

# **Verhalten von Geokunststoffbewehrungen unter zyklischer Beanspruchung**

Von der Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau  
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg  
genehmigte

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor Ingenieur

Dr.-Ing.

vorgelegt

von Dipl.-Ing. (FH) Jan Retzlaff  
geboren am 23. September 1971 in Schwerin

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Klapperich, Freiberg  
Prof. Dr.-Ing. J. Müller-Rochholz, Münster  
Dr. rer. nat. M. Böhning, Berlin

Tag der Verleihung: 30. November 2007



## Vorwort

Angeregt durch Diskussionen des Arbeitskreises 5.2 „Berechnung und Dimensionierung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen“ der DGGT in dem Herr Prof. Dr.-Ing. Klapperich und Herr Prof. Dr.-Ing. Müller-Rochholz mitarbeiten, ist die Idee zu der nun vorliegenden Arbeit entstanden. Da sich beide mit ihren unterschiedlichen Forschungsschwerpunkten zur Betreuung dieser Arbeit bereit erklärt haben, war eine intensive Bearbeitung der Thematik aus baugrunddynamischer und baustoffkundlicher Sicht möglich. Mein besonderer Dank gilt beiden Professoren für Ihre immerwährende Gesprächsbereitschaft und die vielen nützlichen Anregungen zur Konzeption und während der Umsetzung.

Dass Herr Dr. Böhning ein Koreferat übernahm, hat mich nicht nur hinsichtlich der Polymertechnik in dieser Arbeit gefreut.

Die Arbeit ist als Teil eines Industrieforschungsprojektes entstanden. Für die finanzielle Unterstützung und für das damit entgegengebrachte Vertrauen bedanke ich mich. Der Kreis der beteiligten europäischen Unternehmen geht weit über die Hersteller der hier erwähnten Geokunststoffe hinaus.

Rückblickend wäre diese Arbeit nicht ohne die Hilfe, Rücksichtnahme und Motivation vieler Wegbegleiter möglich gewesen. Besonders danken möchte ich Herrn Dr. Wilmers, der mir die Geokunststoffe auf seine ganz persönliche Weise näher gebracht hat. Herrn Dipl.-Ing. Recker danke ich für seine Unterstützung mit der Messtechnik des Instituts für textile Bau- und Umwelttechnik sowie die vielen kleinen Hinweise am Rande der Arbeit und Herrn Fenneker für sein Engagement bei den Laborarbeiten. Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Kreyenschmidt und Herrn Prof. Dr. Lorenz sowie deren Mitarbeitern, insbesondere Herrn M.Sc. Sueck, für die Unterstützung bei den chemischen Analysen. An dieser Stelle danke ich auch Herrn Ing. Frits Elkind, der mir seinen nahezu unerschöpflichen Fundus an Literatur zugänglich gemacht hat und mich an seinen Erfahrungen zum Thema teilhaben ließ.

Meiner Frau Sabine danke ich herzlich für ihre Geduld und meiner Tochter Charlotte für die Pausenfüller sowie Sylke und Rainer Gerstner für den Anstoß Bauingenieur zu werden.

Jan Retzlaff



**Inhaltsverzeichnis**

Verzeichnis der Abbildungen .....	8
Verzeichnis der Gleichungen .....	12
Verzeichnis der Tabellen .....	13
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>15</b>
<b>2 Kenntnisstandsanalyse</b> .....	<b>19</b>
2.1 Vorbemerkungen .....	19
2.2 Geokunststoffe in Bodenkontakt und in In-Air-Versuchen .....	22
2.2.1 Kenntnisstand .....	22
2.2.2 Resümee .....	31
2.3 Einbeziehen anderer Einsatzgebiete polymerer Werkstoffe .....	36
2.3.1 Kenntnisstand .....	36
2.3.2 Resümee .....	43
2.4 Konventionelle Verfahren und Methoden zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von Werkstoffen .....	43
2.4.1 Vorbemerkungen .....	43
2.4.2 Wöhlerkurven .....	44
2.4.3 Smith-Diagramme .....	48
2.4.4 Haigh-Diagramme und Derivate .....	49
2.4.5 Weibull-Verteilung .....	51
2.5 Verfahren zur chemischen Analyse von Polymeren .....	53
2.5.1 Vorbemerkungen .....	53
2.5.2 IR-Spektroskopie .....	53
2.5.3 Differential Scanning Calorimetry (DSC) .....	56
2.5.3.1 Messprinzip .....	57
2.5.3.2 Übergangsbereiche .....	58
2.5.3.2.1 Glasübergangsbereich .....	58
2.5.3.2.2 Schmelzen .....	59
2.5.3.3 Einflussgrößen .....	60
2.5.3.3.1 Einwaagemenge .....	60
2.5.3.3.2 Heiz- und Kühlrate .....	61
<b>3 Eigene Untersuchungen</b> .....	<b>63</b>
3.1 Herleitung der zyklischen Beanspruchung der Geokunststoffe für die eigenen Versuche .....	63
3.1.1 Vorbemerkungen .....	63
3.1.2 Beanspruchungen aus Eisenbahnverkehr .....	69
3.1.2.1 Dynamisches Verhältnis R .....	69
3.1.2.2 Anzahl der Lastwechsel N .....	76
3.1.2.3 Zusammenfassung .....	77
3.1.3 Anwendung analytischer Verfahren zur Ermittlung der Beanspruchung von Geokunststoffen .....	78
3.1.3.1 Tragschichtbewehrung nach dem BKT – Verfahren .....	78
3.1.3.2 Bewehrte Stützkonstruktionen .....	81
3.2 Untersuchte Geokunststoffe .....	84
3.2.1 Vorbemerkungen .....	84
3.2.2 Strukturen der untersuchten Geokunststoffe .....	85
3.2.3 Polymere der untersuchten Geokunststoffe .....	86
3.2.3.1 Vorbemerkungen .....	86
3.2.3.2 Polyethylenterephthalat (PET) .....	87
3.2.3.3 Polypropylen (PP) .....	88

