

Schlussbericht

***KMU-innovativ - Verbundvorhaben Ressourceneffizienz:
RPT-Bahnschwelle; SKZ Prüfmethode-Extrusionsverfahrens-Entwicklung-
Ökobilanz - Teilvorhaben 2***

(Bewilligungszeitraum: 01.08.2013 – 31.01.2016)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033RK007B gefördert

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Würzburg, 28.07.2016

Ort, Datum

Dr.-Ing. Frédéric Achereiner,
SKZ – KFE gGmbH

1 Aufgabestellung

1.1 Zielsetzungen

Traditionell fahren Eisenbahnen und U-Bahnen auf Strecken mit Schwellen aus Holz, Stahl oder Beton. Für den Einsatz als Bahnschwelle muss das Holz chemisch behandelt werden, was durch Tränken mit dem Teeröl-Abfallprodukt Kreosot erfolgt. Dieses umweltschädliche Produkt wird im Verlauf der Lebensdauer zum Teil an die Natur abgegeben. Aufgrund der geänderten EU-Biozidrichtlinie steht daher die Holzschwelle vor dem endgültigen Aus. Europaweit besteht das Bestreben ab 2018 alternative Materialien einzusetzen.

Ausgehend von einer 15 Jahre alten Idee des Unternehmensgründers, hat die PAV GmbH & Co. KG eine Kunststoffbahnschwelle entwickelt, die eine ausgezeichnete Alternative für die teerölgetränkten Holzschwellen darstellt. Basis-Material für die RPT®-Schwelle ist extrudiertes, mit Glasfasern verstärktes Kunststoff-Recyklat. Rezeptur und Herstellungstechnologie wurden in verschiedenen Vorprojekten entwickelt und eine Zulassung zur Betriebserprobung wurde für die RPT®-Schwelle durch das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) erteilt. Einhergehend mit der Betriebserprobung bei der DB Netz AG und dem späteren Einsatz treten durch die Serienfertigung neue Anforderungen für eine wirtschaftlich effektive Produktion auf, welche spezifische Entwicklungen erfordern.

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden durch PAV und das Kunststoff-Zentrum SKZ folgende Ziele verfolgt:

- AP1: Anpassung des Extrusionsverfahrens an die Bedingungen der Kleinserienfertigung, Ausstoßmaximierung mittels Optimierung von Verfahrens- und Materialparametern bei gleichzeitiger Materialeinsparung, Computergestützte Simulation eines neuen Extrusionswerkzeuges incl. Werkzeugneuentwicklung bzw. Weiterentwicklung und Einsatzerprobung der entwickelten oder weiterentwickelten Extrusionswerkzeuge für den Kleinserienbetrieb
- AP2: Entwicklung eines Röntgen-Inline-Verfahrens zur zerstörungsfreien Schwellenprüfung und dessen Erprobung und Anwendung im Kleinserienbetrieb
- AP3: Entwicklung einer werkstoffgerechten Prüfrichtlinie für Kunststoff-Bahnschwellen auf Basis von Labortests und Korrelationen zwischen Materialprüfung und Schwellentests im Großprüfstand
- AP4: Untersuchungen zur Schall-Ausbreitung- und Dämpfung am Schwellenmaterial
- AP5: Erarbeitung einer vergleichenden Ökobilanz nach ISO 14040/44 von Holz-, Beton-, Stahl- und Kunststoffschwellen
- AP6: Betriebserprobungs-Großversuch begleitendes Untersuchungsprogramm

1.2 Voraussetzungen

Das Kunststoff-Zentrum SKZ war nur an AP1, AP3 und AP5 beteiligt. Die anderen Arbeitspakete (AP2, AP4 und AP6) werden daher gesondert im Bericht von PAV zum Teilvorhaben 1 (033RK007B) dargestellt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Durchführung des Vorhabens verlief für AP1 und AP5 nach Plan. Aufgrund von Problemen bei einem extern vergebenen Auftrag sind in AP3 Verzögerungen aufgetreten, die eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung des Vorhabens erforderten.

1.4 Stand der Technik bzw. der Forschung

Die Auslegung von Extrusionsprozessen und Extrusionswerkzeugen erfolgt aktuell vorwiegend durch Trial-und-Error-Versuche. D.h. es werden Versuche durchgeführt, in denen die Prozessparameter wie Durchsatz, Zylindertemperatur oder Werkzeugtemperatur variiert werden. Anschließend werden an den hergestellten Extrusionsprodukten Prüfungen durchgeführt, ausgewertet und die Ergebnisse mit einer Zielvorgabe verglichen. Stimmen die Ergebnisse nicht mit den Zielvorgaben überein, muss das Werkzeug meist maschinell überarbeitet werden. Dieser Optimierungsprozess ist schon für etablierte Extrusionsprodukte wie Fensterprofile oder Rohre Zeit- und Kostenintensiv. Für Bahnschwellen wird die Problematik noch verschärft, da für die Herstellung einer Probeschwelle mehr als 8 Stunden und mehrere 100 kg Material benötigt werden. Um die Optimierungsschleifen zu reduzieren können computergestützte Simulationen eingesetzt werden [Martens (2006)].

Bahnschwellen sind sicherheitsrelevante Bauteile des Gleiskörpers. Da jegliche Fehler im Bahnbetrieb ausgeschlossen werden müssen, ist die akkurate Überprüfung der Qualität der Schwellen unerlässlich. Die Bewertung von Holzschwellen nach DIN EN 13145 basiert auf der langjährigen Erfahrung mit dem Naturmaterial und erfolgt anhand von empirischen Kriterien, wie z. B. Art und Anzahl der Risse, Faserverlauf oder Anzahl der Jahrringe. Diese Bewertung ist daher nicht auf anderen Materialien übertragbar. Derzeit werden vom EBA ersatzweise für die Kunststoffschwelle Prüfmethoden und Bewertungskriterien herangezogen, welche für die Qualitätsprüfung von Betonschwellen nach DIN EN 13230 definiert wurden. Diese Herangehensweise ist jedoch nicht werkstoffkonform: Bei der statischen Schwellenprüfung zum Beispiel wird die Betonschwelle bis zum ersten Riss-Auftritt belastet – bei Kunststoffschwellen treten Risse jedoch nicht auf. Dazu werden kunststoffspezifische Eigenschaften wie das zeit- und temperaturabhängige Verformungs- und Versagensverhalten weder geprüft noch sonst beachtet. Letztendlich sind auch die Grenzwerte aus DIN EN 13230 für die Zulassung und die Qualitätsüberwachung der Kunststoffschwelle im Rahmen eines Einsatzes als Ersatz für Holzschwellen ggf. nicht geeignet, da die Betonschwellen für anderen Strecken mit deutlich höheren Anforderungen (Geschwindigkeit, Last, ...) verwendet werden.

Die Ökobilanz ist eine umfassende, wissenschaftlich fundierte und weitverbreitete Methode zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen über den gesamten Lebenszyklus. Sie basiert auf den Normen ISO 14040 und ISO 14044 und wird in vielen Branchen und Bereichen eingesetzt. Zur ökobilanziellen Bewertung von Bahnschwellen gibt es eine umfassende Studie von Werner (2009). Darin werden Eichen-, Buchen-, Stahl-, und Betonschwellen untersucht und vergleichend bewertet. Diese Studie basiert auf Daten von Herstellern und Schienennetzbetreibern und wurde einer kritischen Prüfung unterzogen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Holzschwellen überwiegend geringere Umweltwirkungen verursachen als die Betonschwelle und die Stahlschwelle. Ökobilanzen zur Untersuchungen der Umweltwirkungen von Kunststoffschwellen wie der RPT-Schwelle von PAV wurden bisher nicht erstellt. Ebenso gibt es bisher keine Erkenntnisse darüber, welche ökologischen Vor- oder Nachteile eine Bahnschwelle aus Recycling-Material im Vergleich mit konventionellen Bahnschwellen hat.

1.5 Zusammenarbeit

Alle drei Arbeitspakete wurden in enger Zusammenarbeit mit PAV durchgeführt. Zusätzlich wurde in AP3 der *Lehrstuhl & Prüfamt für Verkehrswegebau der TU München* mit der Durchführung von Bauteilprüfungen im Großprüfstand beauftragt. Zudem wurden Beratungsdienst-

leistungen hinsichtlich der bahntechnischen Anforderungen an der Kunststoffschwelle durch das Ingenieurbüro *Dr. Plica Ingenieure*, in Abstimmung mit dem EBA, erbracht.

2 Ergebnisse

2.1 AP1 Extrusionstechnologie- und Werkzeugentwicklung

Aufgrund vertraulicher Informationen wird der Inhalt dieses Kapitels nicht veröffentlicht.

2.2 AP3 Entwicklung von Material- und Schwellen-Kennwerten und deren Tests

2.2.1 Verwendung der Zuwendung

Für die Bewertung von Kunststoff-Bahnschwellen fehlen derzeit noch geeigneten Prüfrichtlinien. Aufgrund des spezifischen mechanischen Verhaltens von Kunststoffen können vorhandene Normen nicht ohne weiteres übertragen werden. Daher sollten in diesem Arbeitspaket kunststoffgerechte Material- und Bauteilprüfungen entwickelt werden. Dabei wurde der Fokus auf die Erarbeitung eines Prüfverfahrens gelegt, welches produktionsbegleitend zur Qualitätsüberwachung eingesetzt werden kann.

Am SKZ wurden dementsprechend Laboruntersuchungen an Probekörpern durchgeführt, um das mechanische Langzeitverhalten des Schwellenmaterials genauer zu charakterisieren. Ergänzend dazu wurden auch einzelne Bauteilprüfungen an ganzen Bahnschwellen durchgeführt. Diese Versuche, welche im Großprüfstand am Lehrstuhl & Prüfamts für Verkehrswegebau der TU München durchgeführt wurden, dienen dem quantitativen Vergleich zwischen Beton-, Holz- und Kunststoffschwelle, um eine Übertragbarkeit der Anforderungen aus der Prüfnorm für Betonschwellen auf die Prüfung von Kunststoffschwellen zu bewerten.

Das im vorliegenden Projekt zu erarbeitende Labor-Prüfverfahren basiert auf quasi-statischen und dynamischen/zyklischen Belastungsprüfungen an Probekörpern, welche im Spritzgießverfahren hergestellt bzw. direkt aus der Kunststoffschwelle spanend herausgearbeitet werden. Ziel dabei ist einen Nachweis der Ermüdungsfestigkeit für das Bahnschwellenmaterial möglichst zeitraffend zu erbringen.

2.2.2 Erzielte Ergebnisse

Festlegung des Anforderungsprofils / Lastenheft

Aufgrund mangelnder Vorgaben für Kunststoff-Bahnschwellen seitens des Eisenbahn-Bundesamtes bzw. der DB AG, stand zunächst die Aufgabe bevor, die bahntechnischen Anforderungen an der Kunststoffschwelle zu bestimmen und die Materialeigenschaften, welche diesbezüglich relevant sind, festzulegen.

In Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro *Dr. Plica Ingenieure* wurden für Kunststoffschwellen folgende Anforderungen festgehalten:

- Die Bahnschwelle erfährt hauptsächlich eine dynamische Biegebelastung durch fahrende Züge.
- Diese dynamische Belastung hängt von der statischen Belastung (proportional zur Achslast), der Fahrgeschwindigkeit und der Gleisbettung durch den Schotter ab.
- Die Kunststoffschwelle ist für den Einsatz als Holzschwellenersatz konzipiert, daher wird sie nur für Strecken mit Fahrgeschwindigkeit kleiner als 160 km/h verwendet.
- Für diese Strecken stellen Güterzüge die kritische Situation dar, daher wird mit einer Achslast von durchschnittlich 22,5 t gerechnet.
- Die Gleisbettung ändert sich mit der Zeit durch Setzung des Schotters und Einsenkung der Schwelle unter der dynamischen Belastung, was zur Entstehung von Hohlräumen und damit verbundenen zu einem Anstieg des Biegemoments führt.

- Aufgrund der Biegebelastung der Bahnschwelle unter einem stehenden Zug findet eine zeit- und spannungsabhängige Verformung (Kriechen) der Schwelle statt, welche zu einer Neigung der auf der Schwelle befestigten Schiene und dadurch zu einer Spurverengung führt.

Daraus konnte abgeleitet werden, dass das statische und dynamische Langzeitverhalten wesentliche Materialeigenschaften darstellen, welche für die Langzeit-Zuverlässigkeit der Bahnschwelle bei dem Einsatz im Gleis entscheidend sind und als Kriterien für eine Qualitätsüberwachung herangezogen werden sollten. Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens von Kunststoffen haben dabei Zeit, Temperatur und Höhe der Belastung einen starken Einfluss auf die Kennwerte, welche kunststoffgerecht ermittelt werden müssen.

Bewertung von Holz und Kunststoffschwellen nach BN 918143 bzw. DIN EN 13230

Um die Zulassung zur Betriebserprobung beantragen zu können, musste PAV die Bewertung der RPT-Bahnschwelle anhand der Prüfnormen für Betonschwellen (BN 918143 bzw. DIN EN 13230) durchführen. Dabei war die Bestimmung der Langzeit-Biegeeigenschaften (Ermüdung) besonders kritisch. Die entsprechende Prüfanordnung nach DIN EN 13230-4 ist in Abbildung 1 dargestellt.

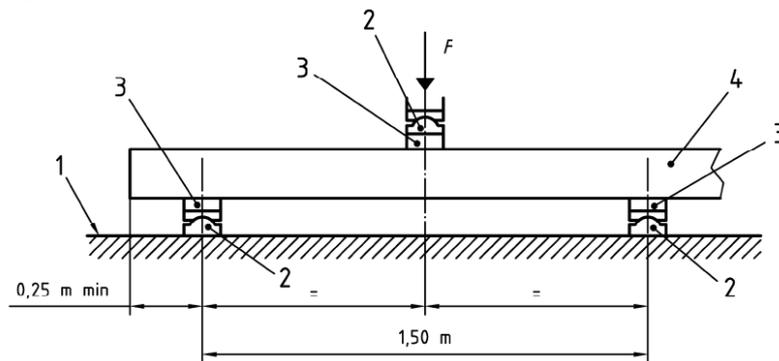


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Prüfanordnung gemäß DIN EN 13230-4

Die Lastvorgaben werden durch die Anwendung der Schwelle und ihre Geometrie beeinflusst und werden daher in Form von negativen Biegemomenten in Schwellenmitte bzw. positiven Biegemomenten im Schienenaufleger festgehalten. Zur Durchführung der Ermüdungsversuche werden zudem folgende Bedingungen vorgegeben (vgl. Abbildung 2):

- Kraftregelung (sinusförmig)
- Lastverhältnis $R = F_{b_u}/F_{b_o} = 0,25$
- Frequenz $f = 5 \text{ Hz}$

Die erste Laststeigerung bis zu F_{b_r} (vgl. Abbildung 2) zur Erzeugung eines ersten Risses wurde bei der Kunststoffschwelle nicht durchgeführt, da dies für den Kunststoff nicht relevant ist.

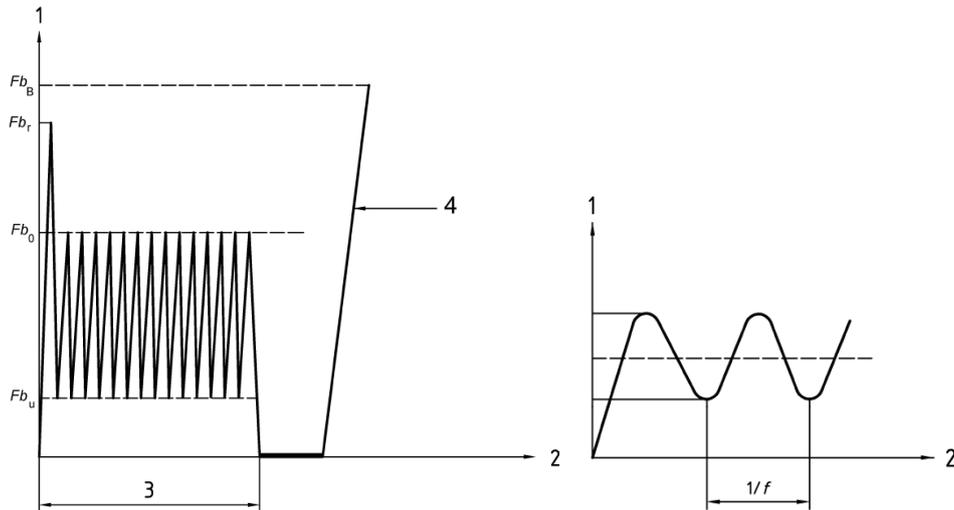


Abbildung 2: Belastungsbedingungen für die Ermüdungsprüfung nach DIN EN 13230-4

Für die Zulassungsprüfung wurde die Vorgabe der Betonschwelle Typ B 93, welche der Geometrie der Kunststoffschwelle am nächsten kommt, herangezogen. Bei dem gegebenen Biegemoment von 23 kNm (BN 918143, entspricht $Fb_0 = 66$ kN) wurde die angeforderten Lastspielzahl von 2 Mio. Zyklen ohne Versagen sowie die abschließende Laststeigerung bis Fb_B (> 132 kN) erreicht und die Kunststoffschwelle somit für die Betriebserprobung zugelassen. Bei den Dauerschwingversuchen traten jedoch große bleibende Verformungen auf, die zu einer nicht zulässigen Veränderung der Spurweite führen würde. Da diese hohen bleibenden Verformungen bei einer vergleichbaren Prüfung mit niedrigerem Biegemoment (Betonschwelle Typ B 70, 15 kNm) nicht auftraten, kann die Betriebserprobung durchgeführt werden, die mögliche Veränderung der Spurweite in realem Einsatz dabei achtsam beobachtet werden. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob die Anforderungen zum Biegemoment von der Beton- auf die Kunststoffschwelle direkt übertragen werden können.

Die Kunststoffschwelle ist für den Einsatz als Holzschwellenersatz konzipiert, daher wurde hier untersucht, wie die Holzschwelle sich unter denselben Prüfbedingungen verhält. Der Versuchsaufbau im Großprüfstand, welcher am Lehrstuhl & Prüfamt für Verkehrswegebau der TU München verwendet wurde, ist in Abbildung 3 dargestellt.

