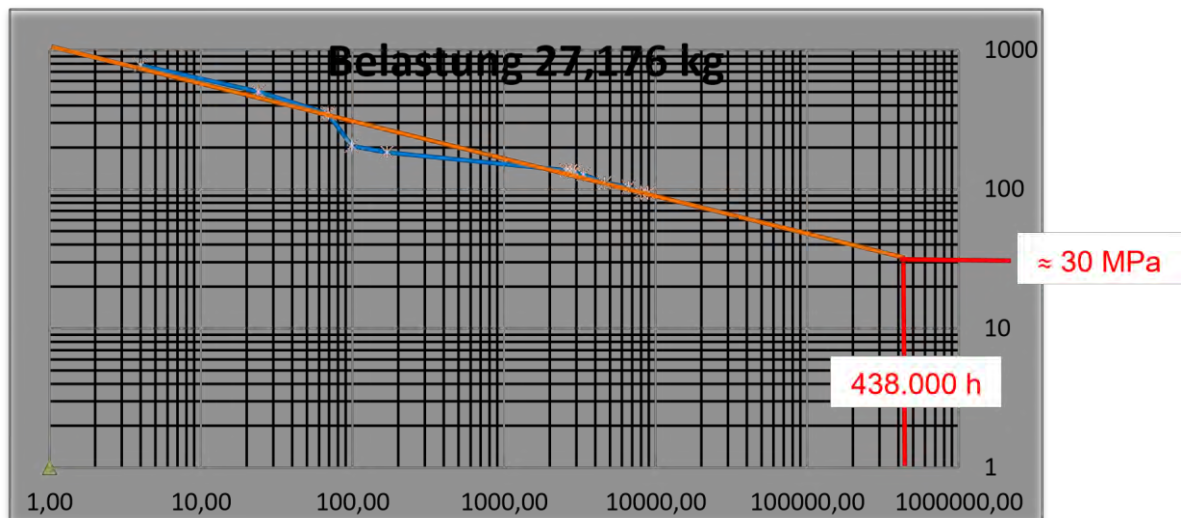


Bild 10: E-Modul-Bestimmung im doppeltlogarithmischen Diagramm

3. Vollwandrohr schwarz $E_{50a} = 105,0 \text{ MPa}$

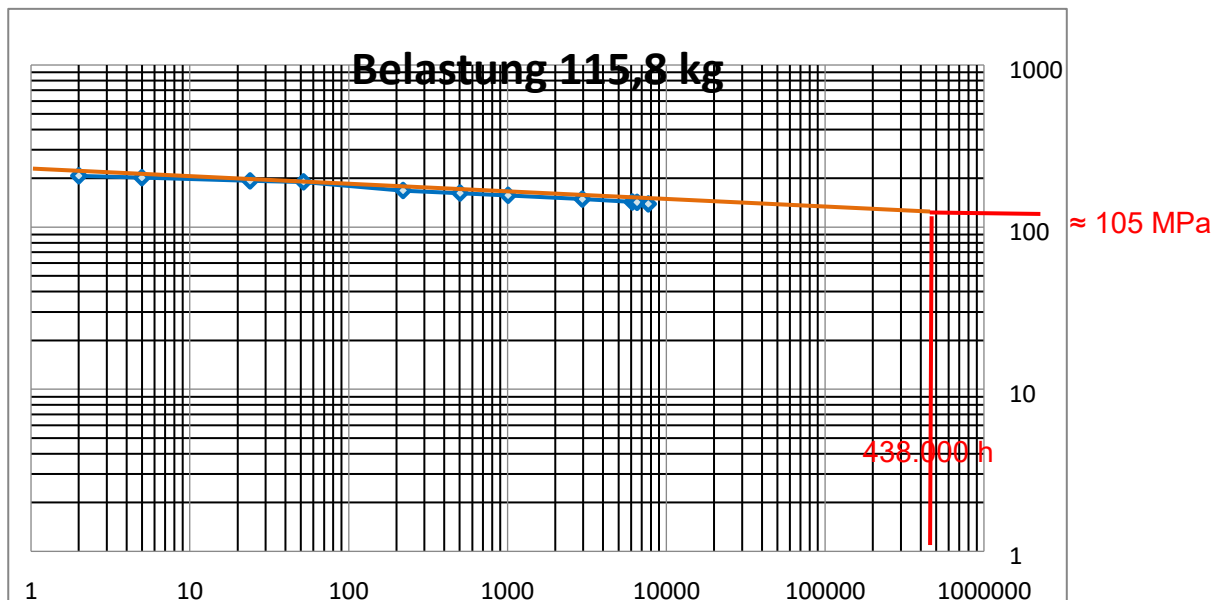


Bild 11: E-Modul-Bestimmung im doppeltlogarithmischen Diagramm

Damit liegen alle E-Module unter den in der Werkstofftabelle der DWA-A 127-10 [3] festgelegten 160 MPa. Damit wird ein Vergleich von Rohren mit der nach DIN EN ISO 9969 [2] ermittelten Steifigkeit SN ad absurdum geführt.