3.2.3.4	Polyethylen hoher Dichte (PEHD) .....	89
3.2.3.5	Eigenschaften der untersuchten Polymere .....	89
3.3	Eigene Laborversuche .....	91
3.3.1	Vorbemerkungen .....	91
3.3.2	Versuchseinrichtung .....	91
3.3.3	Versuchsdurchführung .....	94
3.3.4	Zeitabhängiges Zugkraft-Dehnungsverhalten der untersuchten Polymere.....	97
3.3.4.1	Vorbemerkungen.....	97
3.3.4.2	Modell für PET .....	98
3.3.4.3	Überlegungen zum Verhalten von Polyolefinen .....	100
3.3.4.4	Temperaturverhalten .....	106
3.3.5	Verfahren der chemischen Analytik zur Beurteilung der Morphologie der untersuchten Polymere nach zyklischer Beanspruchung .....	107
3.3.5.1	IR - Spektroskopie.....	107
3.3.5.2	DSC - Messungen .....	108
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Auswertung der eigenen Versuche .....</b>	<b>111</b>
4.1	Mechanische Beanspruchung der Geokunststoffe .....	111
4.1.1	Vorbemerkungen .....	111
4.1.2	Zugkraft-Dehnungsverhalten vor, während und nach den zyklischen Beanspruchungen.....	113
4.1.2.1	Zugkraft-Dehnungsverhalten von GG1-PET .....	113
4.1.2.2	Zugkraft-Dehnungsverhalten von GG2-PET .....	117
4.1.2.3	Zugkraft-Dehnungsverhalten von GG3-PP und GG4-PP .....	120
4.1.2.4	Zugkraft-Dehnungsverhalten von GG5-PE .....	124
4.1.3	Veränderungen des Zugkraft-Dehnungsverhalten während der zyklischen Beanspruchungen.....	128
4.1.3.1	Steifigkeitsentwicklung .....	128
4.1.3.2	Trainingseffekte.....	129
4.1.3.3	Einfluss der Lastwechsel auf die Steifigkeitsentwicklung .....	132
4.1.4	Untersuchungen zum Temperatureinfluss auf die Versuche .....	134
4.1.4.1	Vorbemerkungen.....	134
4.1.4.2	Raumklima .....	135
4.1.4.3	Probentemperatur .....	136
4.1.4.4	Temperaturverteilung an der Probenoberfläche .....	139
4.2	Chemische Analyse der Geokunststoffe.....	142
4.2.1	IR - Spektroskopie .....	142
4.2.1.1	Vorbemerkungen.....	142
4.2.1.2	IR-Spektren von GG2-PET .....	143
4.2.1.3	IR-Spektren von GG3-PP .....	144
4.2.1.4	IR – Spektren von GG5-PE .....	148
4.2.2	Differential Scanning Calorimetry (DSC) .....	149
4.2.2.1	Vorbemerkungen.....	149
4.2.2.2	Differential Scanning Calorimetry (DSC) von GG2-PET .....	150
4.2.2.3	Differential Scanning Calorimetry (DSC) von GG3-PP .....	153
4.2.2.4	Differential Scanning Calorimetry (DSC) von GG5-PE .....	157
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>161</b>
<b>6</b>	<b>Conclusions and Recommendations.....</b>	<b>165</b>
<b>7</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>169</b>
<b>8</b>	<b>Quellenverzeichnis .....</b>	<b>173</b>
8.1	Literaturverzeichnis .....	173
8.2	Normen und Vorschriften .....	185

---

<b>9</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>187</b>
<b>10</b>	<b>Verzeichnis der Variablen .....</b>	<b>189</b>
10.1	Große lateinische Buchstaben.....	189
10.2	Kleine lateinische Buchstaben.....	190
10.3	Große griechische Buchstaben.....	190
10.4	Kleine griechische Buchstaben.....	191

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1	Einteilung der Geokunststoffe nach [SAATHOFF-03].....	19
Abbildung 2	Nomenklatur sinusförmiger Beanspruchungen.....	20
Abbildung 3	Zeitverläufe dynamischer Lasten nach [FLESCH-93].....	22
Abbildung 4	Zyklische Zugversuche am breiten Streifen an einem PP-Geogitter [PERKINS-04].....	25
Abbildung 5	Beschreibung einer Hystereseschleife.....	27
Abbildung 6	Flächen $A_{hys} = A_{ur}$ der Hystereseschleifen eines gestreckten PEHD- Geogitters und eines gewebten PET-Geogitters aus [BATHURST-94].....	28
Abbildung 7	Hysteresesteifigkeit $\tan \alpha = J_{ur}$ eines gestreckten PE-HD-Geogitters und eines gewebten PET-Geogitters aus [BATHURST-94].....	28
Abbildung 8	Korrekturfaktor für die Umrechnung zahlenmäßiger in effektive Spannungen in Abhängigkeit von der Amplitude aus [BOSMAN-01] .....	38
Abbildung 9	Einteilung der mittels Röntgen- bzw. IR-Spektroskopie nachweisbaren Bereiche von PET nach [VÈVE-87].....	39
Abbildung 10	Schematische Analyse des charakteristischen Verlaufs der Zugkraft-Dehnungslinie von PET-Fasern nach [HEUVEL-92a]....	41
Abbildung 11	Modell für die Molekülstruktur von PET im Bereich B1.....	42
Abbildung 12	Modell für die Molekülstruktur von PET im Bereich B2.....	42
Abbildung 13	Modell für die Molekülstruktur von PET im Bereich B3.....	42
Abbildung 14	Beispiel einer Wöhlerkurve nach [RIECHLE-00].....	45
Abbildung 15	Wöhlerkurve für ein gewebtes PET – Geogitter aus [ZANZINGER-06].....	46
Abbildung 16	Beispiel eines vereinfachten Smith-Diagramms nach [HORNBOGEN-02] und [RIECHLE-00].....	48
Abbildung 17	Beispiel eines Haigh-Diagramms nach [WEIBULL-61].....	49
Abbildung 18	Haigh-Diagramm für einen glasfaserverstärkten Kunststoff aus [KENSCHKE-96].....	50
Abbildung 19	Weibull – Verteilung für eine Wöhlerlinie nach [KÜH-01].....	52
Abbildung 20	Elektromagnetisches Spektrum nach [GÜNZLER-03].....	54
Abbildung 21	Prinzipdarstellung einer DSC – Kurve und möglicher Effekte nach [EHRENSTEIN-03].....	57
Abbildung 22	Prinzip eines Wärmestrom-Differenzkalorimeters.....	58