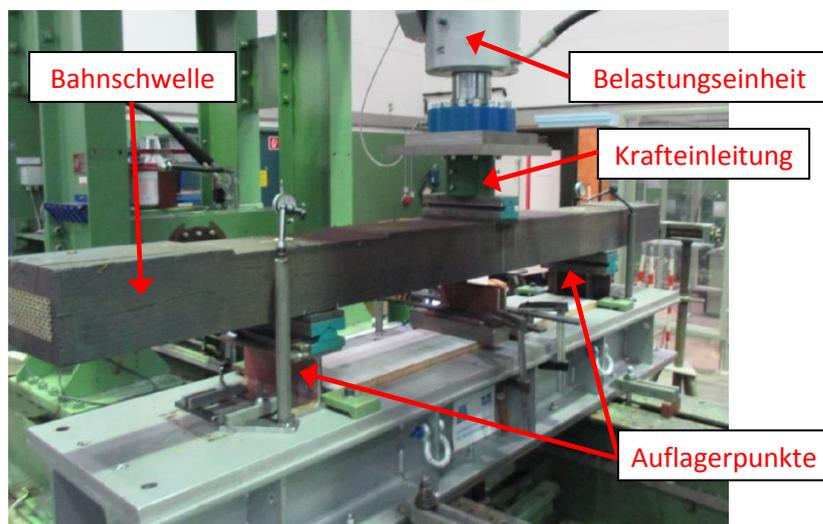


Abbildung 3: Versuchsaufbau für die Ermüdungsprüfung der Holzschwelle im Großprüfstand der TUM (in Anlehnung an DIN EN 13230-4)

Wie die Kunststoffschwelle erfüllt die Holzschwelle die Anforderung der Betonschwelle Typ B 93 (2 Mio. Lastspielen, $F_{bB} > 132 \text{ kN}$). Die Verformungen waren jedoch deutlich geringer als bei der Kunststoffschwelle und im Hinblick auf die Spurweite unbedenklich. Aufgrund des stark unterschiedlichen E-Moduls (37 GPa für die Betonschwelle, ca. 12,5 GPa für die Holzschwelle und nur ca. 5 GPa für die Kunststoffschwelle bei 23 °C) liegt die Hypothese nahe, dass die Bedingungen nicht nur ungeeignet sind, um die Kunststoffschwelle zu bewerten, sondern auch in der Realität nicht auftreten.

Untersuchungen zur Lastsituation im Gleis

Die reale Lastsituation ist nicht bekannt, daher sollte diese ursprünglich am Bauteil im Großprüfstand mit Schotterkasten untersucht werden. Nach Rücksprache mit dem Eisenbahn-Bundesamt (EBA) wurden die geplanten Versuche jedoch als nicht zielführend eingestuft. Die Situation im Gleis lässt sich im Schotterkasten nicht realistisch genug nachbilden und die Reproduzierbarkeit ist eher eingeschränkt, daher wäre der gemessene Biegemoment nicht aussagekräftig. Nur eine Messung direkt im Gleis während der Betriebserprobung, wie von PAV geplant, kann daher herangezogen werden.

Um im Rahmen des Forschungsvorhabens trotzdem eine Aussage zu den Prüfbedingungen zu ermöglichen wurden definierte Vergleichsmessungen an den drei Schwellentypen durchgeführt. Diese statischen Versuche werden entsprechend der realen Situation im Gleis gewählt. Dabei wird eine vertikale Achslast über zwei Schienen auf Rippenplatten im Schienenaufleger übertragen und das resultierende Biegemoment sowie die vertikale Verformung in Schwellenmitte gemessen (vgl. Versuchsaufbau in Abbildung 4).

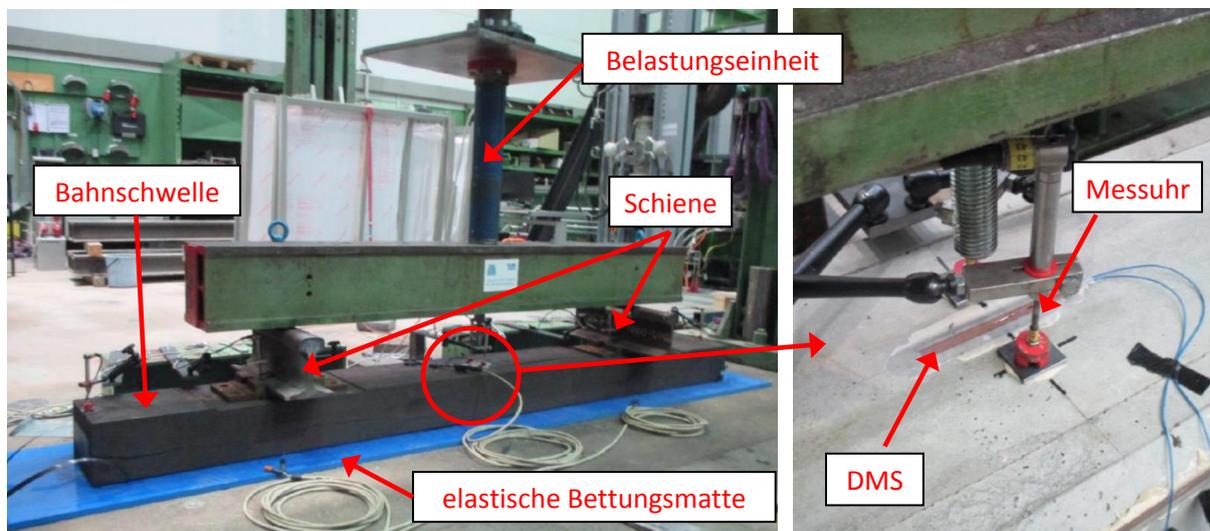


Abbildung 4: Versuchsaufbau für die Lasteintragversuche an den drei Schwellentypen (links), inkl. Messung des Biegemoments mit DMS sowie der vertikalen Verformung mit Messuhren (rechts)

Wesentliche Änderung im Vergleich zu den geplanten Schotterkastenversuchen ist hier die Lagerung der Schwellen auf ganzer Länge auf einer elastischen Matte mit definierten Bettungseigenschaften. Die Versuche wurden mit drei unterschiedlich steifen Matten durchgeführt, um die im Betriebsgleis auftretenden unterschiedlich steifen Bettungen zu simulieren. Für die Wahl der Steifigkeit gelten nach der Oberbauberechnung der DB Netz AG folgende Orientierungswerte:

- schlechter Untergrund (rolliger Sand): $C = 0,02 \text{ N/mm}^3$
- guter Untergrund (dicht gelagerter Kies): $C = 0,10 \text{ N/mm}^3$

- steifer Untergrund (Fels, Betonbrückendeck): $C = 0,30 \text{ N/mm}^3$

Zur Ausführung der Versuche erfolgte die Lagerung der verschiedenen Schwellen auf drei elastischen Matten der Fa. Getzner Werkstoffe GmbH, Bürs (Österreich), mit folgenden Eigenschaften:

| Typ | Farbe | Länge [mm] | Breite [mm] | Dicke [mm] | Bettungsmodul C [N/mm ³] | Untergrund |
|-----------------|---------|------------|-------------|------------|--------------------------------------|------------|
| Sylomer S380 | schwarz | 1.500 | 500 | 20 | 0,03 | schlecht |
| Sylodyn N 36025 | pink | 1.500 | 500 | 12 | 0,07 | gut |
| Sylodyn 62033 | blau | 1.500 | 500 | 16 | 0,21 | steif |

Die Lasteintragversuche wurden mit jeweils vier Laststufen durchgeführt, welche wie folgt auf Basis des Anforderungsprofils ausgewählt wurden (Angabe pro Stützpunkt):

- Laststufe 1 (70 kN) entspricht dem charakteristischen Wert der Stützpunktkraft (einschließlich Dynamik) auf Hauptabfuhrstrecken bei Belastung durch einen Güterzug mit Achslast $A = 225 \text{ kN}$ und Geschwindigkeit $v = 120 \text{ km/h}$.
- Laststufe 2 (110 kN), entspricht dem erhöhtem Wert der Stützpunktkraft bei schlechter Instandhaltung der Strecke (Güterzug, $A = 225 \text{ kN}$, $v = 120 \text{ km/h}$).
- Laststufe 3 (150 kN) entspricht der aus der Betriebserfahrung abgeleiteten Vertikal-last, für welche die Betonschwelle Typ B 70 dauerhaft ausgelegt ist (Bemessungsmoment $M = 15 \text{ KNm}$). Die Prüfkraft deckt weitere Effekte wie eine Erhöhung des Schwellenbiegemomentes durch teilweise Hohllagen der Schwelle oder dynamische Stöße aus Flachstellen an den Rädern ab.
- Laststufe 4 (190 kN) entspricht dem Worst-Case-Szenario.

Aus der gemessenen Randfaserdehnung ε wird für diese 4 Laststufen das negative Biegemoment in Schwellenmitte mit folgender Formel berechnet:

$$M^- = W_o \cdot E \cdot \varepsilon \quad \text{Gleichung 7}$$

mit M^- negatives Biegemoment in Schwellenmitte
 W_o Widerstandsmoment an der Oberfläche in Schwellenmitte
 E E-Modul der Schwelle
 ε Randfaserdehnung der Schwelle in Schwellenmitte

Die erste Auswertung der Versuche zeigte jedoch ein unerwartetes Verhalten: Anstatt eines negativen Biegemoment wurde für die Betonschwelle ein durchgehend positives Biegemoment, welches bei korrekter Belastung physikalisch nicht möglich ist. Untersuchungen an der verwendeten Betonschwelle zeigten, dass diese eine Aufwölbung an der Unterseite um ca. 2 mm in Schwellenmitte aufweist. Dadurch liegt die Schwelle bei Versuchsbeginn nicht vollflächig auf, was zu dem positiven Biegemoment führt. Bis zur maximalen Laststufe von 190 kN bleibt das gemessene Biegemoment positiv, daher liegt die Betonschwelle weiterhin nicht vollflächig auf. Damit waren diese Ergebnisse für das Projekt nicht verwertbar.

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl & Prüfamts für Verkehrswegebau sowie dem im Projekt beratend tätigen Ingenieurbüro Dr. Plica Ingenieure wurde die fachliche Klärung der Sachlage betrieben und eine Einigung zwischen dem SKZ und der TU München erzielt, ein Teil

der Versuche an der Betonschwelle zu wiederholen. Zur Lösung der problematischen Krümmung der Auflagefläche wurde die Unterseite der Betonschwelle mit einem selbststeinspiegelnden Mörtel eben gemacht (vgl. Abbildung 5). Vor Versuchsbeginn wurde mit einem Blatt Papier überprüft, dass die so behandelte Betonschwelle vollflächig auf der elastischen Matte aufliegt. Damit konnten die Versuche erfolgreich durchgeführt werden.

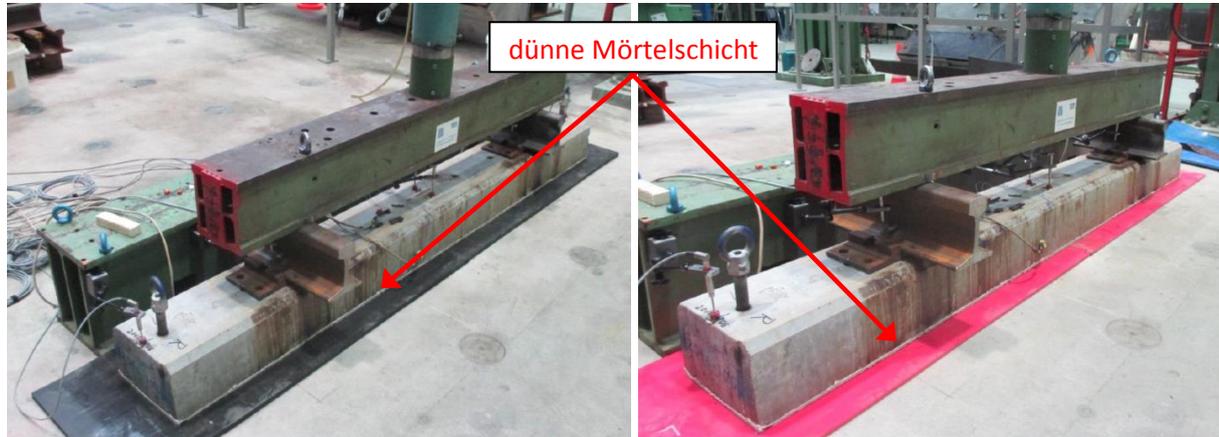


Abbildung 5: Wiederholungsversuche an der Betonschwelle mit vollflächiger Auflagerung

Bei den Kunststoff- und Holzschwellen wurde dagegen auf eine Wiederholung der Versuche verzichtet. Eine Überprüfung der Ebenheit der Schwellenunterseite konnte nicht mehr durchgeführt werden. Der lastabhängige Verlauf des Biegemoments (vgl. Abbildung 6 links) weist jedoch auf eine anfängliche, leichte Aufwölbung hin, welche sich mit steigender Last abschließt. Bei dem ersten Versuch (auf der blauen Matte) liegt die Schwelle ab einer Last von ca. 70 kN für die Kunststoffschwelle bzw. 110 kN für die Holzschwelle vollflächig auf (positives Biegemoment). Bis auf den anfänglichen Versatz verläuft das Biegemoment wie erwartet.

Um die Messungen für die verschiedenen Matten nicht nur qualitativ sondern auch quantitativ vergleichen zu können, wurde der Versatz abgezogen. Dazu wird auf Basis der gemessenen Dehnungen ein linear elastisches Verhalten der Schwellen bis zu ca. 110 kN angenommen und der Verlauf bis zur Nullbelastung extrapoliert. Alle Kurven werden anschließend auf den Ursprung des Koordinatensystems verschoben, wie in Abbildung 6 rechts dargestellt.

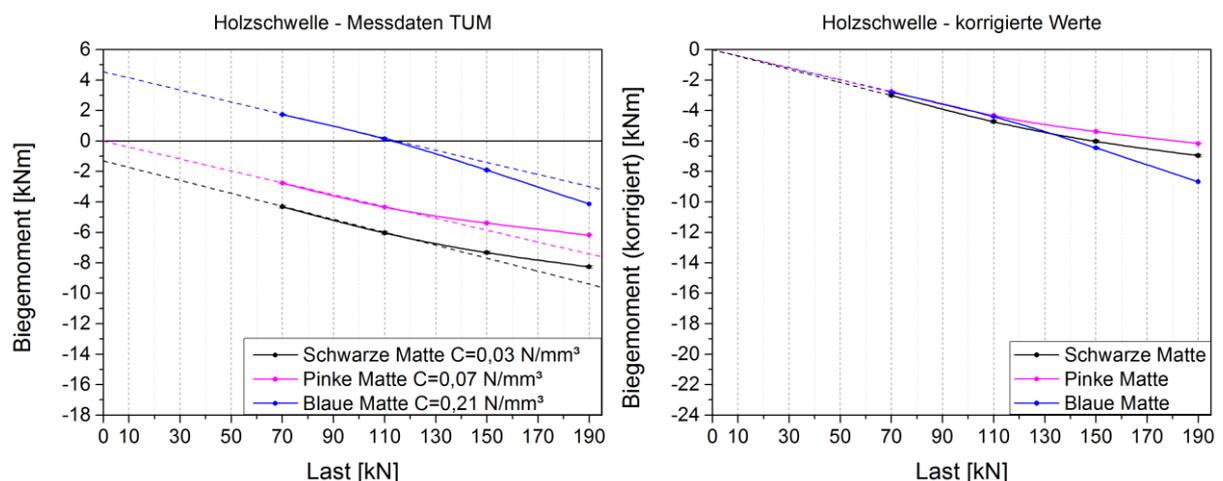


Abbildung 6: Korrektur des Biegemoments am Beispiel der Holzschwelle

Die korrigierten Ergebnisse sind jetzt für die drei Schwellentypen und die drei Matten direkt vergleichbar und werden in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt. Dabei sticht vor allem

hervor, dass Holz- und Kunststoffschwelle sich fast identisch verhalten und sich beide sehr deutlich von der Betonschwelle unterscheiden. Letztere verhält sich bis zur maximal geprüften Last von 190 kN linear elastisch. Bei der Holz- und Kunststoffschwelle nimmt das Biegemoment oberhalb von 110 kN nur bei steifem Untergrund annähernd linear proportional zu. Bei einem weniger steifen Untergrund ist die Zunahme dann deutlich geringer. Insgesamt weisen Holz- und Kunststoffschwelle ein wesentlich geringeres Biegemoment als die Betonschwelle bei identischer Lastsituation auf.