Wie sollte man diese Werte interpretieren?

Es wurde beschlossen, die Lasten aus einem schubsteifen Balken mit 0,5 m Dicke aufzubringen. Dies sind ca. 270 kg. Hier die Bilder der Belastung auf dem Verbundrohr außen gewellt, schwarz, innen glatt, grün.

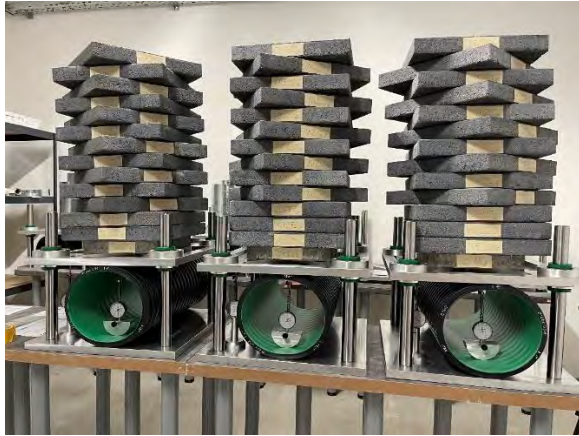


Bild 12: volle Belastung auf den Prüflingen (267,314 kg)



Bild 13: Belastungsende nach 10.000 h (267,314 kg)

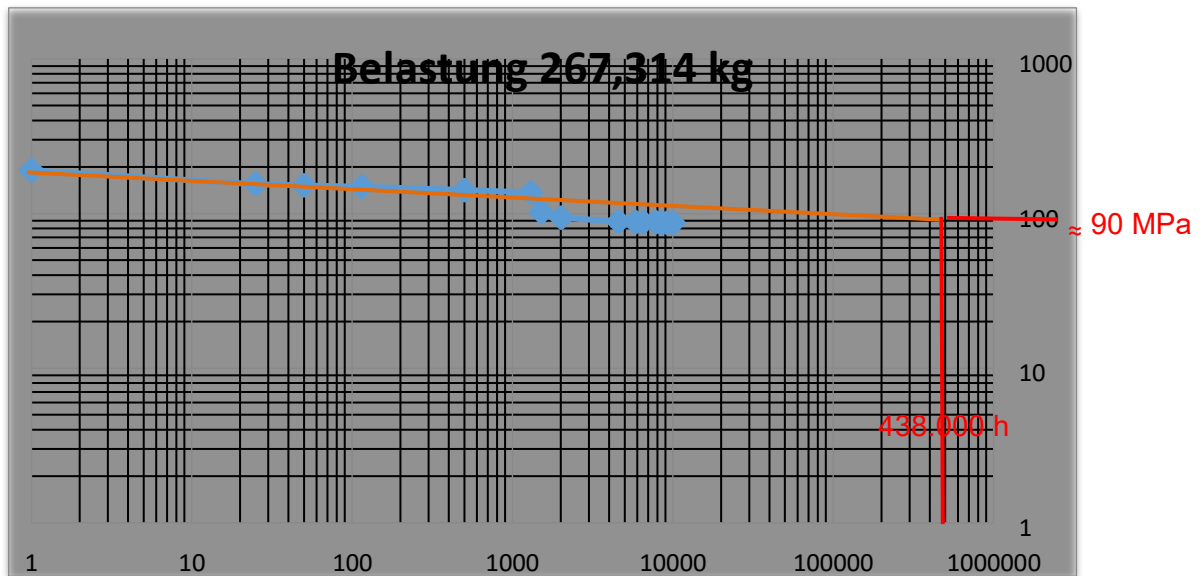


Bild 14: E-Modul-Bestimmung im doppeltlogarithmischen Diagramm



Bild 15: Messeinrichtung Verbundrohr



Bild 16: kollabiertes Verbundrohr außen gewellt, schwarz, innen glatt, blau (271,623 kg)
Zusammenbruch nach 5.476 h