Abbildung 23	Wellentypen: (a) Kompressions- oder P-Welle, (b) Scher- oder S-Welle, (c) Rayleigh- oder R-Welle aus [DGGT-02].....	65
Abbildung 24	Wellentypen an einer vertikal schwingenden Punktquelle aus [STUDER-97].....	67
Abbildung 25	Aufteilung der in den unendlichen Halbraum abgestrahlten Energie der drei Wellentypen aus [STUDER-97].....	67
Abbildung 26	Beispiel für eine Sohlbewehrung bei Dämmen auf gering tragfähigem Untergrund aus [GÖBEL-04].....	70
Abbildung 27	Beispiel für eine tief liegende Bewehrung über punkt- oder linienförmigen Traggliedern aus [GÖBEL-04].....	71
Abbildung 28	Beispiel für eine hoch liegende Bewehrung über punkt- oder linienförmigen Traggliedern aus [GÖBEL-04].....	72
Abbildung 29	Geometrie für Verformungsmodellierungen des Systems feste Fahrbahn aus [FRIEDRICH-03].....	73
Abbildung 30	Vertikale Verformungen in den gekennzeichneten Punkten des Systems in Abbildung 29 aus [FRIEDRICH-03].....	74
Abbildung 31	Extrapolierte Schubdehnungen $\epsilon_s$ von Sand.....	75
Abbildung 32	Zugbeanspruchung von Geokunststoffen in Abhängigkeit von der Tragschichtdicke nach Berechnungen mit dem BKT-Verfahren ...	79
Abbildung 33	Beanspruchungsniveaus aus Berechnungen nach dem BKT-Verfahren und zyklische Versuche mit $R = 0,66$ .....	80
Abbildung 34	Mit ReSlope 4.0 untersuchte Versagensmechanismen der gewählten bewehrten Stützkonstruktion.....	81
Abbildung 35	Unter-/Oberlast und dynamisches Verhältnis für die verschiedenen Höhenlagen der Bewehrung einer Stützkonstruktion .....	83
Abbildung 36	Terephthalsäure.....	87
Abbildung 37	Ethylenglykol.....	87
Abbildung 38	Grundstruktur von Polyethylenterephthalat (PET).....	87
Abbildung 39	Grundstruktur Polypropylen (PP).....	88
Abbildung 40	Grundstruktur Polyethylen (PE).....	89
Abbildung 41	Aufbau des Versuchsrahmens II.....	92
Abbildung 42	Befestigung des Dehnungsaufnehmers an GG4-PP.....	93
Abbildung 43	Entwicklung der Hystereseschleifen während der ersten $10^4$ Lastwechsel von GG4-PP.....	95
Abbildung 44	Abminderungsfaktor $A_1$ für einen Geokunststoff aus PET .....	98
Abbildung 45	Analyse der Zugkraft-Dehnungslinie der Referenz von GG1-PET99	

Abbildung 46	Beispielhafte Charakterisierung des Zugkraft-Dehnungsverhaltens eines Polyolefins anhand der Referenzkurve von GG4-PP.....	101
Abbildung 47	Scheinbarer und wahrer Verlauf der Zugspannungen in einem Schulterstab aus PA6.....	103
Abbildung 48	Schematische Darstellung einer Kriechkurve in Anlehnung an [COWIE-97].....	104
Abbildung 49	In 1000 – h – Versuch ermittelte Kriechkurven für GG4-PP.....	106
Abbildung 50	Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung von GG1-PET .....	114
Abbildung 51	Hystereseschleifen für GG1-PET .....	116
Abbildung 52	Detail Hysteresesekanten für GG1-PET .....	117
Abbildung 53	Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung von GG2-PET .....	118
Abbildung 54	Hystereseschleifen GG2-PET .....	119
Abbildung 55	Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung von GG3-PP .....	121
Abbildung 56	Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung von GG4-PP .....	121
Abbildung 57	Hystereseschleifen für GG3-PP.....	123
Abbildung 58	Hystereseschleifen für GG4-PP.....	124
Abbildung 59	Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung von GG5-PE .....	125
Abbildung 60	Hystereseschleifen für GG5-PE.....	126
Abbildung 61	Detail Hysteresesekanten für GG5-PE .....	127
Abbildung 62	Tatsächlicher Anstieg der Hysteresekurven .....	129
Abbildung 63	Relative Änderung des Anstiegs der Hysteresesekanten .....	130
Abbildung 64	Anstieg der Hysteresesekanten für PET .....	132
Abbildung 65	Anstieg der Hysteresesekanten für PP .....	133
Abbildung 66	Anstieg der Hysteresesekanten für PE.....	134
Abbildung 67	Temperatur T im Bereich der Versuchseinrichtungen (Raumklima). .....	135
Abbildung 68	Relative Feuchte $\Phi$ der Luft im Bereich der Versuchseinrichtung (Raumklima).....	136
Abbildung 69	Entwicklung der Proben temperatur am Beispiel von GG5-PE ...	137
Abbildung 70	Temperaturverlauf am Beispiel von GG4-PP .....	138
Abbildung 71	Temperaturverlauf am Beispiel von GG5-PE.....	138
Abbildung 72	Temperaturverteilung GG2-PET.....	139

---

Abbildung 73	Temperaturverteilung GG4-PP .....	140
Abbildung 74	Temperaturverteilung GG5-PE .....	140
Abbildung 75	GG5-PE mit doppelter Spannungsamplitude .....	141
Abbildung 76	GG1-PET kurz vor dem Bruch .....	142
Abbildung 77	IR-Spektren von GG2-PET .....	143
Abbildung 78	IR-Spektren von GG3-PP .....	145
Abbildung 79	Carbonylgruppe der Carbonylverbindungen .....	146
Abbildung 80	Keton in Bereich $\nu = 1695 \text{ cm}^{-1}$ bis $1660 \text{ cm}^{-1}$ .....	147
Abbildung 81	Ester in Bereich $\nu = 1750 \text{ cm}^{-1}$ bis $1735 \text{ cm}^{-1}$ .....	147
Abbildung 82	Aldehyd in Bereich $\nu = 1740 \text{ cm}^{-1}$ bis $1720 \text{ cm}^{-1}$ .....	147
Abbildung 83	IR-Spektren von GG5-PE .....	149
Abbildung 84	DSC-Referenzmessung für GG2-PET .....	152
Abbildung 85	DSC-Messung nach $N = 10^7$ Lastwechseln für GG2-PET .....	152
Abbildung 86	DSC-Referenzmessung von GG3-PP .....	156
Abbildung 87	DSC-Messung nach $10^7$ Lastwechseln GG3-PP .....	156
Abbildung 88	DSC-Referenzmessung von GG5-PE .....	158
Abbildung 89	DSC-Messung nach $10^7$ Lastwechseln GG5-PE .....	159

## Verzeichnis der Gleichungen

Gleichung 1	Definition des dynamischen Verhältnisses $R$ .....	21
Gleichung 2	Definition der Frequenz $f$ .....	21
Gleichung 3	Schadensakkumulation nach Coleman und Zhurkov aus [BOSMAN-01] .....	37
Gleichung 4	Lineare Palmgren-Miner-Regel .....	47
Gleichung 5	Grenzklinien der Spannungen im 1. Quadranten.....	49
Gleichung 6	Definition der Wellenzahl $v$ .....	55
Gleichung 7	Lichtgeschwindigkeit in einem mit Materie gefüllten Raum .....	55
Gleichung 8	Definition der Durchlässigkeit $D_{IR}$ .....	55
Gleichung 9	Enthalpieänderung .....	56
Gleichung 10	Einfluss von Masse und Heizrate .....	57
Gleichung 11	Ermittlung der Bemessungszugfestigkeit von Geokunststoffbewehrungen aus [DGGT-07].....	64
Gleichung 12	Ermittlung von Abminderungsfaktoren.....	64
Gleichung 13	Wellenlänge von Rayleigh- bzw. R – Wellen nach [BRÄU-03].....	66
Gleichung 14	Ermittlung des Gleitreibungswiderstandes.....	84
Gleichung 15	Ermittlung der für den Versuch relevanten Zugfestigkeit .....	97
Gleichung 16	Definition Poisson – Zahl $\mu$ .....	102
Gleichung 17	Mischungsregel für die Poisson – Zahl aus [SAECHTLING-01]..	102
Gleichung 18	Ermittlung der Kristallinität.....	150