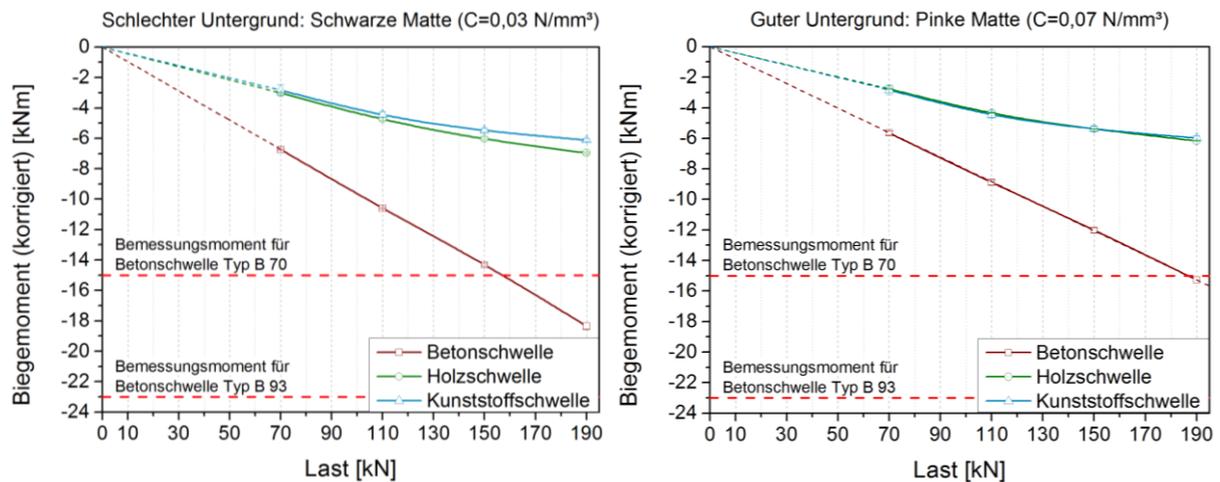


Abbildung 7: Gemessenes Biegemoment in Abhängigkeit der aufgetragenen Vertikallast pro Stützpunkt für die schwarze Matte (links) und die pinke Matte (rechts)

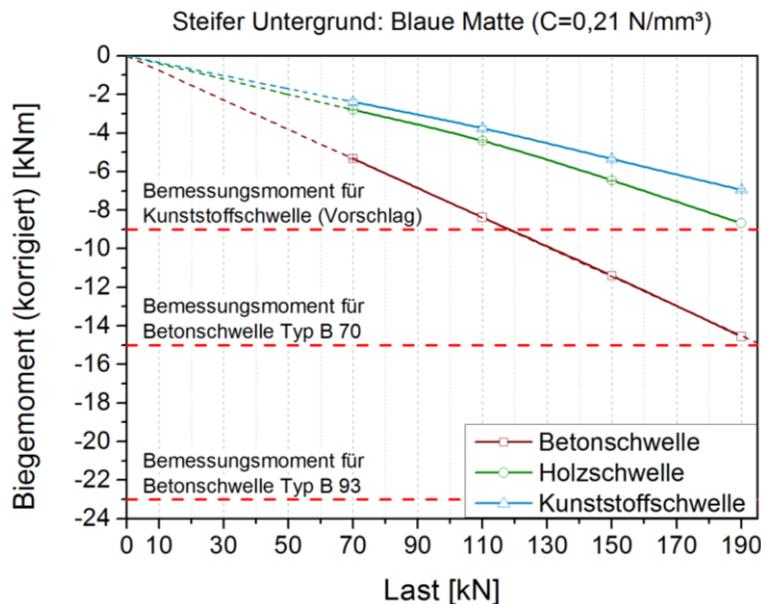


Abbildung 8: Gemessenes Biegemoment in Abhängigkeit der aufgetragenen Vertikallast pro Stützpunkt für die blaue Matte

Den Vergleich zwischen gemessenem Biegemoment und Vorgabe aus BN 918143 zeigt, dass das Bemessungsmoment der Betonschwelle Typ B 93 (23 kNm) selbst bei schlechtem Untergrund einen großen Sicherheitsfaktor bezogen auf die übliche Lastsituation für Güterzüge aufweist. Für die Holz- und Kunststoffschwelle wird jedoch das größte Biegemoment bei steifem Untergrund gemessen. Für diese Lastsituation erweist sich das Bemessungsmoment der Betonschwelle Typ B 70 (15 kNm) als zweckmäßigeres Kriterium für die Bewertung von Kunststoff-Bahnschwellen, die als Ersatz für Holzschwellen dienen sollen. Unter Berücksichtigung des kunststoffspezifischen Verhaltens wird sogar ein niedrigeres Be-

messungsmoment von 9 kNm für die Bewertung von Kunststoffschwellen vorgeschlagen (vgl. Abbildung 8).

Bewertung von Kunststoff-Bahnschwellen hinsichtlich Festigkeit (Ermüdung)

Unter Berücksichtigung des niedrigeren Bemessungsmoments erfüllte die Kunststoffschwelle bei den Zulassungsversuchen die Anforderungen nach BN 918143. Daher könnte theoretisch das Prüfverfahren nach einer angepassten Beton-Norm auch zur Qualitätssicherung von Kunststoff-Bahnschwellen eingesetzt werden. Diese Bauteilprüfung an der ganzen Schwelle weist jedoch zwei entscheidende Nachteile auf. Erstens ist eine dynamische Prüfung nach DIN EN 13230-4 im Großprüfstand sehr teuer, dauert lang und kann von den Schwellenherstellern meist nicht hausintern durchgeführt werden. Zweitens liefert diese Prüfung nur eine qualitative Bewertung (in Ordnung bzw. nicht in Ordnung) ohne eine Möglichkeit abzuschätzen, wieviel Sicherheit vorhanden ist bzw. wieviel besser die Schwelle werden sollte, um die Anforderungen zu erfüllen.

Die Vorgehensweise beim Dimensionieren von Kunststoffbauteilen gegen eine zulässige Spannung entspricht der bei der Metallbauteilauslegung [Michaeli (1995)]. Eine Spannungsanalyse gibt Aufschluss über die Höhe und Art der im betrachteten Querschnitt wirksamen Spannungen. Mehrachsige Spannungszustände werden mit Hilfe geeigneter Versagenskriterien zu einer äquivalent wirkenden einachsigen Vergleichsspannung $\sigma_{v\ max}$ transformiert und mit dem zulässigen Spannungswert σ_{zul} verglichen. Dieser wird aus einem Kurzzeit-Werkstoffkennwert K gewonnen, der um den nötigen Sicherheitsbeiwert S und eventuelle Abminderungsfaktoren A reduziert wird. Die Grundgleichung für den Festigkeitsnachweis lautet demnach [Ehrenstein (2007), Erhard (2008)]:

$$\sigma_{v\ max} \leq \sigma_{zul} = \frac{K}{S \cdot A} \quad \text{Gleichung 8}$$

| | | |
|-----|-------------------|---|
| mit | $\sigma_{v\ max}$ | maximal auftretender Spannungswert |
| | σ_{zul} | zulässige Spannung |
| | K | Kurzzeit-Festigkeitskennwert, gegen den dimensioniert werden soll (z.B. Bruchspannung oder Streckspannung) |
| | A | Werkstoffabminderungsfaktor(en) |
| | S | Sicherheitsfaktor |

Für die Bewertung von Kunststoff-Bahnschwellen ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Wie wird die zulässige Spannung bestimmt?
- Welche Spannung (Grenzwert) tritt unter realer Belastungssituation der Bahnschwelle im Gleis auf?
- Können die Grenzwerte für Betonschwellen aus DIN EN 13230 als Bewertungskriterium für die Kunststoffschwelle herangezogen werden?
- Kann auf Basis der zulässigen Spannung, welche primär zur Dimensionierung des Bauteils Bahnschwelle eingesetzt wird, ein einfaches Laborverfahren zur Qualitätssicherung abgeleitet werden?

Zulässige Spannung:

Die Bestimmung der zulässigen Spannung erfolgt auf Basis des Kurzzeit-Festigkeitskennwertes K . Aufgrund der Biegebelastung wird somit bei der Bahnschwelle die Kurzzeit-

Biegefestigkeit als Kennwert herangezogen, welche bei dem verwendeten Material der maximalen erreichbaren Randfaserspannung σ_{fM} entspricht. Diese Kurzzeit-Festigkeit stellt die oberste Grenze der zulässigen Spannung dar. Im Betrieb wirken sich jedoch die Belastungsbedingungen sowie verschiedene Einflüsse vermindern auf die Festigkeit aus. Daraus ergeben sich die Abminderungsfaktoren. Mögliche wirksame Synergien verschiedener Einflüsse werden häufig durch Multiplikation der Abminderungsfaktoren berücksichtigt [Ehrenstein (2007), Erhard (2008)].

Es existieren viele mögliche Einflüsse, die sich auf die Festigkeit auswirken. Es gilt daher die Betriebsbedingungen genauer zu beschreiben und daraus abzuleiten, welche Einflüsse für die betrachtete Anwendung relevant sind. Für die Kunststoff-Bahnschwelle wurde analysiert, dass vor allem die langzeitige, dynamische Belastung (Ermüdung), die Temperatur (Außenanwendung mit starken saisonalen Schwankungen) und die Fertigung bzw. die Rezeptur (Verarbeitung von Rezyklat) betrachtet werden sollten.

Zur Berücksichtigung von unvorhersehbaren Einflüssen bzw. von Unsicherheiten bei der Ermittlung der eingesetzten Kennwerte wird zudem ein Sicherheitsfaktor eingesetzt. Dieser hängt von der Anwendung ab, je nachdem z. B. ob das Bauteil eine sicherheitsrelevante Aufgabe erfüllt oder nicht. Die Höhe des Sicherheitsfaktors wird meist durch die entsprechende Zulassungsbehörde (je nach Spezifikationen, Länderrecht, Art der Gefahr etc.) bzw. durch den Kunden vorgeschrieben. Bezüglich der Kunststoff-Bahnschwelle gibt es von dem EBA bzw. der DB AG keine konkrete Vorgabe zum Sicherheitsfaktor.

Die Bestimmung der zulässigen Spannung für die Bahnschwelle wird schematisch in Abbildung 9 dargestellt. Dabei wird erkennbar, dass diese Spannung direkt von der geplanten Einsatzdauer (hier über die geforderten Lastspielzahlen N_{max} charakterisiert) abhängt.

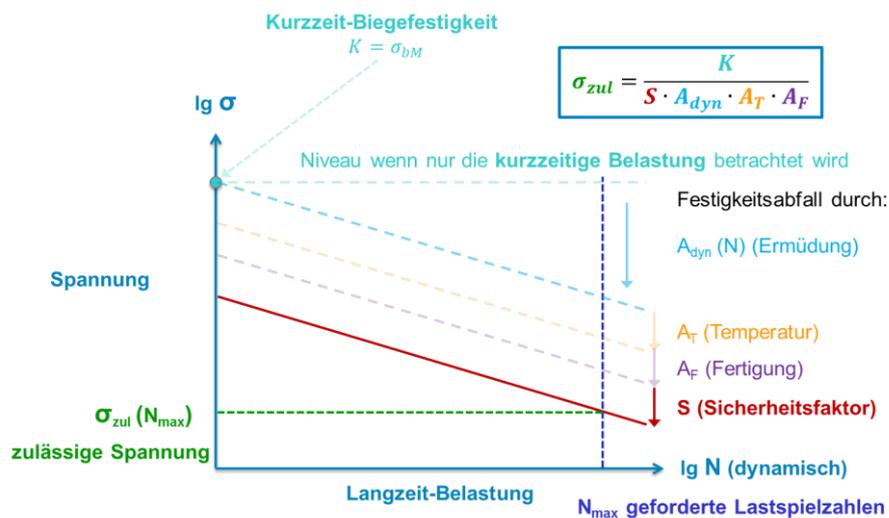


Abbildung 9: Bestimmung der zulässigen Spannung (schematisch)

Abminderungsfaktoren:

Zur Ermittlung der Abminderungsfaktoren wurden am SKZ Laboruntersuchungen durchgeführt. Aus dem von PAV zur Verfügung gestellten Compounds (PE-Rezyklat mit ca. 27% Glasfaser, identische Rezeptur wie bei der Herstellung der RPT-Kunststoffschwelle) wurden entsprechende Probekörper spritzgegossen (DIN EN ISO 527, Typ 1A).

Das Kurzzeit-Biegeverhalten wurde mit 3-Punkt-Biegeversuchen nach DIN EN ISO 178 bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelt und in Abbildung 10 dargestellt. Die Kurzzeit-

Biegefestigkeit, welche für das Material über die Streckspannung σ_{TM} definiert ist, nimmt mit steigender Temperatur näherungsweise linear ab. Als Referenz für das Kurzzeit-Festigkeitskennwert K wird die Biegefestigkeit bei 23 °C herangezogen.

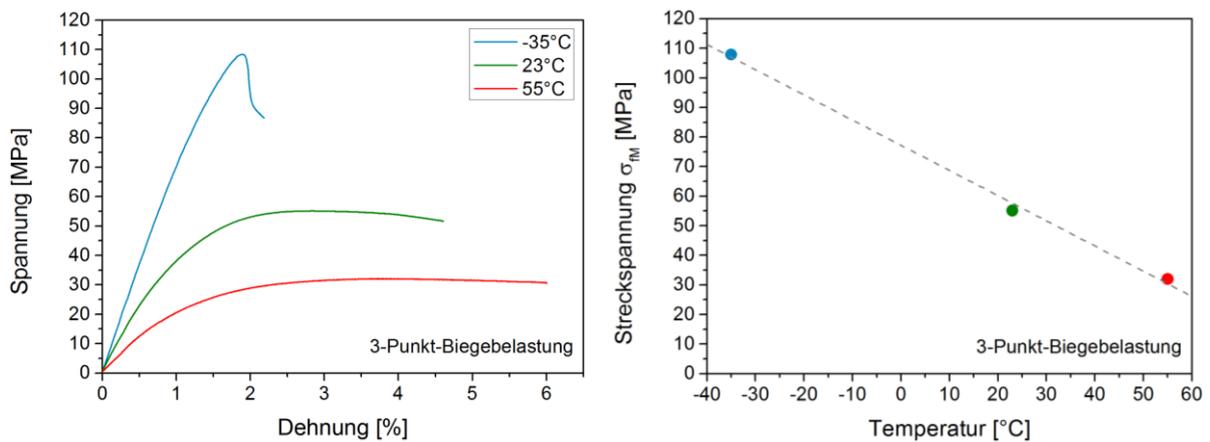


Abbildung 10: Kurzzeit-Biegeverhalten des PE-Compounds bei unterschiedlichen Temperaturen, inkl. Spannungs-Dehnungs-verlauf (links) und Biegefestigkeit (rechts)

Der Abminderungsfaktor A_T , welcher den Temperatureinfluss beschreibt, kann theoretisch aus dem linearen Abfall der Biegefestigkeit mit steigender Temperatur direkt abgeleitet werden. Zuerst musste jedoch überprüft werden, ob der Temperatureinfluss bei Kurzzeit- und Langzeit-Beanspruchung identisch ist.

Daher wurde das Ermüdungsverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Zur Ermittlung der Einsatzgrenzen bei dynamischer Beanspruchung werden zumeist Wöhlerkurven ermittelt. Dazu werden im sogenannten Einstufenschwingversuch (Wöhlerversuch) Proben bei konstantem Lastverhältnis R mit verschiedenen großen Oberspannungen σ_{max} bis zum Bruch beansprucht. Die durch die Wertepaare von σ_a und der Bruchlastspielzahl N_B legbare Ausgleichkurve wird Wöhlerkurve genannt. Bezogen auf die Kurzzeit-Biegefestigkeit entspricht diese Kurve des lastspielzahlabhängigen Abminderungsfaktors $A_{dyn}(N)$ (vgl. Abbildung 9).

Auf den Verlauf der Wöhlerkurve bei Kunststoffen sind verschiedene Einflussfaktoren durch die Versuchsparameter zu nennen, vor allem die Belastungsart (z.B. Zug, Druck, Biegung), das Lastverhältnis, die Belastungsform (z.B. Sinus, Rechteck), die Temperatur, eventuelle Umgebungsmedien und die Prüffrequenz. In Anlehnung auf DIN EN 13230-4 wurden folgende Bedingungen ausgewählt:

- Biegeschwellbelastung (3-Punkt-Biegung)
- Kraftregelung (sinusförmig)
- Lastverhältnis $R = F_{min}/F_{max} = 0,25$
- Frequenz $f = 5$ Hz

Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 11 dargestellt.

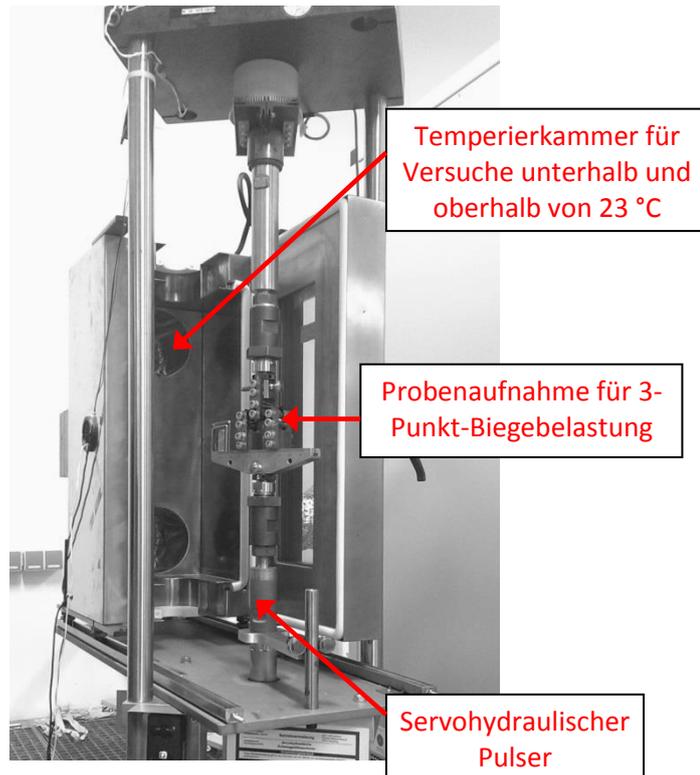


Abbildung 11: Versuchsaufbau für die Wöhlerversuche an den spritzgegossenen Probekörper

Die Referenz-Wöhlerkurve bei einer Temperatur von 23 °C wird in Abbildung 12 dargestellt. Daraus kann der lastspielzahlabhängige Abminderungsfaktor $A_{dyn}(N)$ für bis zu ca. 10^7 Lastspiele bestimmt werden.