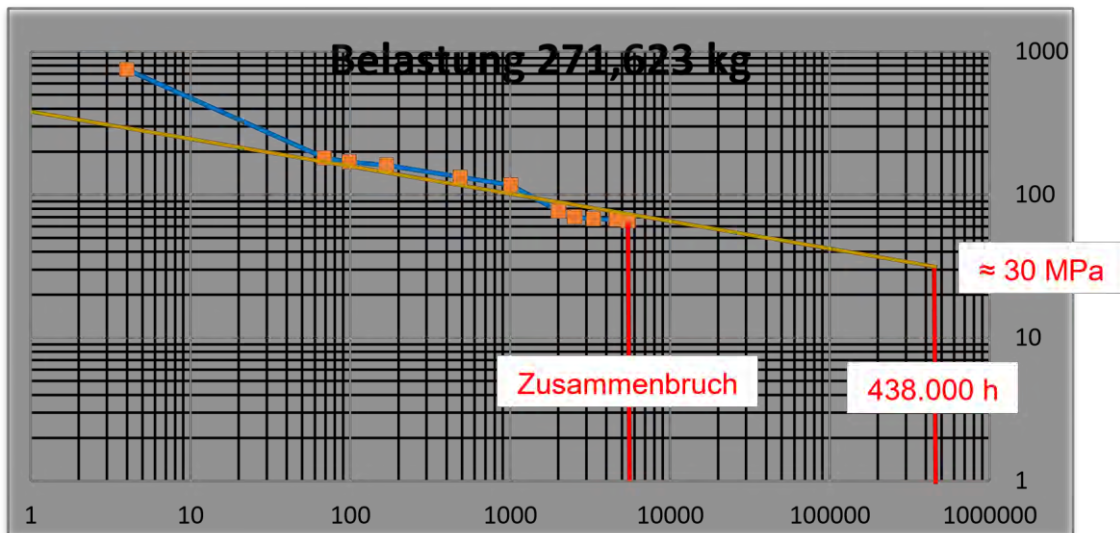


Bild 17: E-Modul-Bestimmung im doppeltlogarithmischen Diagramm

Im Vergleich der beiden Rohre, welche beide mit einer Ringsteifigkeit SN 8 angegeben sind, fällt sofort auf, dass das Verbundrohr außen gewellt, schwarz, innen glatt, blau, zur Hälfte der Prüfzeit kollabierte. Worauf kann das zurückzuführen sein?

Zunächst vermutet man ein Versagen der Wellgeometrie; aber diese hat bis zum Schluss standgehalten. Also muss das Material qualitativ schlecht sein. Die Materialproben ließen so ein Verhalten vermuten.

7. Ergebnisinterpretation

Ziel der Untersuchungen war es, von Langzeituntersuchungen auf kürzere Versuchszeiten zu kommen. Bei den Belastungsversuchen ist die Tendenz des Abfalles des Langzeit-E-Modules schon noch 2.000 h Prüfzeit erkennbar.

Weitere wichtige Materialeigenschaften sind:

1. Bestimmung des Glührückstands nach DIN EN ISO 3451 [10]
Ein hoher Glührückstand deutet auf viele Füllstoffe hin; diese senken die Langzeitwerte

2. Bestimmung der oxydativen Induktionszeit (OIT) mittels DSC in Anlehnung an DIN EN ISO 11357-6 [11] – eine kurze Induktionszeit lässt auf schlechte Langzeiteigenschaften schließen
3. Bestimmung der Zugeigenschaften nach DIN EN ISO 527—1/2 [13]
Ein hohes Kurzzeit-E-Modul deutet auf ein niedriges Langzeit-E-Modul
4. Bestimmung der Biegeeigenschaften nach DIN EN ISO 178 [14]
Ein hohes Kurzzeit-E-Modul deutet auf ein niedriges Langzeit-E-Modul
5. Bestimmung der Dichte nach DIN EN ISO 1183 —Verfahren A [17]
Eine hohe Dichte deutet auf eine große Menge Füllstoffe hin; dies bedeutet ein niedriges Langzeit-E-Modul.

Tabelle 2: Bestimmung der Dichte

Prüfgerät: Laborwaage Precisa 202 A mit Dichtebestimmungsset
 Prüfmedium: Methanol
 Probenvorbereitung: Entnahme von Prüfkörper

Probe	Dichte [g/cm ³]
PE Rohr Schwarz PK	0,96
PE Rohr Blau PK	1,08
PE Rohr Grün PK	0,96

Schlussfolgerungen

- Je höher der Rezyklatanteil, umso geringer die Langzeitfestigkeit
- Je höher der Rezyklatanteil, desto größer die Kurzzeitfestigkeit
- Die Rohrform Verbundrohr ist im Langzeitverhalten schlechter als ein Vollwandrohr
- Der Füllstoff Kreide erhöht zwar die Kurzzeitfestigkeit, aber er schwächt die Langzeitfestigkeit
- Der Füllstoff Kreide erhöht das Metergewicht, bei Überschreiten von 1,0 g/cm³ sinkt das Rohr im Wasser ab

8. Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] DIN 4262-1 „Rohrleitungssysteme für die unterirdische Entwässerung von Ingenieurbauten, Teil 1: Kunststoffrohre; (01/2001)
- [2] DIN EN ISO 9969 „Thermoplastische Rohre – Bestimmung der Ringsteifigkeit“; (06/2016)
- [3] DWA-A 127-10 "Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen - Teil 10: Werkstoffkennwerte“; (09/2020)
- [4] ATV-DVWK-A 127 „Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen“; 3. korrigierte Auflage; (08/2000)
- [5] DWA-A 127-1 „Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen – Teil 1: Grundlagen“; (12/2022)
- [6] DIN-Norm 4262-1 „Rohre und Formstücke für die unterirdische Entwässerung im Verkehrswege- und Tiefbau – Teil 1: Rohre, Formstücke und deren Verbindungen aus PVC-U, PP und PE“; (10/2009)

- [7] DIN EN ISO 585 „Kunststoffe - Weichmacherfreies Celluloseacetat - Bestimmung des Feuchtegehaltes“; (02/2000)
- [8] DIN EN ISO 1133; „Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen, Teil 2: Verfahren mit Dichtegradientensäule“; (02/2004)
- [9] DIN EN ISO 294 „Kunststoffe – Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Herstellung von Vielzweckprobekörpern und Stäben“; (1/2017)
- [10] DIN EN ISO 3451 “Kunststoffe - Bestimmung der Asche - Teil 1: Allgemeine Verfahren“; (1/2019)
- [11] DIN EN ISO 11357 „Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 6: Bestimmung der Oxidations-Induktionszeit (isothermische OIT) und Oxidations-Induktionstemperatur (dynamische OIT)“; (6/2018)
- [12] DIN EN ISO 179-1 „Kunststoffe – Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften – Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung“; (11/2010)
- [13] DIN EN ISO 527—1/2 „Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 1: Allgemeine Grundsätze
Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen“; (06/2012)
- [14] DIN EN ISO 178 „Kunststoffe – Bestimmung der Biegeeigenschaften“; (09/2013)
- [15] DIN 16961-2 „Rohre und Formstücke aus thermoplastischen Kunststoffen mit profilierter Wandung und glatter Rohrinnenfläche“; (02/1989)
- [16] DIN 16961-2 „Rohre und Formstücke aus thermoplastischen Kunststoffen mit profilierter Wandung und glatter Rohrinnenfläche –
Teil 2: Technische Lieferbedingungen“; (08/2018)
- [17] DIN EN ISO 1183 „Kunststoffe – Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen – Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren“; (09/2013)

9. **Abbildungsverzeichnis**

- Bild 1: Verbundrohr aus PE-HD, außen gewellt, innen glatt, mit Rezyklaten
- Bild 2: Vollwandrohr mit Rezyklaten
- Bild 3: PE-Verbundrohr außen , außen schwarz, innen grün
- Bild 4: Rohr gehäckselt, außen schwarz, innen grün
- Bild 5: PE-Verbundrohr außen, außenschwarz, innen blau
- Bild 6: Rohr gehäckselt, außen schwarz, innen blau
- Bild 7: PE-Vollwandrohr schwarz
- Bild 8: Rohr schwarz gehäckselt
- Bild 9: E-Modul-Bestimmung im doppeltlogarithmischen Diagramm
- Bild 10: E-Modul-Bestimmung im doppeltlogarithmischen Diagramm
- Bild 11: E-Modul-Bestimmung im doppeltlogarithmischen Diagramm
- Bild 12: volle Belastung auf den Prüflingen (267,314 kg)
- Bild 13: Belastungsende nach 10.000 h (267,314 kg)
- Bild 14: E-Modul-Bestimmung im doppeltlogarithmischen Diagramm
- Bild 15: Messeinrichtung Verbundrohr
- Bild 16: kollabiertes Verbundrohr außen gewellt, schwarz, innen glatt, blau (271,623 kg), Zusammenbruch nach 5.476 h
- Bild 17: E-Modul-Bestimmung im doppeltlogarithmischen Diagramm

10. **Tabellenverzeichnis**

- Tabelle 1: Ergebnisse Glührückstand
- Tabelle 1: Bestimmung der Dichte

11. Formelverzeichnis

Formel 1: DIN 16961-2 (02/1989)

Formel 2: DIN 16961-2 (02/1989)

Dipl.-Ing. Steffen Mohr

Wiss. Mitarbeiter

Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH

Über der Nonnenwiese 1

99428 Weimar