**Verzeichnis der Tabellen**

Tabelle 1	Einteilung der Beanspruchungsarten nach [GOTSCHOL-02] .....	22
Tabelle 2	Zusammenfassung der an Geokunststoffen durchgeführten zyklischen Belastungsprüfungen.....	32
Tabelle 3	Mögliche Ursachen für Übergangsbereiche der DSC – Kurve .....	56
Tabelle 4	Energieverteilung nach Wellentypen.....	68
Tabelle 5	Dynamische Verhältnisse und ihre Ursachen .....	76
Tabelle 6	Zusammenfassung der Versuchsrandbedingungen.....	78
Tabelle 7	Bodenkennwerte für die analytischen Berechnungen .....	82
Tabelle 8	Beschreibung der untersuchten Geogitter-Elemente in MD .....	86
Tabelle 9	Ausgewählte Eigenschaften der untersuchten Polymere aus [SAECHTLING-01] und [EHRENSTEIN-03] .....	90
Tabelle 10	Randbedingungen für die Laborversuche .....	94
Tabelle 11	Versuchsparameter für DSC – Messungen.....	108
Tabelle 12	Messergebnisse für das Material GG1-PET.....	113
Tabelle 13	Messergebnisse für das Material GG2-PET.....	118
Tabelle 14	Messergebnisse für GG3-PP.....	120
Tabelle 15	Messergebnisse für GG4-PP.....	120
Tabelle 16	Messergebnisse für GG5-PE.....	125
Tabelle 17	Vergleich der Dehnungen aus den statischen Zugversuchen mit denen der Hystereseschleifen für GG2-PET .....	131
Tabelle 18	Auswertung der Schmelzenthalpie $\Delta H$ für GG2-PET .....	153
Tabelle 19	Auswertung der Schmelzenthalpien $\Delta H$ für GG3-PP .....	157
Tabelle 20	Auswertung der Schmelzenthalpie $\Delta H$ für GG5-PE .....	159



## 1 Einleitung

Die Arbeit ist als Teil der Forschungsaktivitäten des Instituts für Geotechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg zur Anwendung von Kunststoffen in der Geotechnik entstanden. Sie ist ein Baustein auf dem Weg zum besseren Verständnis der Wirkungsweise von Geokunststoffen. Abgeschlossene Arbeiten von [KLAPPERICH-06] und laufende Aktivitäten am Institut haben gezeigt, dass dem Konstruktionselement Geokunststoff als dem wesentlichen Bestandteil der Verbundkonstruktion Kunststoffbewehrte Erde (KBE) mehr Aufmerksamkeit zu schenken ist als dies bisher der Fall war. Erst mit vertieften Kenntnissen über das Verhalten der einzelnen Baustoffe einer KBE-Konstruktion können weitere Optimierungen und detaillierte Modifizierungen von Entwurfs- und Berechnungsansätzen durch die Ausnutzung der Wechselbeziehungen zwischen Boden und Geokunststoffen vorgenommen werden.

Dass der Bedarf dafür wächst, zeigt die zunehmende Nachfrage an Entwürfen und Bemessungen mit Methoden der Finiten oder Diskreten Elemente. Beispielhaft seien hier nur die Arbeiten von [KONIETZKY-04] und [AYDOGMUS-06a] genannt. Es wird an der Bergakademie Freiberg zudem nach alternativen analytischen Möglichkeiten zur Bemessung von Geokunststoffbewehrungen gesucht. Ein erfolgreicher Schritt war die Adaption des Kegelmodells um das räumliche Tragverhalten zu erfassen [HEROLD-05].

Mit der ECI International Conference on “The Use of Geosynthetics in Soil Reinforcement and Dynamics” im Jahr 2004 in Dresden [KLAPPERICH-05] wurde die Forschung im Bereich der Geokunststoffe auch nach außen und für die Fachwelt sichtbar auf einen weiteren Aspekt fokussiert. Die Dynamik in der Geotechnik und die Anforderungen, die damit an die KBE – Konstruktionen gestellt werden, war das Schwerpunktthema der Veranstaltung.

Zu diesem Zeitpunkt wurde die Kooperation mit dem Labor für Baustoffe der Fachhochschule Münster begonnen, da für eine Betrachtung von KBE-Konstruktionen unter dem Einfluss dynamischer und zyklischer Beanspruchungen weiterführende Kenntnisse über den Geokunststoff selbst erforderlich sind. Bereits bei der Bemessung nach statischen und quasi-statischen Verfahren, die auf einfache Zugkraft-Dehnungsmessungen zurückgreifen, die in der Regel nach [DIN EN ISO 10319] ermittelt werden, unterscheiden sich die Geokunststoffe aufgrund unterschiedlicher Polymere, Strukturen und Herstellungsverfahren. Die Betrachtungen, die die Untersuchung von dynamischen Beanspruchungsfällen erfordern, sind wesentlich komplexer. Es lag die Vermutung nahe, dass sich

Eigenschaften wie z.B. der Modul der Kunststoffe über eine große Anzahl von Zyklen verändern. Vor diesem Hintergrund ist der nun vorliegende Beitrag zur Einschätzung des Verhaltens von Geokunststoffen unter zyklischer Beanspruchung umgesetzt worden.

Dabei wurden die Diskussionen der Arbeitsgruppe 6.11 „Dynamik“ des Arbeitskreises 5.2 „Kunststoffe in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) aufgegriffen. Die Gruppe bearbeitet den Abschnitt zum Einsatz von Geokunststoffen unter nicht vorwiegend ruhenden Beanspruchungen der in Überarbeitung befindlichen „Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen-EBGEO“ [DGGT-97].

Um dem Konzept der überarbeiteten EBGEO zu folgen und alle Einflüsse auf die Geokunststoffbewehrungen zu faktorisieren, sollten die durchgeführten Untersuchungen dieser Arbeit in ein praktikables Verfahren zur Bestimmung des Abminderungsfaktors  $A_5$ -„Dynamische Einwirkungen“ münden.

Die Abminderungsfaktoren werden in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer von KBE's gewählt. Deshalb war es erforderlich ein Prüfverfahren zu entwickeln, das Aussagen für die geplante Nutzungsdauer auf der Basis der Zyklenanzahl oder des zeitlichen Verlaufs der veränderlichen Einwirkungen erlaubt.

Daraus ergab sich die Gliederung der nun vorliegenden Arbeit.