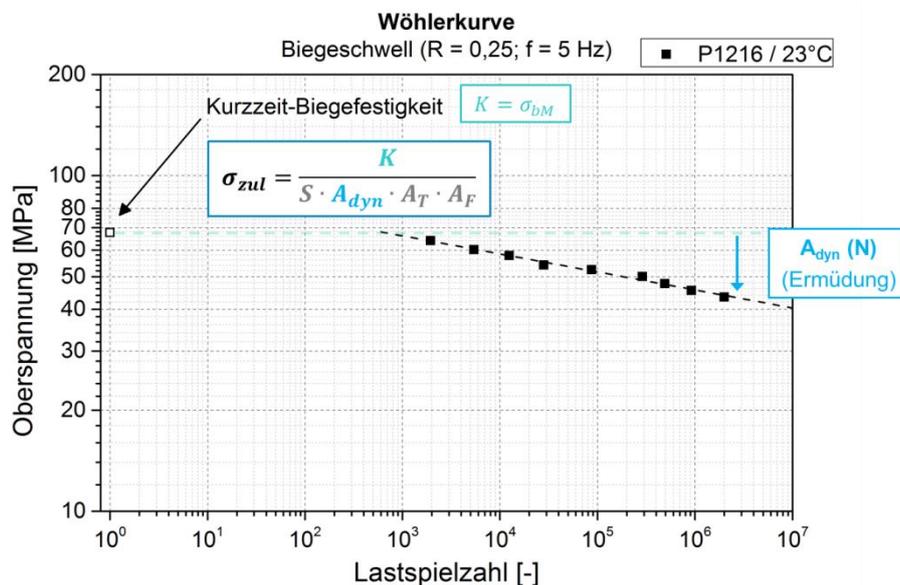


Abbildung 12: Bestimmung des lastspielzahlabhängigen Abminderungsfaktors $A_{dyn}(N)$

Die Ermüdungsversuche wurden mit Probekörpern aus einer zweiten Charge wiederholt. Die Fertigungseinflüsse wurden dabei gezielt untersucht: Die zweite Charge unterscheidet sich von der ersten Charge durch einen zusätzlichen Verarbeitungsschritt bei der Compounding bei gleichbleibender Rezeptur. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 dargestellt.

Die Wöhlerkurven verlaufen für die beiden Chargen parallel. Die vertikale Verschiebung zwischen den Kurven in der doppellogarithmischen Auftragung entspricht der Abminderung, welche bei der Kurzzeit-Festigkeit beobachtet werden kann. Daher reicht bei gleichbleibender Rezeptur eine Kurzzeit-Biegeprüfung zur Bestimmung des fertigungsbezogenen Abminderungsfaktors A_F .

Die Abminderung durch vertikale Verschiebung erscheint in Abbildung 13 zunächst gering, sie bedeutet jedoch eine signifikante Verschlechterung: Bei gleichbleibender Belastung trifft das Versagen um ca. eine Dekade früher auf. Auch die absolute Festigkeitsabnahme ist aufgrund der logarithmischen Auftragung größer als optisch wahrgenommen.

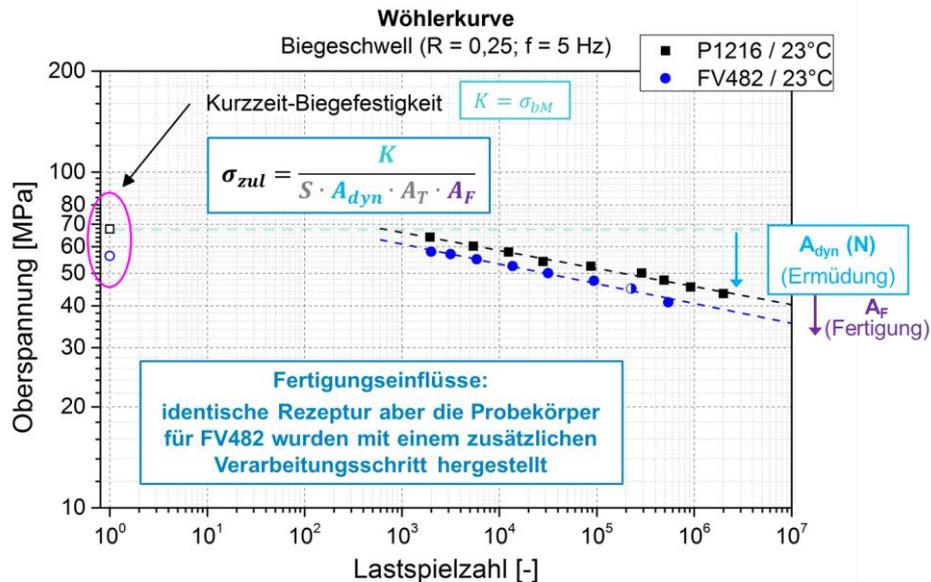


Abbildung 13: Bestimmung des Abminderungsfaktors A_F zur Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen

Um den Einfluss der Temperatur auf die Ermüdungsfestigkeit zu untersuchen, wurden für die zweite Charge Wöhlerkurven bei weiteren Temperaturen ermittelt. Die Ergebnisse in Abbildung 14 für die beiden extremen Temperaturen -35°C und $+55^\circ\text{C}$ zeigt wie erwartet eine starke Auswirkung der Temperatur auf die Wöhlerkurven.

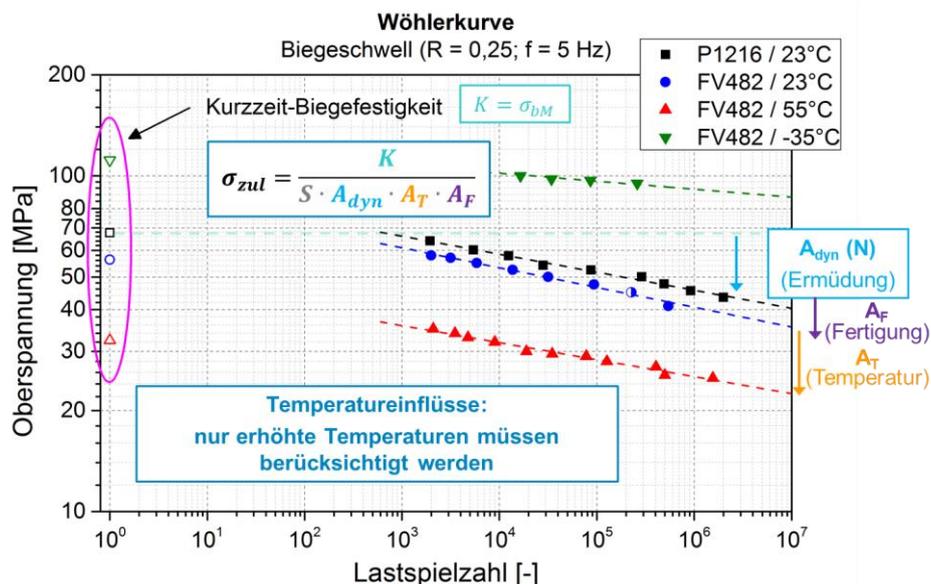


Abbildung 14: Bestimmung des Abminderungsfaktors A_T zur Berücksichtigung von Temperatureinflüssen

Eine tatsächliche Abminderung wird jedoch nur bei erhöhter Temperatur beobachtet. Tiefere Temperaturen wirken sich versteifend auf das Materialverhalten aus und sind daher im Hinblick auf die Ermüdungsfestigkeit unkritisch.

Wie bei dem fertigungsbezogenen Abminderungsfaktor A_F verlaufen die Wöhlerkurven zwischen 23 °C und 55 °C parallel und die vertikale Verschiebung zwischen den Kurven ist mit der Änderung der Kurzzeit-Festigkeit vergleichbar. Daher reicht hier auch eine Kurzzeit-Biegeprüfung zur Bestimmung des temperaturabhängigen Abminderungsfaktors A_T aus.

Bewertung des Sicherheitsfaktors

Der Festigkeitsnachweis ist erbracht, wenn die maximale Vergleichsspannung in der Bahnschwelle kleiner oder gleich der zulässigen Spannung ist. Zur Abschätzung der maximalen Vergleichsspannung werden die Anforderungen zur Zulassung der Bahnschwelle herangezogen, also $2 \cdot 10^6$ Zyklen bei einem definierten Bemessungsmoment M . Für die Geometrie der RPT®-Gleisschwelle (260 x 160 x 2.600 mm) kann die entsprechende Biegespannung mit folgender Formel berechnet werden:

$$\sigma_f = \frac{6M}{b \cdot h^2} \quad \text{Gleichung 9}$$

- mit σ_f Biegespannung
 M negatives Biegemoment in Schwellenmitte
 b Breite der Schwelle
 h Höhe der Schwelle

Als Worst-Case-Szenario für den Einsatz der Kunststoffschwelle gilt eine dynamische Langzeitbelastung mit dem Bemessungsmoment der Betonschwelle Typ B 93 (23 kNm). Die maximal auftretende Vergleichsspannung entspricht daher einer Biegespannung von ca. 22,3 MPa. Daraus kann die lastspielzahlabhängige zulässige Spannung $\sigma_{zul}(N)$ abgeleitet werden. Dies entspricht der grünen durchgezogenen Linie in Abbildung 15, die parallel zu den Wöhlerlinien durch den vorgegebenen Punkt $\sigma_{zul}(2 \cdot 10^6) = 22,3$ MPa verläuft.

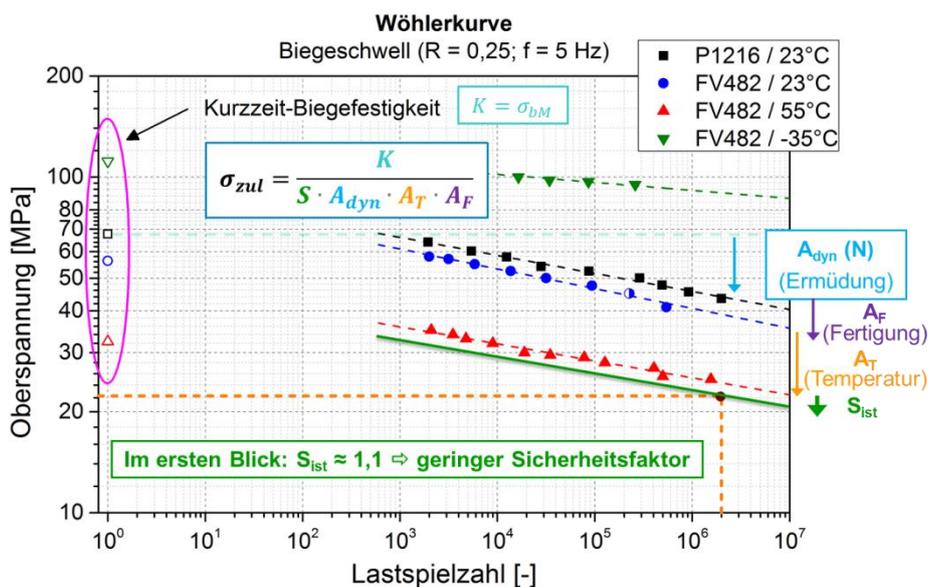


Abbildung 15: Bestimmung des Sicherheitsfaktor S_{ist} für ein Bemessungsmoment von 23 kNm

Das Worst-Case-Szenario entspricht einer Dauerbelastung bei einer konstanten, erhöhten Temperatur. Daher ergibt sich der Sicherheitsfaktor für die betrachteten Bedingungen (23 kNm, 55 °C) S_{Ist} aus der vertikalen Verschiebung zwischen der roten und der grünen Linien. Mit einem Wert von ca. 1,1 erscheint dieser Sicherheitsfaktor bei erster Betrachtung eher gering. Als Worst-Case-Szenario liegen jedoch die verwendeten Annahmen hinsichtlich der Belastung und der Temperatur höher als in der realen Belastungssituation im Gleis.

Erstens wirkt die maximal angenommene Temperatur von 55 °C nicht dauerhaft während der Lebensdauer einer Bahnschwelle und entspricht daher einer sehr konservativen Abschätzung, da hohe Temperaturen die größte Schädigung im Bauteil bewirken. Daher enthält die temperaturabhängige Abminderung bereits einen Sicherheitsfaktor. Um einzuschätzen, wie hoch dieser Sicherheitsfaktor ist, wurde der reale Jahresverlauf der Temperatur berücksichtigt. Bei dem Einsatz im Gleis tritt die maximale Temperatur vor allem an der Oberfläche auf, welche der Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist. Die Oberflächentemperatur von PE-Plättchen mit vergleichbarer Einfärbung (schwarz) wurde ein Jahr lang gemessen (Abbildung 16).

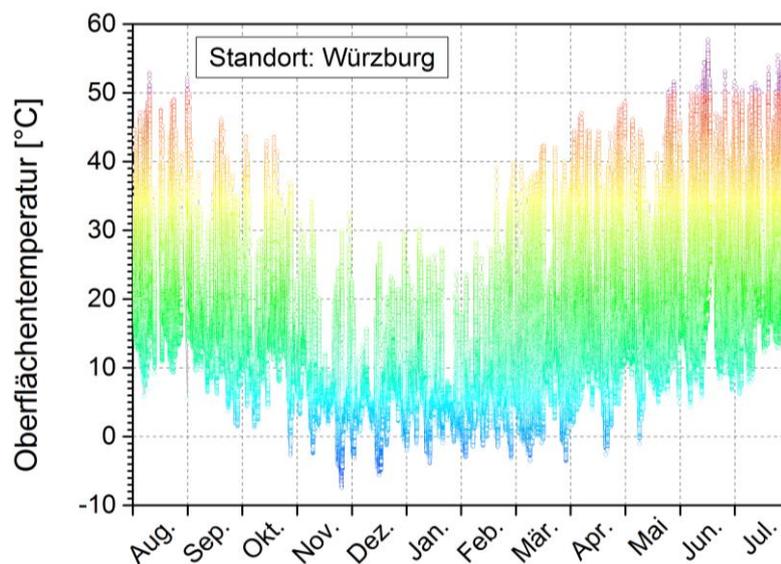


Abbildung 16: Jahresverlauf der an schwarz eingefärbten PE-Plättchen gemessenen Oberflächentemperatur

Dies bestätigt, dass die maximale Temperatur von 55 °C sinnvoll gewählt wurde, jedoch nur sehr selten vorliegt. Niedrigere Temperaturen überwiegen. Es wurde die sog. Effektivtemperatur bestimmt, welche bei konstanten Bedingungen zu derselben Alterung führt wie das über einem Jahr wirkende reale Temperaturkollektiv. Diese liegt mit ca. 22 °C deutlich über der Jahresmittelwerttemperatur (ca. 14 °C) aber auch deutlich unterhalb der maximalen Temperatur von $T = 55$ °C. Für die Temperatur muss daher kein besonderer Abminderungsfaktor dauerhaft berücksichtigt werden. Wird der Sicherheitsfaktor in Bezug auf die blaue Linie ($T = 23$ °C) berechnet, ergibt sich ein gesteigerter Wert von ca. 1,7.

Zweitens ist nach den Untersuchungen am Großprüfstand klar geworden, dass das Bemessungsmoment von 23 kNm für die Kunststoffschwelle deutlich zu groß gewählt ist. Wird das Bemessungsmoment der Betonschwelle Typ B 70 herangezogen, ist die maximal auftretende Vergleichsspannung mit ca. 14,5 MPa deutlich geringer. Eine zusätzliche Senkung des Bemessungsmoments auf 9 kNm, also ca. 8,8 MPa würde diesen Effekt noch weiter verstärken.

Der Einfluss der verwendeten Annahmen auf den Sicherheitsfaktor wird in Tabelle 1 zusammengefasst. Bei einer realistischen Belastungssituation (9 kNm, 23 °C) ergibt sich so ein großer Sicherheitsfaktor von ca. 4,4. Dies bestätigt, dass die Kunststoffschwelle für den Einsatz als sicherheitsrelevantes Bauteil ausreichend dimensioniert ist.

Tabelle 1: Einfluss der Last- und Temperaturbedingungen auf den berechneten Sicherheitsfaktor

| Temperatur | Bemessungsmoment | | |
|------------|------------------------------|--------|-------------------------------------|
| | 23 kNm | 15 kNm | 9 kNm |
| 55 °C | 1,1 (Worst-Case-Szenario) | 1,7 | 2,8 |
| 23 °C | 1,7 | 2,7 | 4,4 (realistische Lastsituation) |

Prüfkonzept zur Qualitätssicherung

Im Gegensatz zur Zulassungprüfung muss die Qualitätssicherung nicht zwangsläufig an der Schwelle erfolgen. Es ist möglich, Probekörper aus der Schwelle zu entnehmen und einem Einpunkt-Ermüdungsversuch bei definierter Oberspannung bis zu max. 2 Mio. Lastspiele zu unterziehen. Versagt der Probekörper bei $\sigma_{zul}(N_{max})$ vor der vorgesehenen Lastspielzahl N_{max} ist der Test nicht bestanden (vgl. Abbildung 17).

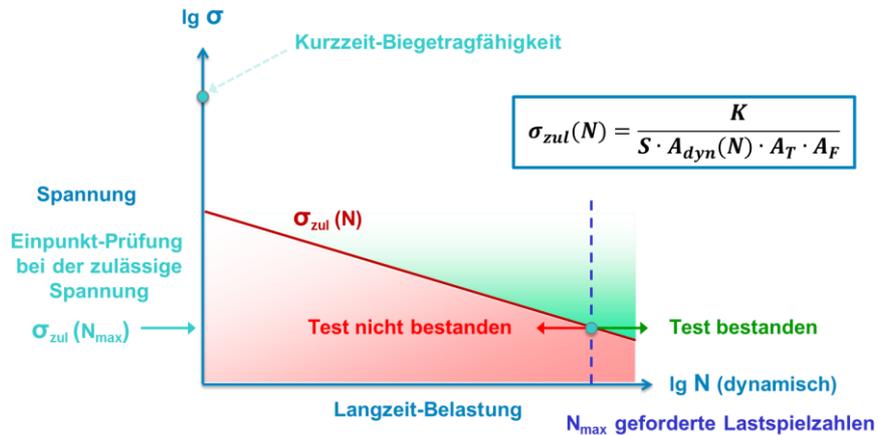


Abbildung 17: Prinzip eines Einpunkt-Ermüdungsversuchs für die Qualitätssicherung

Zwar ist die Materialprüfung günstiger und einfacher durchzuführen als die Versuche im Großprüfstand an der ganzen Schwelle, die Prüfzeit für 2 Mio. Zyklen ist aber bei 5 Hz nahezu 5 Tage, was für eine produktionsbegleitende Prüfung nicht sinnvoll ist. Daher wird die lastspielzahlabhängige zulässige Spannung $\sigma_{zul}(N)$ eingesetzt, um die Versuche bei höherer Belastung, dafür aber kleineren Lastspielzahlen durchzuführen (vgl. Abbildung 18). Diese beschleunigten Versuche sind dadurch deutlich kürzer (z. B. nur 5,5 Stunden bei $N = 10^5$ bzw. 1 Stunde bei $N = 2 \cdot 10^4$).