- Mit einer Zusammenfassung des Kenntnisstandes zum Verhalten von Geokunststoffen unter zyklischen Beanspruchungen aus Untersuchungen geokunststoffbewehrter Verbundsysteme und reinen Materialversuchen in 2.2 und 2.3 werden die Entwicklungsschritte auf dem Fachgebiet der Geotechnik aufgezeigt. Darüber hinaus werden die Forschungen aus anderen Bereichen herangezogen, die auf den ersten Blick nichts mit der Geotechnik und teilweise nicht einmal etwas mit dem Bauwesen zu tun haben. Ziel der Recherche war es, die Erfahrungen aus anderen Anwendungsgebieten polymerer Werkstoffe für die Beurteilung des Materialverhaltens der Geokunststoffe zu nutzen.
- Um einen praktikablen Weg zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit von Geokunststoffen zu finden, war es erforderlich eine Abgrenzung von konventionellen Beurteilungskriterien vorzunehmen und zusätzliche, polymertypische Aspekte hinzuzufügen. Das erfolgt in 2.4 anhand von



etablierten Verfahren aus dem Stahlbau und statistischen Auswerte- und Prognosemethoden.

- Um das Verhalten der Geokunststoffe und die Auswertung der Versuche zu verstehen, sind über das allgemeine werkstoffkundliche Wissen eines Bauingenieurs hinaus grundlegende Kenntnisse der Polymertechnik hilfreich. Die zur Beurteilung der Versuche relevanten Grundlagen über Polymere und analytische Verfahren sind im darauf folgenden Abschnitt 2.5 zusammen gestellt. Dieser Exkurs beschränkt sich auf die in dieser Arbeit untersuchten Geokunststoffe, ihre Strukturen und Polymere.
- Mit den Versuchen wurde das Ermüdungsverhalten von Geokunststoffen unter zyklischen Beanspruchungen, wie sie hinsichtlich Ihrer Lastwechselzahl und dem dynamischen Verhältnis auch in situ vorkommen können, untersucht. Dazu wurden in 3.1 die Versuchsrandbedingungen aus zur Verfügung stehenden Unterlagen von Feld- und großmaßstäblichen Laborversuchen sowie analytischen und numerischen Berechnungen abgeleitet.
- Daran schließen sich in 3.2 die Darstellung der eigenen Laborversuche und die Diskussion der Ergebnisse in 4 für die verschiedenen Geokunststoffe an. Hauptaugenmerk wurde auf das üblicherweise für Bemessungen herangezogene Zugkraft-Dehnungsverhalten und die Morphologie der untersuchten Polymere gelegt. Letztere wurde verwendet um das Zugkraft-Dehnungsverhalten selbst und dessen Veränderungen durch zyklische Beanspruchungen zu erklären.
- Mit einer abschließenden Zusammenfassung in 5 wird die Verbindung zu den eingangs erwähnten Diskussionen bei der Überarbeitung der EBGeo hergestellt. Der Ausblick soll zu vertiefenden Untersuchungen weiterer Problemstellungen dieser Thematik anregen.

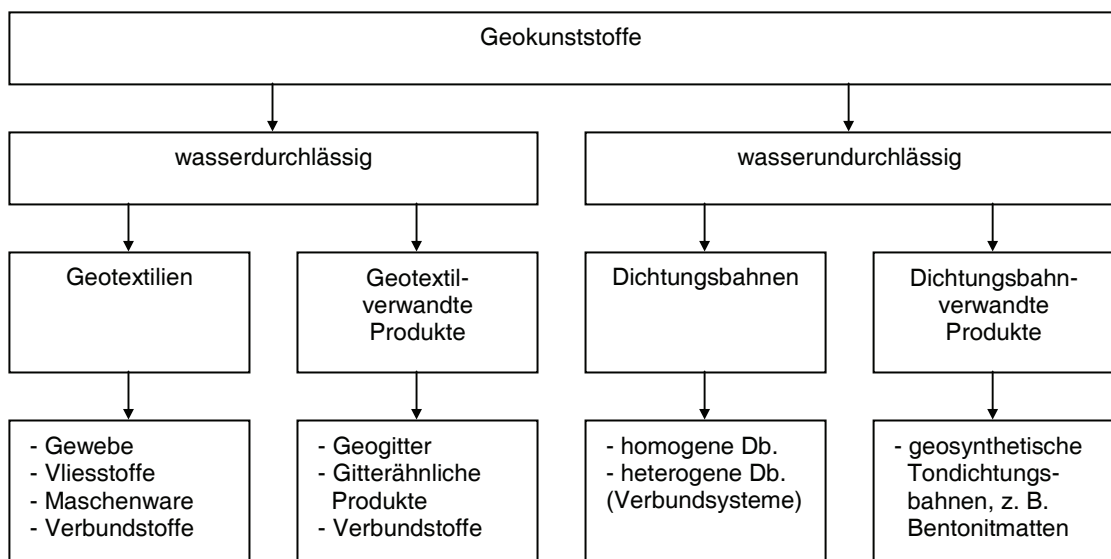
Der Einsatz von Geokunststoffen im Wirkungsbereich zyklischer Beanspruchungen ist aus bodenmechanischer und ökonomischer Sicht sehr interessant. [KETCHARD-01] kommt nach seinen Untersuchungen zu dem Schluss, dass durch die Einlage von Geokunststoffbewehrungen die Steifigkeit des Gesamtsystems gegenüber einem unbewehrten Aufbau um das 3 bis 7-fache in vertikaler und um Faktor 7 in horizontaler Richtung erhöht werden kann.

Um derartig positive Erfahrungen mit Geokunststoffen über die gesamte Nutzungsdauer einer bewehrten Konstruktion zu gewährleisten, sind Untersuchungen erforderlich, wie in dieser Arbeit vorgestellt werden.

## 2 Kenntnisstandsanalyse

### 2.1 Vorbemerkungen

Bei Betrachtung der Anwendungsgebiete von Geokunststoffen wird zum einen die Breite der möglichen Einsatzgebiete aber auch die Spezifik einzelner Anwendungen deutlich. Die Hersteller von Geokunststoffen haben es in den letzten Jahren sehr gut verstanden, ihre Produkte den Bedürfnissen der Bauwirtschaft anzupassen. Neben den ursprünglichen Anwendungen im Bereich des Wasser-, Straßen- und Landschaftsbaus sind den Geokunststoffen neue, immer anspruchsvollere Einsatzfelder erschlossen worden. Es kann eine Vielzahl von alltäglichen Projekten im Wasser- und Deponiebau referiert werden, in denen Bentonitbahnen als Abdichtung Anwendung finden [REUTER-03] aber auch so renommierte Projekte wie die Überbauung des Mühlenberger Lochs in Erweiterung des Werksgeländes der Airbus Deutschland GmbH unter Verwendung von geokunststoffummantelten Sandsäulen [MARTINI-03] oder neben anderen Tunneln die teilweise Dränung des AlpTransit-Gotthard-Basistunnels in der Schweiz mit geosynthetischen Dränelementen [JEKER-02]. Die Liste ließe sich ohne ein absehbares Ende fortführen.



**Abbildung 1** Einteilung der Geokunststoffe nach [SAATHOFF-03]

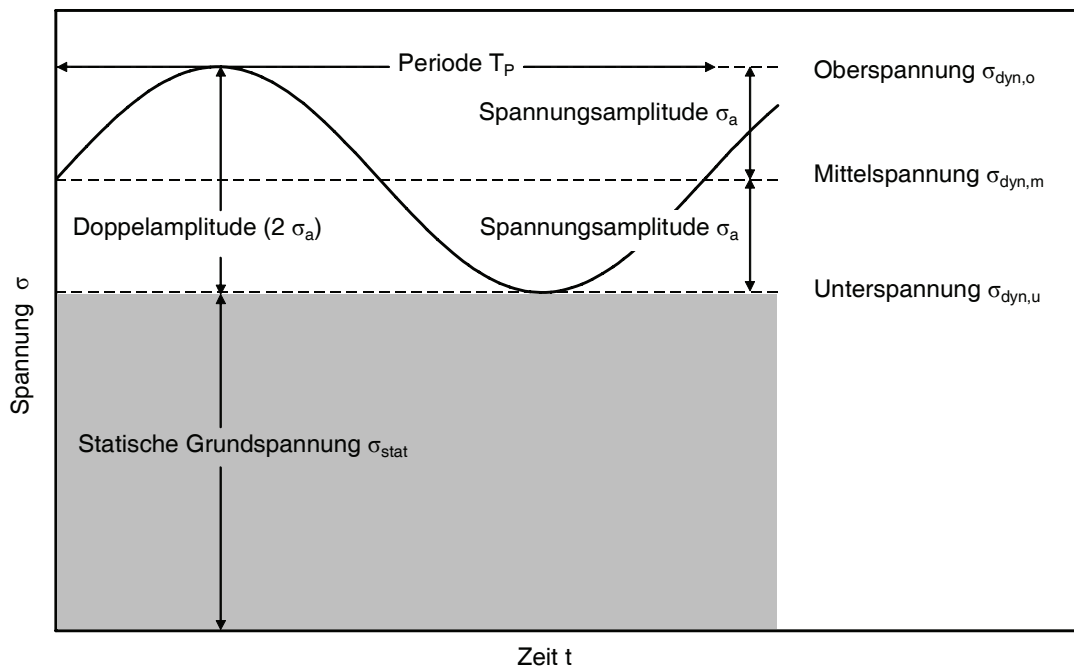
Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit Geokunststoffen, die eine Bewehrungsfunktion haben. Der Einteilung der Geokunststoffe in Abbildung 1

folgend, sind die in dieser Arbeit untersuchten Geokunststoffe den grau hinterlegten Bereichen zuzuordnen.

Weitere Eigenschaften der untersuchten Geogitter, eine Beschreibung ihrer Struktur und der verwendeten Polymere können den folgenden Abschnitten entnommen werden.

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl an allgemein zugänglicher Literatur (z.B. [RUEGGER-03], [JONES-02] und die laufenden Veröffentlichungen unter [DGGT-07] zum aktuellen Bearbeitungsstand der EBGEO), die den Stand der Technik bei der Bewehrung von Boden mit Geokunststoffen widerspiegelt, so dass hier nur der Aspekt der dynamischen bzw. zyklischen Beanspruchung ergänzt wird.

Für die bessere Lesbarkeit der Schrift sind bereits an dieser Stelle die folgenden Definitionen zusammengefasst:



**Abbildung 2 Nomenklatur sinusförmiger Beanspruchungen**

Die allgemeinen Begriffsdefinitionen beziehen sich in der Dynamik von Bauteilen auf Spannungen (Abbildung 2). Da sich im Bereich der Anwendung von Geokunststoffen

aber fast ausschließlich Zugkräfte als produktspezifische Bezugsgrößen durchgesetzt haben, werden z.B. die Begriffe Zugspannungen, Zugfestigkeiten und Zugkräfte nebeneinander verwendet. Die flächenbezogenen Kräfte für Spannungen und Festigkeiten zu ermitteln ist bei Geokunststoffen aufgrund ihrer Struktur und den unregelmäßigen Querschnitten ihrer Elemente aufwendig und ungenau.

Das dynamische Verhältnis  $R$ , das den Umfang der zeitlich veränderlichen Einwirkungen auf ein Bauteil angibt, ist in Gleichung 1 definiert.

$$R = \frac{\sigma_{dyn,u}}{\sigma_{dyn,o}}$$

**Gleichung 1 Definition des dynamischen Verhältnisses  $R$**

Für die hier untersuchten Fälle der zyklischen Zugbeanspruchungen beschreibt das abgeschlossene Intervall  $0 \leq R \leq 1$  das dynamische Verhältnis. Dabei bedeutet ein kleinerer Verhältniswert eine größere dynamische Beanspruchung. Der Grenzwert  $R = 1$  ist kennzeichnend für einen statischen Zugversuch.  $R = 0$  beschreibt eine vollständige Dynamik bei der die Spannungsamplitude  $\sigma_a$  gleich der Oberspannung  $\sigma_{dyn,o}$  ist, d.h. dass das Material nach jedem Zyklus vollständig entlastet wird. Die statische Grundspannung  $\sigma_{stat}$  ist dann 0.

Ein Lastwechsel bzw. Zyklus im Sinne dieser Arbeit entspricht einer vollständigen Periode gemäß Abbildung 2. Die Anzahl der Lastwechsel  $N$  oder Zyklen ist dementsprechend die Anzahl der aneinander gereihten Perioden der sinusförmigen Beanspruchung.

Die Frequenz  $f$  gibt an, wie viele Lastwechsel  $N$  pro Zeiteinheit  $t$  eingetragen wurden (Gleichung 2). Die Frequenz  $f$  wird in Hz angegeben, die Zeit  $t = 1$  s.

$$f = \frac{N}{t}$$

**Gleichung 2 Definition der Frequenz  $f$**

## 2.2 Geokunststoffe in Bodenkontakt und in In-Air-Versuchen

### 2.2.1 Kenntnisstand

Diskontinuierliche Einwirkungen sind in der Geotechnik und der Baustoffkunde unterschiedlich definiert. Unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung werden zeitlich veränderliche Einwirkungen im Sinne des Abschnitts 6.1.4 der [DIN 1054] angesehen, also die aus Verkehr, Bau- oder Maschinenbetrieb, Erdbeben, Lawinenabgängen und weiteren Ursachen.