Die Vorgehensweise mit Einpunkt-Versuchen ist nur gültig, wenn für ein Referenzmaterial die komplette Wöhlerkurve mit ausreichenden Messpunkten ermittelt wurde. Für dies muss immer die Kurzzeit-Biegefestigkeit überprüft werden. Bei großen Unterschieden mit dem Referenzwert oder tiefgreifenden Änderungen der Rezeptur bzw. der Verarbeitungsbedin-

gungen sollten mehrere Ermüdungsversuche (zwischen 3 und 5) durchgeführt werden, um die Steigung der Wöhlerlinie zu überprüfen.

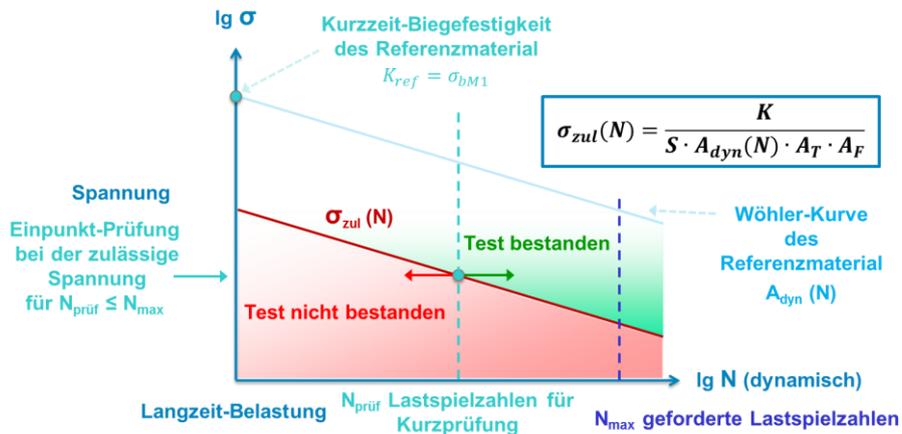


Abbildung 18: Prinzip eines beschleunigten Ermüdungsversuchs für die Qualitätssicherung

Die Anwendbarkeit des entwickelten Prüfkonzepts wurde mit drei verschiedenen Compounds, die am SKZ hergestellt wurden, überprüft. Der erste Compound wurde mit derselben Rezeptur wie beim Referenzmaterial von PAV hergestellt. Für die weiteren zwei Compounds wurde auf ein anderes Grundmaterial (ebenfalls PE-Recyklate) mit unterschiedlicher Stabilisierung zurückgegriffen. Abbildung 19 zeigt, dass alle drei Materialien einen beschleunigten Einpunkt-Ermüdungsversuch bei $\sigma_{zul}(3 \cdot 10^5) = 28,5 \text{ MPa}$ ohne Versagen bestehen. Daher sind alle drei Materialien für eine Kunststoffschwelle grundsätzlich geeignet.

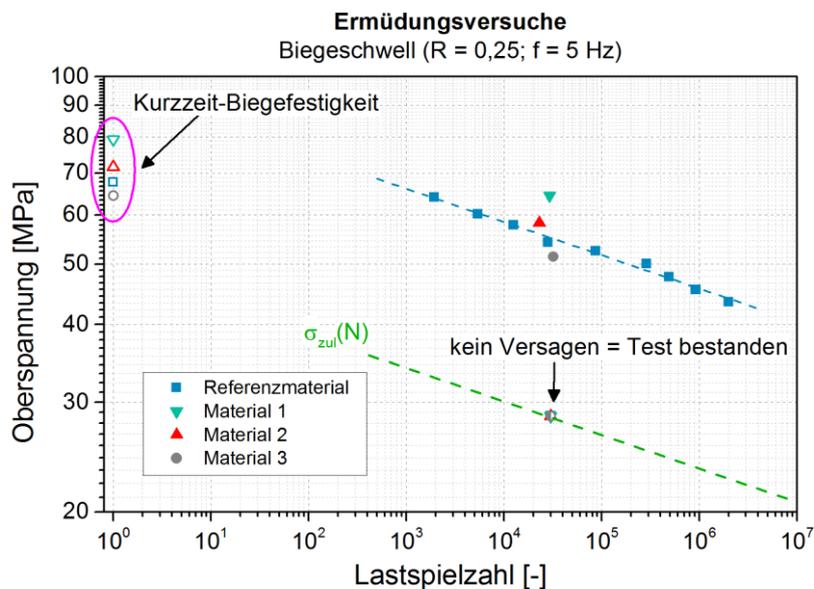


Abbildung 19: Beschleunigte Ermüdungsversuche für drei verschiedene Compounds

Die deutlichen Unterschiede in der Kurzzeit-Biegefestigkeit lassen jedoch vermuten, dass die Materialien sich auch in der Ermüdungsfestigkeit unterscheiden können. Auf Basis von Ermüdungsversuchen bei 28,5 MPa könnte dies nur mit sehr langen Prüfzeiten überprüft werden. Daher wurde für jedes Material die Oberspannung sukzessiv erhöht bis ein Versagen bei ca. $3 \cdot 10^5$ Lastspiele auftritt. Die in Abbildung 19 dargestellte Verteilung der Ermüdungsfestigkeit ist mit der Kurzzeit-Biegefestigkeit qualitativ vergleichbar.

Aufgrund der Verwendung von unterschiedlichen Grundmaterialien wurde die Steigung der Wöhlerlinien untersucht. Dabei wurden pro Material jeweils zwei weitere Ermüdungsversuche bei erhöhter Oberspannung durchgeführt. Die Ergebnisse werden zur besseren Vergleichbarkeit nicht gegen die absolute Oberspannung sondern in Bezug auf das relative Lastniveau (im Prozent der jeweiligen Kurzzeit-Biegefestigkeit) aufgetragen (Abbildung 20). Damit lassen sich kaum Unterschiede in dem Ermüdungsverhalten der Compounds feststellen, alle drei Materialien verhalten sich qualitativ ähnlich wie das Referenzmaterial.

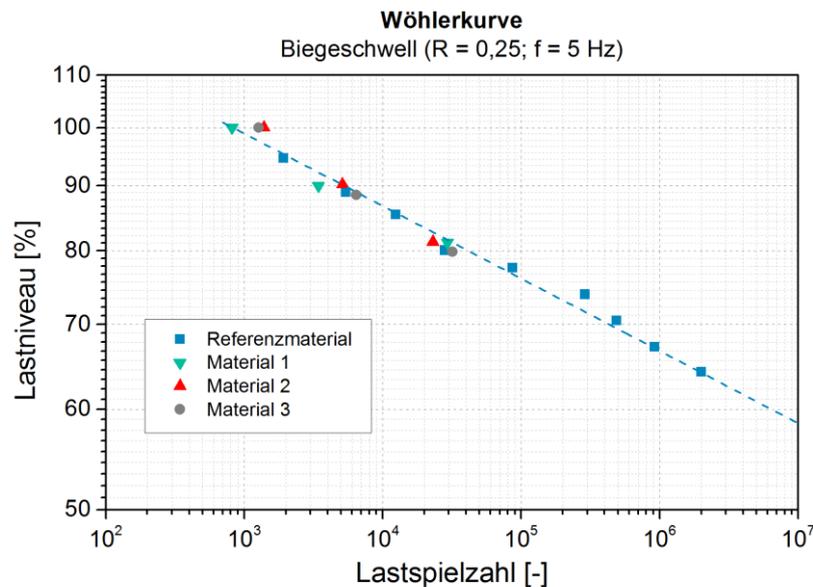


Abbildung 20: Vergleich der Steigung der Wöhlerkurven für die drei Compounds
(Das Lastniveau wird im Prozent der jeweiligen Kurzzeit-Biegefestigkeit ausgedrückt)

2.2.3 Gegenüberstellung Ziele und Ergebnisse

Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung eines kunststoffgerechten Labor-Prüfverfahrens zur Qualitätssicherung der Kunststoffschwellen. Auf Basis von Prüfungen an der ganzen Schwelle konnte gezeigt werden, dass die Anforderungen für Betonschwellen auf Kunststoffschwellen nicht direkt übertragen werden können. Durch den Vergleich mit den Holzschwellen, welche die Kunststoffschwellen ersetzen sollen, wurden neue und materialkonforme Anforderungen definiert. Das Ermüdungsverhalten des von PAV eingesetzten Materials wurde an kleinen Probekörpern eingehend untersucht. Anhand der Versuche wurden Referenzwerte für die produktionsbegleitende Überwachung der Qualität definiert. Daraus wurde ein Prüfkonzept auf Basis von Kurzzeit-Biegeversuchen und Einpunkt-Ermüdungsversuchen abgeleitet und erprobt. Unter Berücksichtigung der Referenz-Wöhlerkurve können diese Ermüdungsversuche beschleunigt werden, indem sie bei erhöhter Last durchgeführt werden. Ein Festigkeitsnachweis zum Einsatz des Materials für die Bahnschwellen bezieht sich dabei auf die lastspielzahlabhängige zulässige Spannung. Für die Sicherung einer konstanten Qualität ist ein Vergleich relativ zur Kurzzeit-Festigkeit meist aussagenkräftiger. Bei großen Unterschieden im Kurzzeit-Verhalten können die Ermüdungsversuche für 3 bis 5 Lastniveaus wiederholt werden, um mögliche Unterschiede zu erkennen, welche bei einem Einpunkt-Versuch ggf. nicht auffallen würden. Das Ziel des Arbeitspakets wurde somit vollständig erreicht.

2.2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Arbeitspaket wurde das wissenschaftliche und technische Personal wie geplant eingesetzt.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes haben sich nach der Bewilligung des Vorhabens die Voraussetzungen für die Fremdleistung "Großprüfstandversuche" aufgrund von neuen Gesprächen mit dem Eisenbahn-Bundesamt (EBA) geändert. Zur Festlegung der Anforderungen an die Kunststoffschwellen waren tiefgehende Kenntnisse zur Einbau- und Betriebs-situation von Schienensystemen erforderlich, welche über das prüftechnische bzw. kunststofftechnische Know-how des SKZ hinausgingen. Deshalb wurde ein Teil der Leistung durch das Ingenieurbüro Dr. Plica Ingenieure in Form von direkter Beratung erbracht. Das Gesamtbudget wurde zwischen den zwei Fremdleistern Technische Universität München und Dr. Plica Ingenieure aufgeteilt. Der Projektträger Jülich wurde über diese Änderung rechtzeitig informiert.

Das Lehrstuhl & Prüfamts für Verkehrswegebau der TU München wurde mit der Prüfung von Schwellen im Großprüfstand beauftragt, welche am SKZ nicht möglich waren. Diese Bauteilprüfung sollte einen quantitativen Vergleich zwischen Beton-, Holz- und Kunststoffschwelle hinsichtlich des Biegemoments liefern, um die Übertragbarkeit der Anforderungen aus der Prüfnorm für Betonschwellen auf die Prüfung von Kunststoffschwellen zu bewerten. Die Ergebnisse standen erst ab Juni 2015 in endgültiger Fassung (Versuchsbericht Nr. 3245 vom 29.05.2015) zur Verfügung. Aufgrund von teilweisen ungeeigneten Prüfbedingungen, war jedoch ein Teil der Ergebnisse für das geförderte Projekt nicht verwertbar. Da dies insbesondere die Betonschwelle betraf, welche das Referenzbauteil für den durchzuführenden Vergleich darstellt, war das Gesamtziel der Untersuchungen gefährdet.

In Absprache mit dem Projektpartner, Fa. PAV Recyclate GmbH & Co KG wurde daher bei dem Projektträger Jülich eine kostenneutrale Verlängerung um 6 Monate beantragt, welche auch genehmigt wurde. Im Zeitraum zwischen Juli und Dezember 2015 wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl & Prüfamts für Verkehrswegebau sowie dem im Projekt beratend tätigen Ingenieurbüro Dr. Plica Ingenieure die fachliche Klärung der Sachlage betrieben. Diese gestaltete sich langwierig, da die beauftragten Versuche nicht normiert waren und für den Lehrstuhl & Prüfamts für Verkehrswegebau ein Novum darstellte. Nach intensiven Gesprächen konnte Anfang Januar 2016 eine Einigung zwischen dem SKZ und der TU München erzielt werden. Damit wurden ein Teil der Versuche an der Betonschwelle wiederholt, nachdem die Probleme mit der Krümmung der Auflagefläche, welche zu einem fehlerhaften Wert des Biegemoments bei der ersten Durchführung geführt hatte, aufwändig behoben wurden. Somit wurde das Ziel der Bauteilprüfung erreicht.

2.3 AP5 Vergleichende Ökobilanz

2.3.1 Verwendung der Zuwendung

In diesem Arbeitspaket wurde die von PAV entwickelte RPT[®]-Rezyklatschwelle (im Folgenden RPT-Schwelle) im Rahmen einer Ökobilanz in Anlehnung an ISO 14040 / 14044 [DIN EN ISO 14040 (2009), DIN EN ISO 14044 (2006)] verschiedenen Produktalternativen gegenüber gestellt, um die ökologische Vorteilhaftigkeit zu untersuchen. Als Grundlage diente eine aktuelle Studie, die Holz-, Beton- und Stahlschwellen vergleichend bewertet [Werner (2009)]. Diese Basis wurde aktualisiert und um einen Vergleich mit der RPT-Schwelle und einer Kunststoffschwelle auf Basis von glasfaserverstärktem Polyurethan (PU-GF-Schwelle) erweitert.

Dazu wurde zunächst der Untersuchungsrahmen festgelegt. Dieser muss eine möglichst gute Vergleichbarkeit der verschiedenen Bahnschwellen gewährleisten.

Daran anschließend wurden eine umfangreiche Literatur- und Datenrecherche durchgeführt sowie Daten zur Herstellung der RPT-Schwelle ermittelt, um umfassende und genaue Sachbilanzdaten aller Bahnschwellen zu erhalten.

Anschließend erfolgte die Modellierung des Lebenszyklus der Bahnschwellen sowie verschiedener Szenarien zur Optimierung und Entsorgung bzw. Verwertung. Dazu wurde die im SKZ vorhandene Ökobilanz-Software GaBi 7 verwendet [Thinkstep (2015)]. Hintergrunddaten wurden den ebenfalls zur Verfügung stehenden Datenbanken GaBi Professional 6 [Thinkstep (2015)] und Ecoinvent 2.2 [Ecoinvent (2010)] entnommen.

Anhand der erstellten Modelle wurde die Umweltwirkungsabschätzung für die verschiedenen Bahnschwellen und Szenarien durchgeführt, die Ergebnisse interpretiert und Schlussfolgerungen abgeleitet.

2.3.2 Erzielte Ergebnisse

Beim ökobilanziellen Vergleich sollen die folgenden Bahnschwellensysteme (Länge 2,60 Meter, ohne Aufdoppelung) für ein gerades, einspuriges Gleis miteinander verglichen werden:

Tabelle 2: Betrachtete Produktsysteme

| Bahnschwelle | Kurzbeschreibung |
|---------------------|--|
| Holzschwelle | aktuell eingesetzte Gleisschwelle aus Buche oder Eiche, paritätischer Mix |
| Betonschwelle | aktuell eingesetzte Gleisschwelle aus Frischbeton |
| PU-GF-Schwelle | Kunststoffschwelle auf der Basis von Polyurethan und Glasfasern |
| RPT-Schwelle | von PAV entwickelte Kunststoffschwelle auf der Basis von recyceltem Polyethylen (PE-Rezyklat) und Glasfasern |

Die Stahlschwelle wird in die Ökobilanz nicht mit einbezogen, da diese nur zu einem sehr geringen Anteil im deutschen Schienennetz eingesetzt wird. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Bahnschwellen zu erreichen, wurde die funktionelle Einheit wie folgt definiert:

„Eine Gleisschwelle, inkl. Befestigungsmaterial, und anteiliger Aufbau eines zweigleisigen Gleisbettes (Länge 63 cm), über 100 Jahre, bezogen auf die mittlere Einsatzdauer der Schwelle“.

Liegedauer

Die Liegedauer ist ein wichtiger Parameter für die Ökobilanz von Bahnschwellen. Tabelle 3 zeigt die angenommenen Liegedauern sowie die zusätzlich betrachteten Szenarien für eine längere oder kürzere Liegedauer.

Tabelle 3: Angenommene mittlere Liegedauer und Szenarien

| Bahnschwelle | Mittlere Liegedauer | Quelle | Szenarien (Jahre) |
|----------------|---------------------|------------------------|-------------------|
| Holzschwelle | 30 Jahre | Werner (2009) | |
| Betonschwelle | 35 Jahre | Werner (2009) | |
| PU-GF-Schwelle | 50 Jahre | Plasticker-News (2008) | 35, 70 |
| RPT-Schwelle | 50 Jahre | | 35, 70 |

Definition der Systemgrenzen

Die Systemgrenzen wurden mittels dem Cut-Off-Ansatz festgelegt [Klöpffer, Grahl (2007)]. Demnach wurden die folgenden Lebenszyklusphasen berücksichtigt:

- Rohstoffbereitstellung, Transport der Rohstoffe für die Bahnschwelle
- Herstellung der Bahnschwelle
- Rohstoffbereitstellung, Transport der Rohstoffe für das Befestigungsmaterial wie Schrauben, Muttern usw.
- Herstellung des Befestigungsmaterials
- Transport der Bahnschwelle und des Befestigungsmaterials zur Baustelle (Einbauort)
- Verlegung und Einbau der Bahnschwelle
- Betrieb der Bahnschwelle über die Nutzungsdauer
- Gleisumbau, Austausch der Bahnschwelle und Wartung des Gleisbettes
- Wiederverwendung des Schotter und Gutschrift
- Rückbau der Bahnschwelle nach der Nutzungsdauer
- Transport von Schwelle und Befestigungsmaterial zum Lager bzw. zur Entsorgungs- und Verwertungsstelle

Die Entsorgung bzw. Verwertung der Abfälle von Bahnschwelle und Befestigungsmaterial wurde zunächst nicht mit einbezogen. Die Systemgrenzen sind in Abbildung 21 dargestellt.