Der zeitliche Verlauf dieser Einwirkungen kann sehr unterschiedlich sein und lässt sich nach [FLESCH-93] wie in Abbildung 3 dargestellt einteilen.

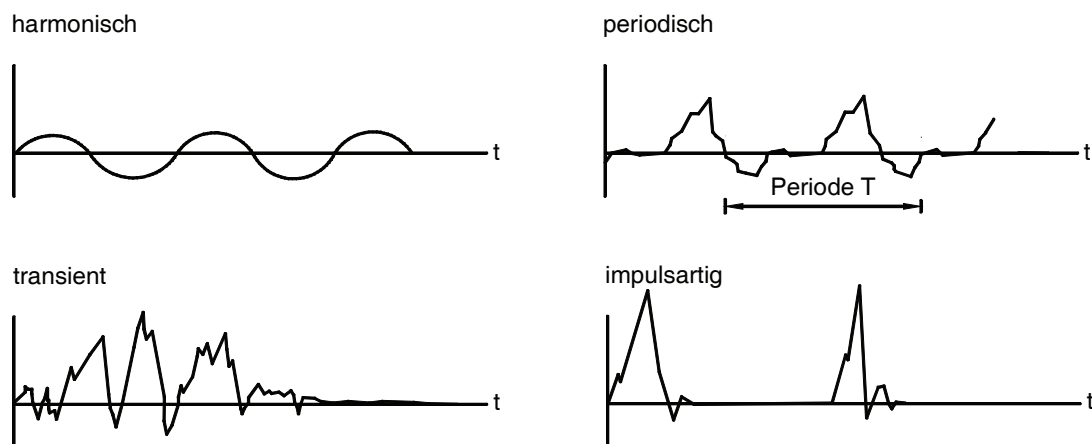


Abbildung 3 Zeitverläufe dynamischer Lasten nach [FLESCH-93]

Darüber hinaus unterscheidet [GOTSCHOL-02] drei Kategorien vorwiegend nicht ruhender Beanspruchungen unter den Gesichtspunkten der Tabelle 1:

Tabelle 1 Einteilung der Beanspruchungsarten nach [GOTSCHOL-02]

Zyklisch	Zyklisch-dynamisch	Dynamisch
$0 < f \leq 1,0 \text{ Hz}$	$1,0 \text{ Hz} < f \leq 10,0 \text{ Hz}$	$f > 10 \text{ Hz}$

Dynamische Beanspruchungen grenzt [GOTSCHOL-02] durch ein kleines Zeitfenster und ein dominierend elastisches Bodenverhalten gegenüber den anderen

Beanspruchungsarten ab. Die wirksamen Trägheitskräfte des Bodens müssen bei Auftreten dieser Beanspruchungsart Berücksichtigung finden.

Zyklische Beanspruchungen hingegen beschreibt er als lange anhaltende Belastungswechsel, die sowohl elastische als auch plastische Dehnungen hervorrufen. [GOTSCHOL-02] geht davon aus, dass das Verhalten des Bodens mit elastisch-plastischen Modellvorstellungen beschrieben werden kann. Hier sind Trägheitskräfte des Bodens vernachlässigbar klein.

Da es Bereiche gibt, in denen weder die eine noch die andere Beanspruchungsart dominierend ist, hat [GOTSCHOL-02] einen Übergangsbereich eingeführt, der für ein breites Spektrum zeitlich veränderlicher Beanspruchungen relevant sein kann. Zyklisch-dynamische Einwirkungen können z.B. durch Schienenverkehr oder Maschinenfundamente hervorgerufen werden. Bei zyklisch-dynamischen Beanspruchungen dominiert zwar eine der beiden Beanspruchungsarten aber es treten auch Einwirkungen und Widerstände der anderen Beanspruchungsart auf.

Die Definitionen berücksichtigen nicht den Einfluss der Geokunststoffe in einem Verbundsystem, da diese zusätzlichen Bewehrungselemente nicht Bestandteil der Betrachtungen von [GOTSCHOL-02] waren. Die Einteilung, die sich in der Geotechnik durchgesetzt hat, kann so auch nicht auf die Geokunststoffe übertragen werden. Bei Zugbeanspruchung von Geokunststoffen wird unmittelbar mit der Lasteintragung eine Reaktion hervorgerufen. Unabhängig von der Intensität der dynamischen oder zyklischen Beanspruchung spielen Trägheitskräfte im o.g. Sinne bei Geokunststoffen keine Rolle. Dynamische oder zyklische Beanspruchungen wirken unmittelbar auf Geokunststoffe, so sie in deren Einflussbereich eingebaut sind.

Wichtig für die Beurteilung des Verhaltens von Geokunststoffen unter zeitlich veränderlichen Beanspruchungen sind die Anzahl der Lastwechsel  $N$ , die Frequenz  $f$  der Einwirkung und deren Amplitude  $\sigma_a$ . Sie können Effekte auf den Geokunststoff haben, die sich in einem veränderten Zugkraft-Dehnungs- oder Zeitstandverhalten widerspiegeln.

Untersuchungen zum Verhalten von Verbundkonstruktionen aus Boden und Geokunststoff unter zyklischen Beanspruchungen wurden von [MIN-95] vorgenommen. Es handelte sich dabei um Vergleichsversuche, zum

Verbundverhalten zwischen Boden und Geokunststoff bei Einleiten konstanter und alternierender Herausziehkräfte unter Berücksichtigung verschiedener Normalspannungen.

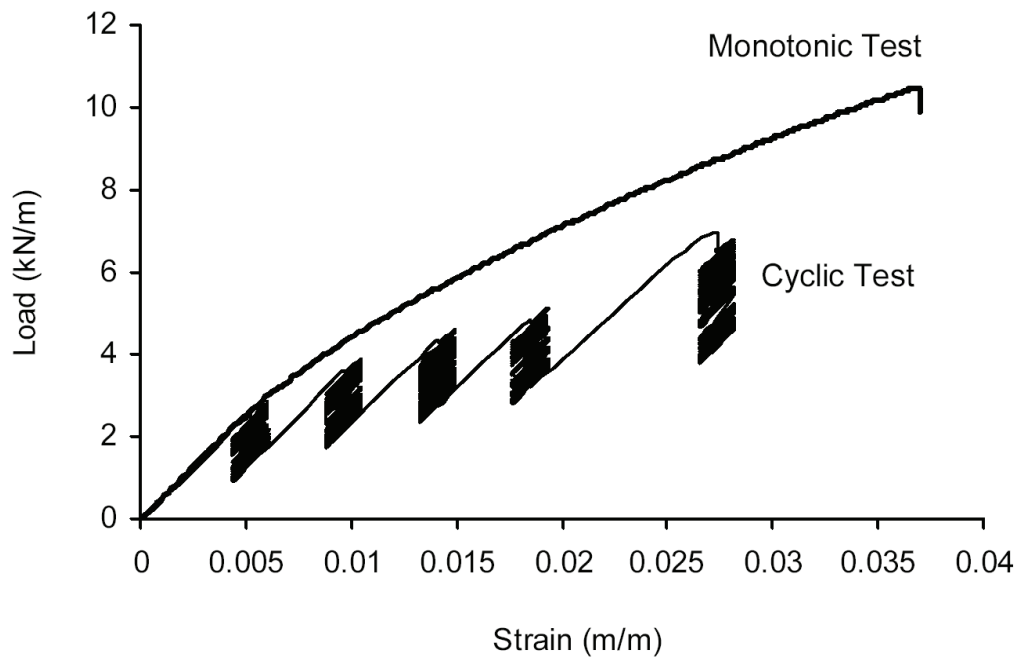
[MIN-95] hat festgestellt, dass die Kriechgeschwindigkeit bei der zyklischen Beanspruchung geringer war als die einer ständigen Einwirkung auf dem Niveau der Oberspannung  $\sigma_{\text{dyn},o}$ . Die praktische Anwendung dieser Erkenntnis müsste seiner Meinung nach in einen kleineren Abminderungsfaktor  $A_1$  für das Zeitstandverhalten münden.