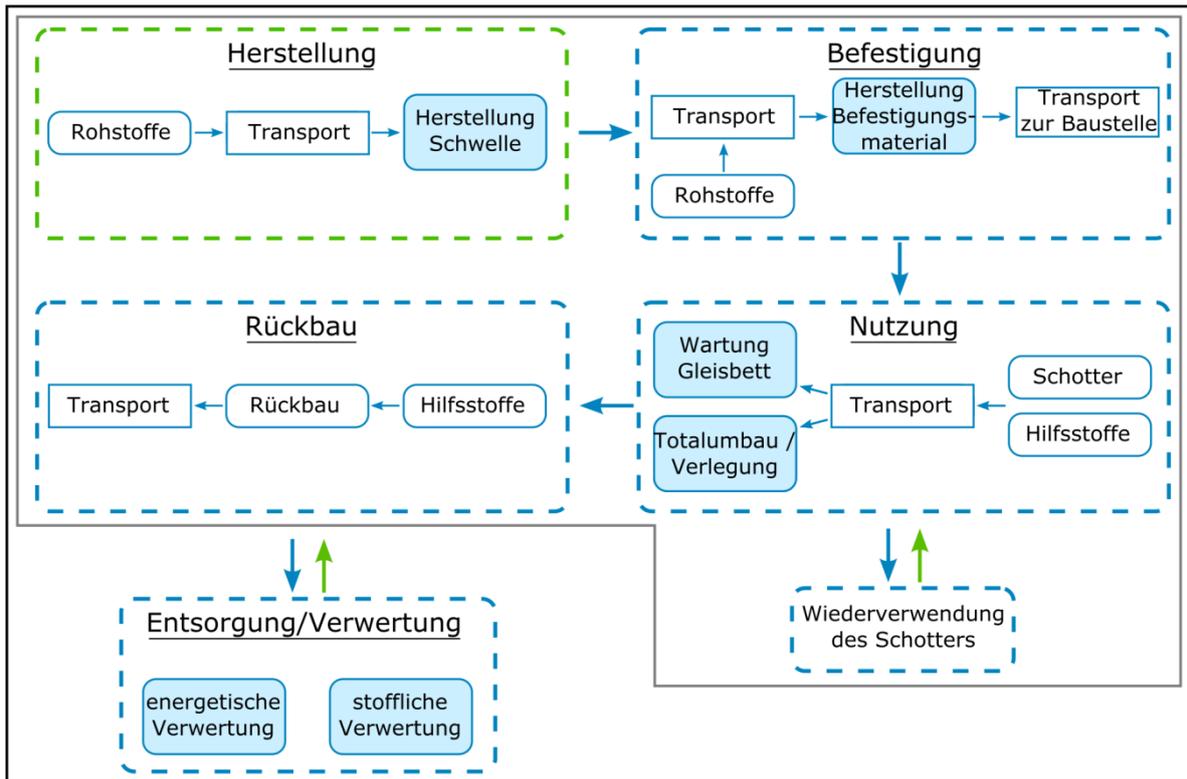


Abbildung 21: Gewählte Systemgrenzen bei Cut-Off (grauer Rahmen) und mit Systemerweiterung (schwarzer Rahmen). Aus der Wiederverwendung des Schotters und der Entsorgung / Verwertung ergeben sich Gutschriften (grüne Pfeile). Die Herstellung (grüner Rahmen) wird zusätzlich detaillierter betrachtet.

Um zusätzlich eine Aussage über die Auswirkungen der Entsorgung bzw. Verwertung treffen zu können, wurden in Szenarien zusätzlich die folgenden Prozesse berücksichtigt (Systemerweiterung):

- Abfallbehandlung (Lebenswegende) der Bahnschwelle und des Befestigungsmaterials mittels stofflicher oder energetischer Verwertung
- Gutschriften durch die Produktion von thermischer und elektrischer Energie oder Sekundärrohstoffen bei der Verwertung

Die verschiedenen Möglichkeiten der Verwertung der Schwellen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 4: Verschiedene Verwertungsmöglichkeiten der Bahnschwellen

| Schwelle | Energetische Verwertung | | Stoffliche Verwertung | |
|----------|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|--|
| | Holzfeuerung* (ohne / mit KWK) | MVA | Ersatzbrennstoff in Zementwerk | werkstoffliche Verwertung (Recycling) |
| Holz | X | | | |
| Beton | | | | X |
| PU-GF | | X | X | X |
| RPT | | X | X | X |

* in dafür zugelassenen Verbrennungsanlagen

Wirkungskategorien

Für die Wirkungsabschätzung, d.h. die Bewertung der Emissionen und Verbrauchsdaten der Sachbilanz entsprechend der Charakterisierungsfaktoren der einzelnen Umweltwirkungskategorien, wurden die Charakterisierungsfaktoren CML-IA Version 4.2 vom April 2013 verwendet [CML (2001)]. Die Umweltwirkungskategorien sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Ausgewählte Umweltwirkungskategorien der CML Baseline Methode

| Umweltwirkungskategorie | Beschreibung |
|--|--|
| Abiotischer Ressourcenverbrauch elementar (ADPe, in kg Sb-Äqv.) | Verbrauch abiotischer (z. B. mineralischer) Ressourcen |
| Eutrophierungspotential (EP, in kg Phosphat-Äqv.) | Nährstoffeintrag (v.a. Phosphate) in Gewässer oder Boden |
| Humantoxizitätspotenzial (HTP, in kg 1,4-DCB-Äqv.) | potentielle Beeinträchtigung der menschliche Gesundheit aufgrund toxischer Wirkungen einiger chemischer Substanzen |
| Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP, in kg Ethen-Äqv.) | Veränderung der Ozonkonzentration auf Bodenhöhe (sog. Sommersmog) durch z.B. Stickoxide |
| Treibhauspotential über 100 Jahre (GWP, in kg CO ₂ -Äqv.) | Einfluss auf das Klima durch die Emission von klimawirksamen Stoffen wie Kohlendioxid (CO ₂) oder Methan (CH ₄) über einen Zeithorizont von 100 Jahren |
| Versauerungspotential (AP, in kg SO ₂ -Äqv.) | Veränderung des pH-Werts des Bodens durch den Eintrag von z.B. Stickoxiden, Ammoniak, Schwefeldioxid |
| Ozonzerstörungspotential (ODP, in kg R11-Äqv.) | Abbau der Ozonschicht durch die Freisetzung von z. B. FCKW |

Daneben erfolgt eine Auswertung der folgenden Sachbilanzindikatoren:

- Verbrauch an nicht-erneuerbarer Primärenergie (PENRT, in MJ)
- Verbrauch an erneuerbarer Primärenergie (PERT, in MJ)
- Frischwasserverbrauch durch Zu- und Abflüsse in bzw. aus Fluss-, See- und Grundwasser (Wasser, in l)

Datensammlung und Modellierung

Die Daten für die Modellierung der Sachbilanz wurden den folgenden Quellen entnommen:

- Studie von Werner (2009): beruht auf Angaben von Herstellern und Netzbetreibern und wurde einer kritische Prüfung unterzogen
- Daten von PAV aus der Produktion: Herstellung der RPT-Schwelle
- Literaturdaten: Herstellung der PU-GF-Schwelle [Hischier (2007), LFU (2011), Song et al. (2009)], Aufbereitung des PE-Rezyklats [Franklin (2010)], Entsorgung bzw. Verwertung der Beton- [BTU (2010)], der PU-GF- und der RPT-Schwelle

Für die Herstellung der RPT-Schwelle und die Aufbereitung der Produktionsabfälle wurden die in Tabelle 6 bzw. Tabelle 7 gezeigten Sachbilanzdaten ermittelt. Für die Transportentfernung der Glasfasern wurde angenommen, dass diese entsprechend der jeweiligen Produktionsmenge anteilig aus Asien, Nordamerika und Europa stammen.

Tabelle 6: Sachbilanzdaten für die Herstellung der RPT-Schwelle

| Input | Einheit | Menge | Transport (km) | Transportmittel |
|--------------------------------|----------------|--------------|-----------------------|------------------------|
| Glasfasern | kg | 42 | 12524 / 630 | Schiff / LKW |
| PE-Rezyklat | kg | 108 | 500 | LKW |
| Produktionsabfall, aufbereitet | kg | 7,5 | 75 | LKW |
| Wasser | m ³ | 0,026 | | |
| Strom | MJ | 251 | | |
| Output | Einheit | Menge | Transport (km) | Transportmittel |
| Schwelle | Stück | 1 | | |
| Produktionsabfall | kg | 7,5 | | |

Tabelle 7: Sachbilanzdaten für die Aufbereitung der Produktionsabfälle

| Input | Einheit | Menge | Transport (km) | Transportmittel |
|--------------------------------|----------------|--------------|-----------------------|------------------------|
| Produktionsabfall | kg | 7,5 | 75 | LKW |
| Strom | MJ | 2,48 | | |
| Output | Einheit | Menge | Transport (km) | Transportmittel |
| Produktionsabfall, aufbereitet | kg | 7,5 | | |

Wirkungsabschätzung Herstellung der RPT-Schwelle

Für die Herstellung der RPT-Schwelle ergeben sich die folgenden Ergebnisse:

- Das PE-Rezyklat ist in der Wirkungskategorien ODP für 96 % der Auswirkungen verantwortlich. In den übrigen Wirkungskategorien (außer ADPe) liegt dessen Anteil bei 7 bis 28 %.
- Die Glasfasern haben in den meisten Wirkungskategorien den größten Anteil an den Umweltwirkungen. Bei ADPe, POCP und AP liegt der Anteil jeweils bei über 50 %. Bei ADPe sind die Glasfasern sogar für über 99 % der Umweltwirkungen verantwortlich. In den übrigen Wirkungskategorien (außer ODP) verursachen die Glasfasern 31 bis 46 % der Umweltwirkungen.
- Die Produktion der RPT-Schwelle, v.a. der Stromverbrauch, verursachen bei EP mit 39 % den größten Anteil an den Umweltwirkungen. Bei HTP und AP liegt der Anteil bei 12 bzw. 29 %, in den übrigen Wirkungskategorien bei höchstens 8 %.

- Der Transport hat bei PERT mit 39 % den größten Anteil. Bei HTP, GWP, PENRT und PERT liegt der Anteil jeweils bei 25 bis 29 %, bei EP und POCP bei etwa 12 %. In den Wirkungskategorien ADPe, AP und ODP beträgt der Anteil 0,3 bis 8 %.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 22 dargestellt.

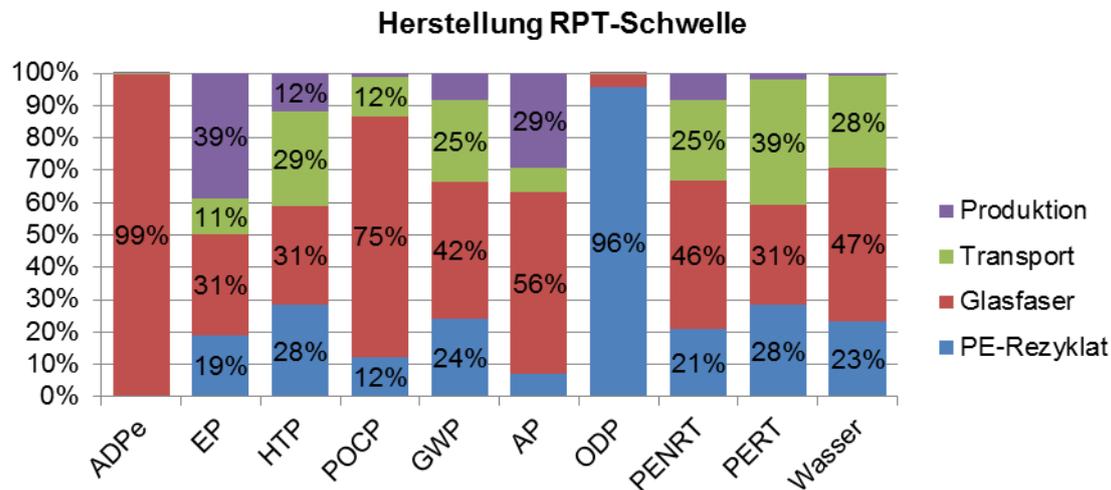


Abbildung 22: Relative Umweltwirkungen für die Herstellung der RPT-Schwelle.

Lebenszyklus RPT-Schwelle ohne Entsorgung (Cut-Off)

Die Auswertung erfolgt bezogen auf die Lebenszyklusphasen der Herstellung, der Befestigung, der Nutzung, des Rückbaus und der Entsorgung.

Die Ergebnisse zum Lebenszyklus der RPT-Schwelle zeigen:

- Die Herstellung hat einen Anteil von über 50 % bei ADPe, GWP, AP, PENRT und PERT, bei den übrigen Wirkungskategorien liegt der Anteil bei über 30 % (außer HTP und ODP).
- Die Befestigung hat einen geringen Anteil, dieser liegt für ADPe bei 12 % und für POCP bei 10 %, ansonsten unter 10 %.
- Die Nutzungsphase (v.a. Schotter) hat einen Anteil von mehr als 50% bei EP, HTP, POCP, ODP und Wasser. Bei ODP liegt der Anteil sogar bei 96 %. Ansonsten liegt der Anteil der Nutzung bei etwa 30 bis 40 % (Ausnahme ADPe).
- Die Umweltwirkungen durch den Rückbau können vernachlässigt werden.

Abbildung 23 zeigt die relativen Umweltwirkungen der einzelnen Lebenszyklusphasen.

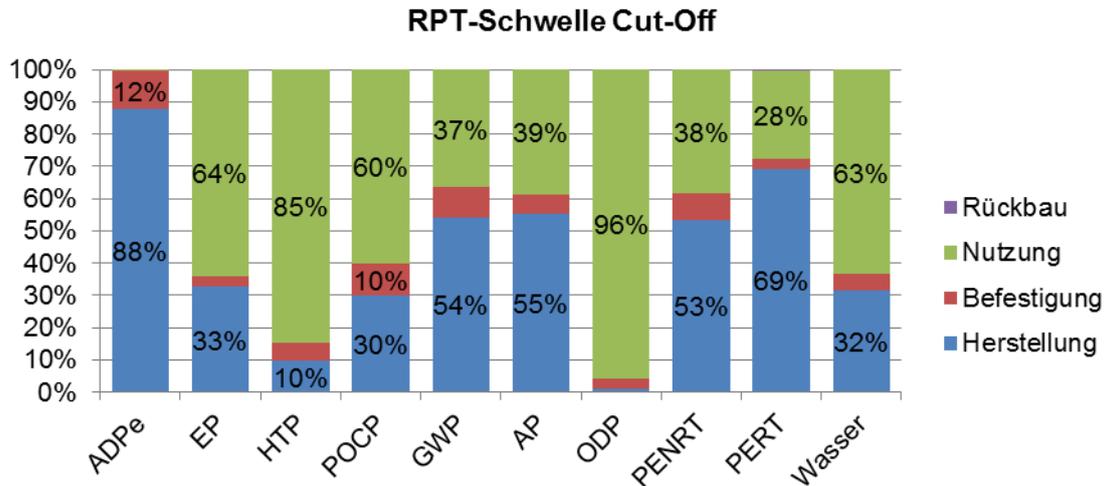


Abbildung 23: Relative Umweltwirkungen der einzelnen Lebenszyklusphasen

Lebenszyklus RPT-Schwelle mit Entsorgung bzw. Verwertung

Im Folgenden wird die Entsorgung der RPT-Schwelle in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) mit Erzeugung von Strom und Wärme und Substitution der entsprechenden Energiemengen aus Erdgasverbrennung angenommen. In diesem Fall ergeben sich die folgenden Veränderungen in den Umweltwirkungen:

- Es zeigt sich eine Zunahme der Umweltwirkungen bei GWP, ODP und Wasser von ca. 13 bis 34 %.
- Ein Rückgang der Umweltwirkungen resultiert bei ADPe, EP, HTP, POCP und AP um 6 bis 24 %.
- Der Primärenergiebedarf (PENRT und PERT) der übrigen Phasen wird durch Substitution zum großen Teil kompensiert (-64 bis -73 %).

Die Veränderungen der Umweltwirkungen sind in Abbildung 24 grafisch dargestellt.

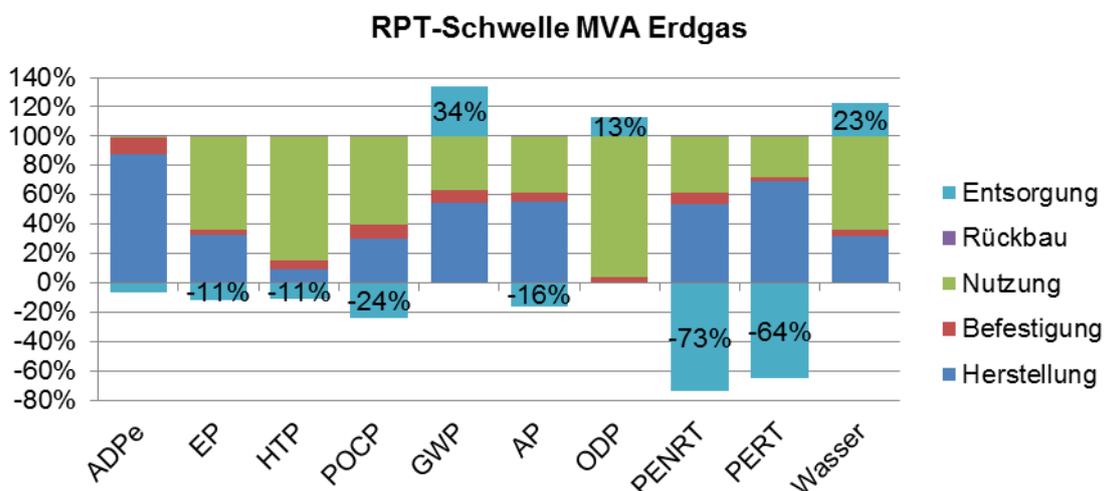


Abbildung 24: Relative Umweltwirkungen der Lebenszyklusphasen bei Entsorgung in einer MVA mit Substitution von Strom und Wärme aus Erdgas

Im Fall der Aufbereitung der Bahnschwelle zu Ersatzbrennstoff (EBS) für ein Zementwerk ergeben sich die folgenden Veränderungen (exemplarisch für Substitution von Steinkohle):

- Die Umweltwirkungen nehmen bei ODP, PERT und Wasser um 6 bis 19 % zu.
- Der Verbrauch nicht-erneuerbarer Primärenergie (PENRT) der übrigen Phasen wird durch Substitution von Steinkohle fast vollständig kompensiert (-93 %).
- Es ergibt sich ein Rückgang bei den anderen Wirkungskategorien um bis zu 9 %.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 dargestellt.

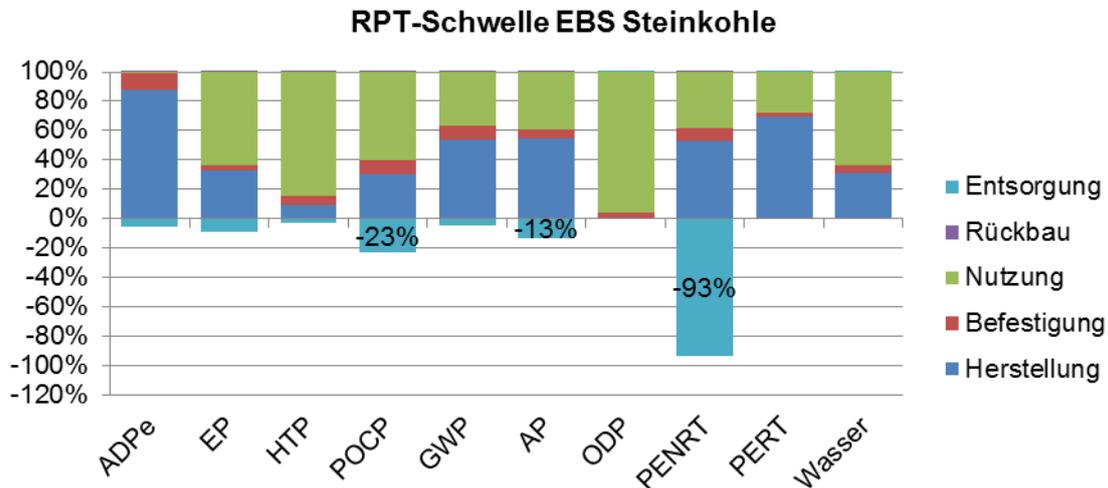


Abbildung 25: Relative Umweltwirkungen der Lebenszyklusphasen bei Entsorgung als EBS im Zementwerk mit Substitution von Steinkohle

Zuletzt wird der Fall einer werkstofflichen Verwertung der RPT-Schwelle betrachtet. Dadurch ändern sich die Umweltwirkungen wie folgt:

- Bei ODP ergibt sich ein leichter Anstieg um 8 %.
- Die Umweltwirkungen gehen in allen anderen Wirkungskategorien zurück.
- Der Rückgang ist bei ADPe, POCP, GWP, AP, PENRT und PERT mit -22 bis -47 % am größten.

Diese Variante der Entsorgung / Verwertung zeigt tendenzielle die geringsten Umweltwirkungen bzw. größten Vorteile. Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse in grafischer Form.

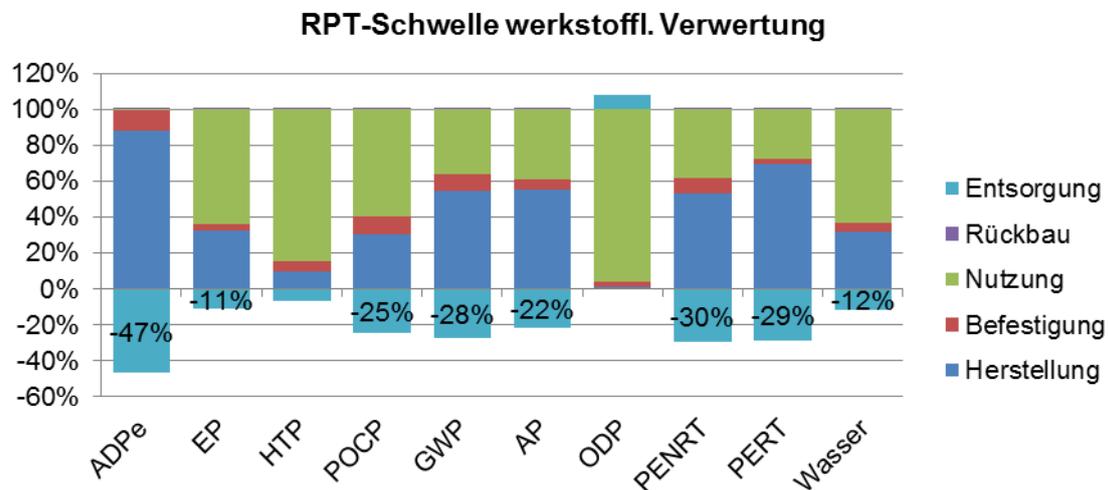


Abbildung 26: Relative Umweltwirkungen der Lebenszyklusphasen bei werkstofflicher Verwertung (Recycling)

Szenarien

Um Optimierungspotentiale aufzuzeigen, werden hier exemplarisch die Ergebnisse der folgenden Szenarien gezeigt:

- Ökostrom: Bezug von Ökostrom anstelle des konventionellen Strommix bei der Herstellung.
- Masse -10 %: Reduzierung der Masse der Bahnschwelle um 10 % durch Optimierung der Geometrie.
- GF -10%: Reduzierung des Glasfaseranteils um 10 %

Abbildung 27 zeigt den Vergleich dieser Szenarien mit dem Basisszenario.

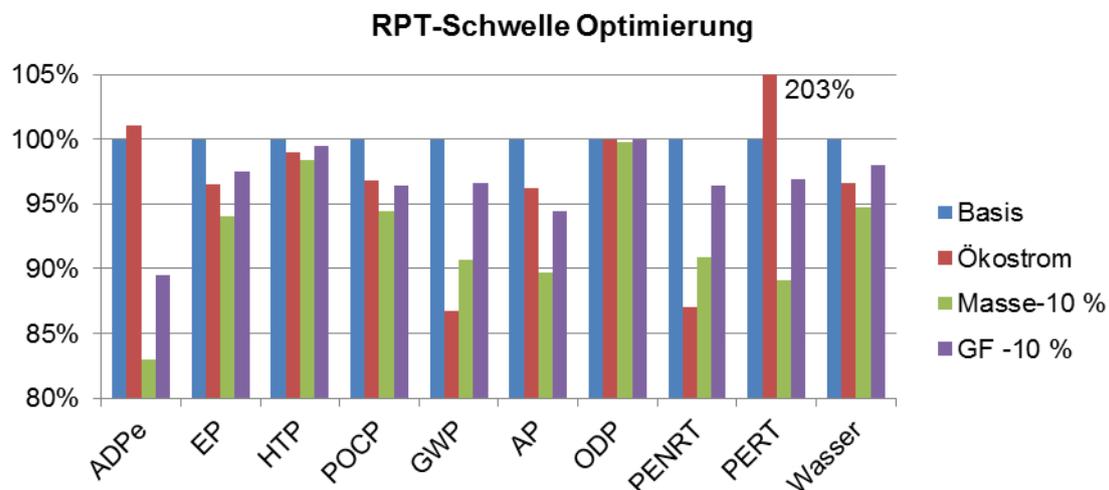


Abbildung 27: Vergleich der Umweltwirkungen ausgewählter Szenarien zur Optimierung der RPT-Schwelle mit dem Basisszenario (100%).

Schlussfolgerungen zur Ökobilanz der RPT-Schwelle

Für die RPT-Schwelle ergeben sich aus der Ökobilanz die folgenden Erkenntnisse:

- Die Lebenszyklusphasen der Herstellung und der Nutzung dominieren die Umweltwirkungen der RPT-Schwelle über den gesamten Lebenszyklus.
- Die Umweltwirkungen bei der Herstellung resultieren zu einem großen Teil aus den eingesetzten Glasfasern. Daneben haben auch das PE-Rezyklat, Transporte sowie die eigentliche Produktion der Bahnschwelle in einzelnen Wirkungskategorien große Anteile.
- Durch eine Optimierung des Produktionsprozesse bzw. der Produkteigenschaften lassen sich die Umweltwirkungen der RPT-Schwelle teilweise deutlich reduzieren. Durch einen geringeren Materialbedarf oder eine Reduzierung des Glasfaseranteils kann in allen Wirkungskategorien eine deutliche Verbesserung der Ökobilanz-ergebnisse realisiert werden.

Vergleich mit den übrigen Bahnschwellen im Basisszenario (Cut-Off)

Im Folgenden soll die RPT-Schwelle den übrigen Bahnschwellen gegenübergestellt werden. Dazu wird für alle betrachteten Bahnschwellen zunächst das Basisszenario herangezogen, als der Cut-Off ohne Berücksichtigung einer Entsorgung bzw. Verwertung. Es ergeben sich die folgenden Resultate:

- Die Holzschwelle zeigt in den Wirkungskategorien HTP, POCP und PERT die größten und in den Kategorien ADPe und GWP die geringsten Umweltwirkungen. Durch den im Holz gebundenen Kohlenstoff ergibt sich für GWP ein negativer Wert.
- Die Betonschwelle verursacht bei EP, POCP, AP, PENRT, PERT und Wasser die geringsten Umweltwirkungen.
- Die PU-GF-Schwelle ist bei ADPe, GWP, AP, ODP, PENRT und Wasser für die größten Umweltwirkungen verantwortlich.
- Die RPT-Schwelle verursacht bei HTP und ODP die geringsten Auswirkungen. Bei EP und POCP sind die Umweltwirkungen größer als für die Betonschwelle, bei ADPe, GWP und AP, PENRT und Wasser größer als für die Holz- und Betonschwelle und bei PERT größer als für die Beton- und PU-GF-Schwelle.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 28 grafisch dargestellt.

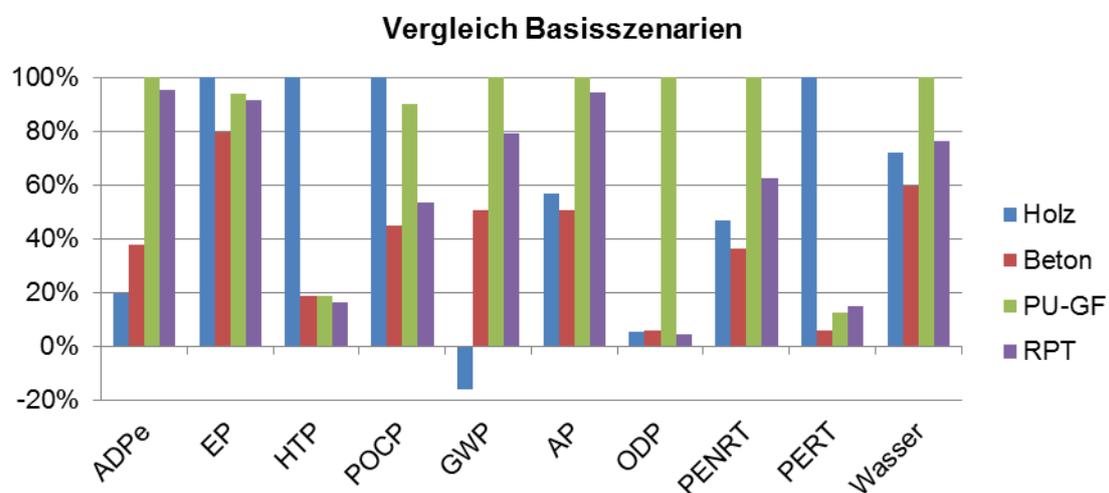


Abbildung 28: Vergleich der Umweltwirkungen im Basisszenario. Die Balken sind normiert auf den größten Wert innerhalb der jeweiligen Wirkungskategorie.

Einfluss der Liegedauer

Hier soll der Einfluss einer kürzeren oder längeren Liegedauer der beiden Kunststoffschwelle untersucht werden.

Bei einer kürzeren Liegedauer der Kunststoffschwelle von lediglich 35 Jahren nehmen deren Umweltwirkungen deutlich zu. Wie Abbildung 28 zeigt, verursacht die PU-GF-Schwelle nun bei EP und POCP eine größere Umweltwirkung als die Holzschwelle. Damit zeigt die PU-GF-Schwelle in 8 der 10 Wirkungskategorien die größte Umweltwirkung.

Die RPT-Schwelle bedingt bei kürzerer Lebensdauer eine größere Umweltwirkung bei EP und ODP als die Holzschwelle und schneidet bei HTP und ODP schlechter ab als die Betonschwelle.

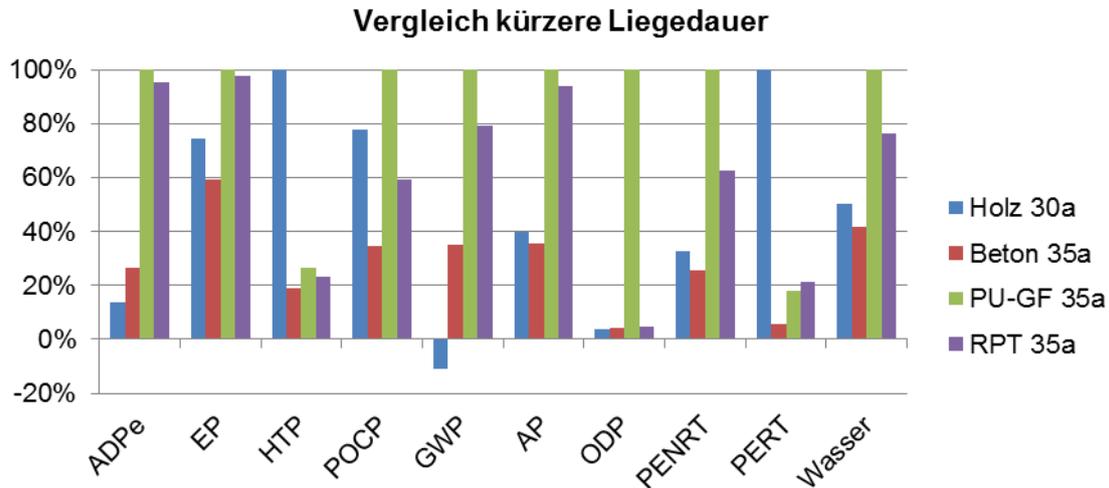


Abbildung 29: Vergleich der Umweltwirkungen bei kürzerer Liegedauer der Kunststoffschwelle. Die Normierung erfolgt analog zu Abbildung 28.

Bei einer längeren Liegedauer der Kunststoffschwellen von 70 Jahren gehen deren Umweltwirkungen zurück. So verursacht die PU-GF-Schwelle nun bei EP und HTP geringere Umweltwirkungen als die Betonschwelle und bei Wasser liegt sie bei einem ähnlichen Wert wie die Holzschwelle.

Die Umweltwirkungen der RPT-Schwelle sind nun zusätzlich für EP, POCP und Wasser am geringsten. Bei PENRT ist der Wert der RPT-Schwelle etwas geringer als der Wert der Holzschwelle. Damit bedingt die RPT-Schwelle in 6 der 10 Wirkungskategorien die geringsten Umweltwirkungen.

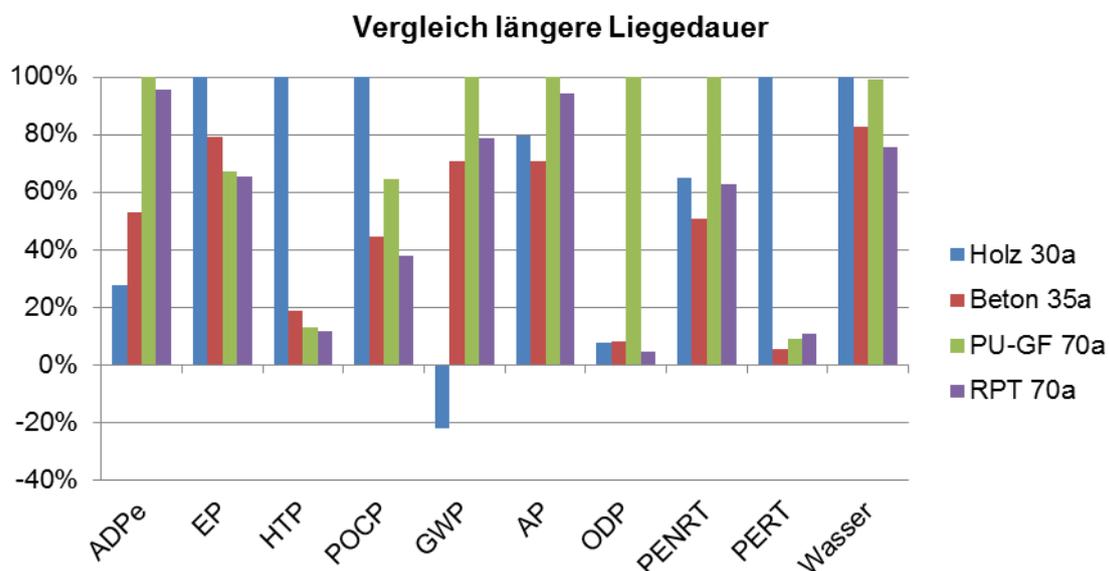


Abbildung 30: Vergleich der Umweltwirkungen bei längerer Liegedauer der Kunststoffschwelle. Die Normierung erfolgt analog zu Abbildung 28.

Vergleich mit Entsorgung / Verwertung

In diesem Abschnitt soll durch einen Vergleich ausgewählter Szenarien die Auswirkung der Entsorgung der Schwellen untersucht werden. Dazu werden aus den Verwertungsmöglichkeiten in Tabelle 4 die folgenden Szenarien ausgewählt, die jeweils die beste verfügbare Technologie darstellen:

| Schwelle | Szenario |
|----------|---------------------------------------|
| Holz | Holzfeuerung mit KWK |
| Beton | innovative Nassaufbereitung |
| PU-GF | werkstoffliche Verwertung (Recycling) |
| RPT | werkstoffliche Verwertung (Recycling) |

Der Vergleich dieser Szenarien ergibt:

- Durch die Verwertung werden die Umweltwirkungen der Holzschwelle vor allem in den Wirkungskategorien ADPe und PENRT stark reduziert. Dagegen zeigt sich bei EP, HTP, GWP und ODP ein leichter Anstieg. Die Holzschwelle bedingt nun bei ADPe, GWP und PENRT die geringsten Umweltwirkungen. Durch die Substitution fossiler Brennstoffe bei Verbrennung mit Kraft-Wärme-Kopplung sind die Werte bei GWP und PENRT negativ. In den Wirkungskategorien EP, HTP, POCP und PERT hat die Holzschwelle dagegen die größten Auswirkungen.
- Die Aufbereitung der Betonschwelle zu Beton-Rezyklat verursacht bei ODP und PERT einen geringen Anstieg der Umweltwirkungen. In den übrigen Wirkungskategorien sinken die Werte dagegen um bis zu 20 %. Die Betonschwelle verursacht dadurch in der Wirkungskategorie PERT die geringsten Auswirkungen.
- Durch das Recycling werden die Umweltwirkungen der PU-GF-Schwelle in allen Wirkungskategorien um 13 bis 54 % reduziert. Sie hat jedoch weiterhin in den Wirkungskategorien GWP, ODP, PENRT und Wasser die größten Auswirkungen. Bei ADPe und AP ist das Ergebnis ähnlich dem der RPT-Schwelle.
- Die Umweltwirkungen der RPT-Schwelle werden durch das Recycling in fast allen Wirkungskategorien um 7 bis 47 % reduziert. Lediglich bei ODP ergibt sich ein Anstieg um 8 %. Die RPT-Schwelle hat damit bei HTP und ODP die geringsten Umweltwirkungen.

Die folgende Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse in grafischer Form.

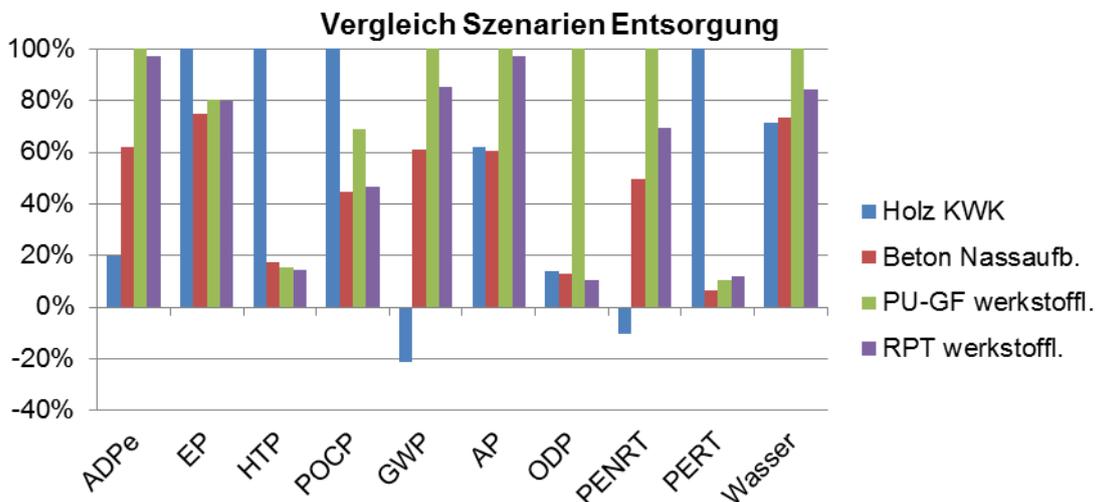


Abbildung 31: Vergleich der Umweltwirkungen mit Entsorgung / Verwertung und Gutschriften für substituierte Brenn- und Rohstoffe. Die Normierung erfolgt analog zu Abbildung 28.

Hier sollen die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen werden.

Schlussfolgerungen aus dem Vergleich der Bahnschwellen

Der Vergleich der Bahnschwellen im Fall ohne die Entsorgung bzw. Verwertung der Schwellen lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Holzschwelle erzielt durch den gebundenen Kohlenstoff in der Wirkungskategorie GWP ein vorteilhaftes Ergebnis. Der regenerative Rohstoff Holz bedingt zudem bei ADPe deutlich geringere Auswirkungen als bei den übrigen Schwellen. Andererseits ist dadurch das Ergebnis bei PERT sehr hoch.
- In insgesamt vier Wirkungskategorien ist die Holzschwelle für die größten Umweltwirkungen verantwortlich. Der Unterschied ist insbesondere in der Wirkungskategorie HTP sehr groß, was vor allem am verwendeten Imprägnieröl liegt.
- Die Betonschwelle hat in den meisten Wirkungskategorien etwas geringere Auswirkungen als die RPT-Schwelle, lediglich bei HTP und ODP zeigt sie größere Auswirkungen.
- Die PU-GF-Schwelle hat in sechs von zehn Wirkungskategorien die größten Umweltwirkungen. Im Vergleich mit der RPT-Schwelle sind die Werte der PU-GF-Schwelle in fast allen Wirkungskategorien größer. Die größere Auswirkung der RPT-Schwelle bei PERT lässt sich mit dem relativ großen Anteil an Ökostrom im deutschen Strommix erklären.
- Die RPT-Schwelle zeigt in den Wirkungskategorien HTP und ODP die geringsten Auswirkungen. Dies liegt vor allem am Sekundärrohstoff PE-Rezyklat. Andererseits sind die Umweltwirkungen v. a. bei ADPe und GWP größer als bei der Holz- und der Betonschwelle,. Gegenüber der PU-GF-Schwelle sind die Umweltwirkungen der RPT-Schwelle in fast allen Wirkungskategorien (außer PERT) geringer.
- Für die RPT-Schwelle ist es daher wichtig, dass die angenommene Liegedauer von etwa 50 Jahren erreicht wird. Die Reduzierung der Liegedauer auf 35 Jahre resultiert teilweise in einer deutlichen Zunahme der Umweltwirkungen gegenüber der Holzschwelle und der Betonschwelle.
- Gleichzeitig besteht aber auch das Potential, die Umweltwirkungen der RPT-Schwelle durch eine möglicherweise längere Lebensdauer zu reduzieren.
- Die Schlussfolgerungen zur Lebensdauer gelten in gleicher Weise auch für die PU-GF-Schwelle.

Berücksichtigt man zusätzlich die Entsorgung bzw. Verwertung der Bahnschwellen, dann lässt sich schlussfolgern:

- Durch die Einbeziehung der Entsorgung bzw. Verwertung der Bahnschwellen wird der komplette Lebenszyklus betrachtet und es werden keine Lasten auf Prozesse außerhalb der Systemgrenzen verlagert.
- Die Ergebnisse der Bahnschwellen verbessern sich in den meisten Wirkungskategorien. Dies ist auf die Substitution von Brenn- und Rohstoffen und die damit angerechneten Gutschriften zurück zu führen.

- Die geeignete Entsorgung bzw. Verwertung erweist sich somit als eine weitere wesentliche Lebenszyklusphase einer Bahnschwelle.
- Die Ergebnisse der RPT-Schwelle zeigen, dass sich die Umweltwirkungen durch eine werkstoffliche Verwertung (Recycling) in fast allen Wirkungskategorien um bis zu 50 % reduzieren lassen (Ausnahme ODP). Aber auch eine energetische Verwertung ist aufgrund des hohen Brennwertes des PE-Materials mit Vorteilen verbunden, indem auch hier Umweltwirkungen in den meisten Wirkungskategorien absinken.
- Bei werkstofflicher Verwertung der RPT-Schwelle verbessern sich deren Ergebnisse relativ zur Holzschwelle und zur Betonschwelle. In ähnlicher Weise gilt dies auch für die PU-GF-Schwelle.

2.3.3 Gegenüberstellung Ziele und Ergebnisse

Für die RPT-Schwelle sind aufgrund der Herstellung aus Recycling-Kunststoffen ökologische Vorteile im Vergleich mit marktüblichen oder konkurrierenden Bahnschwellen zu erwarten. Um die Bahnschwellen im Hinblick auf ihre Umweltwirkungen vergleichen zu können, bedurfte es einer vergleichenden Ökobilanz. Die Ermittlung der Umweltwirkungen der Holz-, Beton-, PU-GF- und RPT-Schwelle über den gesamten Lebenszyklus mittels einer solchen Ökobilanz war das Ziel von AP 5.

Die vergleichende Ökobilanz der Holz-, Beton-, PU-GF- und RPT-Schwelle wurde wie vorgesehen durchgeführt. Dazu wurden ein geeigneter Untersuchungsrahmen definiert, Sachbilanzdaten für die Material- und Energiebilanz ermittelt, der Lebenszyklus in einer Ökobilanz-Software modelliert und die Umweltwirkungen mittels einschlägiger Methoden zur Umweltwirkungsabschätzung ermittelt.

Die bisherigen Ökobilanzergebnisse der RPT-Schwelle zeigen, dass sie etwas größere Umweltwirkungen verursacht als die Betonschwelle. Der Vergleich der RPT-Schwelle mit der Holzschwelle liefert kein eindeutiges Ergebnis. Im Vergleich der RPT-Schwelle mit der PU-GF-Schwelle zeigt die RPT-Schwelle dagegen zumeist geringere Umweltwirkungen.

Die oben genannten Verbesserungspotentiale durch Optimierungen, z.B. bei der Herstellung, bei dem Materialeinsatz und bei dem Glasanteil, können zukünftig noch zu deutlichen Veränderungen der Ökobilanzergebnisse zu Gunsten der RPT-Schwelle führen.

Insgesamt ergibt sich für die neu entwickelte RPT-Schwelle, dass sie auf Basis der gezeigten Ergebnisse und einer Reihe von Optimierungspotentialen potentiell ein ökologisch vorteilhafter Ersatz für die Kreosot-getränkten Holzschwellen ist. Der Einsatz eines Sekundärrohstoffs, PE-Rezyklat, führt dazu, dass sie erheblich geringere Umweltwirkungen aufweist als die PU-GF-Schwelle aus neuem Material.

2.3.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Arbeitspaket wurde das wissenschaftliche und technische Personal wie geplant eingesetzt.

3 Ergebnisse von dritter Seite

Im Bewilligungszeitraum sind keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Forschungsvorhabens relevant sind.

4 Verwertung der Ergebnisse

Die am SKZ erzielten Ergebnisse können nach dem Vorhaben durch PAV direkt umgesetzt werden. Zum Beispiel werden die computergestützten Simulationen zur Durchsatzoptimierung unmittelbar angewendet, um die Werkzeugauslegung für die Serienfertigung effizient mit stark reduziertem Versuchsaufwand zu realisieren. Auch die Untersuchungen zum Prüfkonzept können vom Projektpartner direkt eingesetzt werden, um die Qualität der Bahnschwellen fertigungsbegleitend zu überwachen. Die vergleichende Ökobilanz kann in der Markteinführungsphase zur Verbesserung der Akzeptanz beitragen, indem die Vorteile der Kunststoffschwelle hervorgehoben werden.

Aus den Ergebnissen wurden zusätzlich mehrere Optimierungsvorschläge erarbeitet, welche durch Anpassung des Fertigungsprozesses zu einer zusätzlichen Verbesserung der Effizienz sowie Reduzierung der Umweltwirkungen führen können. Diese Ergebnisse bieten daher die Grundlage für die mittelfristige Entwicklung einer zweiten Generation von Kunststoffschwellen mit verbesserten Eigenschaften. Durch die optimierte Zugabe der Glasfaser können zum Beispiel vergleichbare mechanische Eigenschaften bei reduziertem Faseranteil erreicht werden. Die Anwendung von geschäumten Schwellen und die Anpassung der Schwellengeometrie infolge einer Bauteildimensionierung erlauben den Materialeinsatz deutlich zu reduzieren und gleichzeitig die Effizienz des Prozesses zu verstärken. Damit können die Vorteile der Kunststoffschwelle zukünftig noch gesteigert werden.

Die im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse zur Lastsituation im Gleis und zum Verhalten unterschiedlicher Schwellentypen erlauben auch der Zulassungsbehörde (EBA) und den Endkunde (z. B. DB) die Anforderungen an einer Kunststoffschwelle besser zu definieren und materialkonforme Prüfungen für die Zulassung und Bewertung der Schwellen vorzuschreiben. Daher sollen diese Erkenntnisse in die aktuell laufende internationale Normungsarbeit übertragen werden.

5 Veröffentlichungen

Die Ergebnisse der vergleichenden Ökobilanz wurden 2015 durch Frau Hartl (SKZ) bei dem *1st International Composites Congress (ICC)* in Stuttgart mit einer Präsentation zum Thema "Nachhaltigkeit von faserverstärkten Bahnschwellen aus Recycling-Kunststoff" vorgestellt.

Weitere Veröffentlichungen sind in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern geplant und werden durch PAV koordiniert.

6 Literaturverzeichnis

| | |
|-------------------------|---|
| BTU (2010) | BTU Brandenburgische Technische Universität Cottbus: Ökologische Prozessbetrachtung RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), 2010 |
| CML (2001) | Centre of Environmental Science – Leiden University (CML): Life cycle assessment - An operational guide to the ISO standards, 2001 |
| DIN EN ISO 14040 (2009) | DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2009-11. |
| DIN EN ISO 14044 (2006) | DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz – Anforderungen und Anleitung (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006- |
| Ecoinvent (2010) | Ecoinvent Association: Ecoinvent Database 2.2, 2010 |
| Ehrenstein (207) | Ehrenstein, G.W.: <i>Mit Kunststoffen konstruieren</i> , Carl Hanser Verlag, München, 3. Auflage 2007 |
| Erhard (2008) | Erhard, G.: <i>Konstruieren mit Kunststoffen</i> , Carl Hanser Verlag, München, 4. Auflage 2008 |
| Franklin (2010) | Franklin Associates (Hrsg.): <i>Life Cycle Inventory of 100% postconsumer HDPE and PET recycled Resin from postconsumer Containers and Packaging</i> , 2010 |
| Hischier (2007) | Hischier, R.: Life Cycle Inventories of Plastics. Final report ecoinvent data v2.0 No. 11 Part II. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. 2007 |
| LFU (2011) | Bayrisches Landesamt für Umwelt (LFU): Infoblatt Bahnschwellen, 2011 |
| Klöpffer, Grahl (2007) | Klöpffer, W., Grahl B.: <i>Ökobilanz LCA) – Ein Leitfaden für die Ausbildung und Beruf</i> , Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, 2007 |
| Martens (2006) | Martens, S.: Simulierte Strömung – Reduzierung der Einfahrkosten beim Extrudieren, <i>Plastverarbeiter</i> , 28-29, Februar 2006 |
| Michaeli (1995) | Michaeli, W.; Brinkmann, T.; Lessenich-Henkys, V.: <i>Kunststoff-Bauteile werkstoffgerecht konstruieren</i> , Carl Hanser Verlag, München, 1995 |
| Plasticker-News (2008) | Plasticker-News: Bayer MaterialScience: Polyurethan-Bahnschwellen im CHEMPARK Leverkusen, 2008 |
| Song et al. (2009) | Song Y., Youn J., Gutowski T.: Life cycle energy analysis of fibre reinforced composites, 2009 |
| Thinkstep (2015) | Thinkstep AG: GaBi Software and GaBi Database, 2015 |
| Werner (2009) | Werner, F.: Ökologische Bilanzierung von Eisenbahnschwellen, im Auftrag der Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau e.V., unveröffentlicht, 2009 |

Berichtsblatt

| | |
|---|--|
| 1. ISBN oder ISSN | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Veröffentlichung (Publikation) |
| 3. Titel Schlussbericht zum KMU-innovativ-Verbundvorhaben Ressourceneffizienz: RPT-Bahnschwelle; SKZ Prüfmethode-Extrusionsverfahrens-Entwicklung-Ökobilanz - Teilvorhaben 2 | |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Achereiner, Frédéric Rudloff, Johannes Werner, Jan | 5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.01.2016 |
| | 6. Veröffentlichungsdatum 31.10.2016 |
| | 7. Form der Publikation Schlussbericht |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) SKZ - KFE gGmbH | 9. Ber.-Nr. Durchführende Institution |
| | 10. Förderkennzeichen 033RK007B |
| | 11. Seitenzahl 38 |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMBF | 13. Literaturangaben 17 |
| | 14. Tabellen 7 |
| | 15. Abbildungen 31 |
| 16. Zusätzliche Angaben | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) | |
| 18. Kurzfassung Bahnschwellen aus Holz müssen zum Schutz mit dem Teeröl-Abfallprodukt Kreosot imprägniert werden. Dieses umweltschädliche Produkt wird im Verlauf der Lebensdauer zum Teil an die Natur abgegeben. Aufgrund der geänderten EU-Biozidrichtlinie steht daher die Holzschwelle vor dem Aus. Europaweit besteht das Bestreben ab 2018 alternative Materialien für Bahnschwellen einzusetzen. Durch die Entwicklung einer Bahnschwelle aus Kunststoff-Recyklat hat der Projektpartner PAV GmbH & Co. KG die Grundlage für ein ressourceneffizientes Produktdesign gelegt. Die RPT®-Bahnschwelle stellt ein innovatives Recyclingkonzept mit einer hochwertigen Langzeitanwendung dar und bietet gleichzeitig eine Lösung, um die umweltschädlichen Holzschwellen zu ersetzen. Darüber hinaus wurde zur Qualitätssicherung ein geeignetes Prüfkonzept entwickelt. Dafür wurden die bahntechnischen Anforderungen an eine Kunststoffschwelle durch Versuche im Großprüfstand genauer definiert. Neben einer Bewertung der Qualität erlauben die Untersuchungen zur werkstoffgerechten Prüfung der Kunststoffschwellen auch die Effizienz des Produktdesigns zu evaluieren und liefern nützliche Hinweise für zukünftige Verbesserung der Bauteilauslegung. Schließlich wurde mit einer vergleichenden Ökobilanz unterschiedlicher Bahnschwellen die aktuelle wettbewerbsfähige Umweltleistung der RPT®-Bahnschwelle in den relevanten Umweltwirkungskategorien detailliert analysiert. Darüber hinaus wurden Optimierungspotentiale in den Lebenszyklusphasen ermittelt, welche die ökologischen Vorteile der RPT®-Bahnschwelle zukünftig noch deutlich verbessern könnten. | |
| 19. Schlagwörter Bahnschwelle, Kunststoff-Recyklat, Extrusion, Ermüdung, Qualitätssicherung, vergleichende Ökobilanz | |
| 20. Verlag | 21. Preis |

Entwurf