Im Umkehrschluss werden unter Beibehaltung des Abminderungsfaktors  $A_1$  für statische Beanspruchungen auf dem Niveau der Oberspannung  $\sigma_{\text{dyn},o}$  weitere Sicherheiten in das Verbundsystem impliziert. Für die von ihm untersuchten Materialien hat [MIN-95] eine gute Übereinstimmung für das Kriechen während der Herausziehversuche unter konstanter Last und den In-Air-Versuchen im Vorfeld festgestellt.

Mit den Auswirkungen von zyklischen Beanspruchungen auf das Verbundverhalten hat sich auch [NERNHEIM-05] beschäftigt. Er hat Herausziehversuche unter Anwendung von zeitlich veränderlichen vertikalen und horizontalen Spannungen vorgenommen. Bei den direkt auf den Geokunststoff wirkenden horizontalen Herausziehkräften hat [NERNHEIM-05] im Bereich der freien Einspannlänge Kriechverformungen festgestellt. Diese deckten sich nahezu mit den statischen Spannungs-Dehnungsversuchen des Materials. Er hat weitere In-Air-Versuche zu dieser Thematik empfohlen.

Um den Einfluss der untersuchten Geokunststoffbewehrungen auf die Verformungen von Verkehrswegen mit flexiblem Oberbau zu ermitteln, hat [PERKINS-04] seine Forschungen für ein Bemessungsverfahren um In-Air-Versuche an Geokunststoffen ergänzt. Er hat dabei den Zustand der Gebrauchstauglichkeit berücksichtigt. Deshalb wurden die Versuche weggesteuert durchgeführt. Dadurch konnte das Relaxationsverhalten der Geokunststoffe sehr gut visualisiert werden. Abbildung 4 zeigt das Verhalten eines Geokunststoffes aus Polypropylen PP, bei dem sich der zunehmende Anteil des viskosen Fließens (vgl. Abbildung 48) in einer stärkeren Relaxation widerspiegelt.





**Abbildung 4** Zyklische Zugversuche am breiten Streifen an einem PP-Geogitter [PERKINS-04]

Als statische Grundbeanspruchung wurden schrittweise Wege entsprechend den Dehnungen zwischen 0,5 % und 4,0 % angefahren. Die Doppelamplitude  $2\sigma_a$  der zyklischen Beanspruchungen entsprach Dehnungen  $\varepsilon$  von 0,2 %. Während die Grunddehnungen für die jeweilige Beanspruchungsstufe konstant waren und die immer gleiche Doppelamplitude von 0,2 % mit 1,33 Hz eingetragen wurde, sank die im Geokunststoff aktivierte Zugkraft  $F$  mit zunehmender Zyklenzahl  $N$ , also mit der Zeit  $t$ . Es wurden etwa  $10^3$  Lastwechsel für alle 5 Beanspruchungsstufen zusammen durchgeführt.

Einen anderen Weg haben [HARTING-93] und [SÜRKEN-94] beschritten, als sie das Verhalten von Geokunststoffen unter zyklischen Beanspruchungen untersucht haben. Bei den von ihnen durchgeführten zyklischen Versuchsreihen an Geogittern haben sie erhöhte Restzugfestigkeiten festgestellt. [ROCHHOLZ-98] führt dies auf einen „Trainingseffekt“ der zyklischen Beanspruchungen zurück. Er vergleicht dieses Phänomen mit dem „Hochtrainieren“ von Stahl. Da sich der Mechanismus des Trainierens von Stahl und Kunststoffen unterscheidet, sind weitere Kenntnisse über Polymere unter zyklischen Beanspruchungen erforderlich, um diesen Effekt für Kunststoffe zu beschreiben.

[HARTING-93] hat sich mit dem Kriechen des untersuchten Geokunststoffes unter zyklischen Beanspruchungen befasst. Die von ihm durchgeführten Vergleiche für

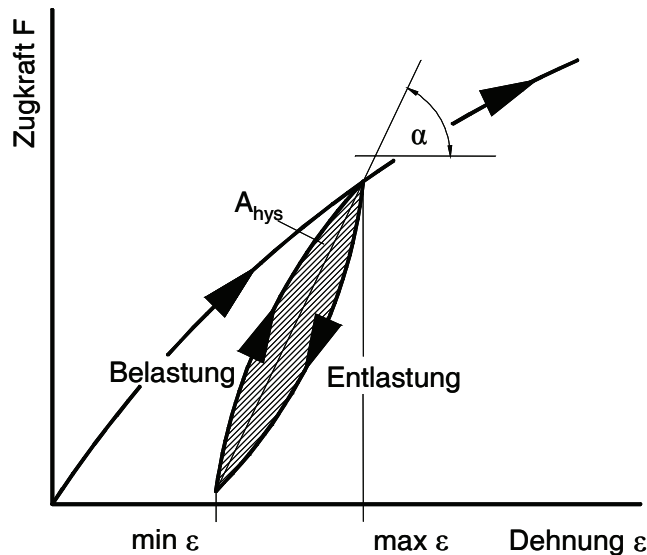
1000-h-Tests zeigen sehr deutlich, dass bei den gewählten Randbedingungen die Oberlast  $\sigma_{\text{dyn,o}}$  der zyklischen Versuche für die Kriechneigung im Vergleich zu statischen Kriechversuchen nicht maßgeblich ist.

[SÜRKEN-94] ergänzt die Untersuchungen um die Aspekte Zugkraft-Dehnungsverhalten und Messungen der Oberflächentemperatur der Proben während der zyklischen Beanspruchung. Aus Messungen der Zugfestigkeit der untersuchten Geogitter aus PEHD geht hervor, dass die Restfestigkeit  $R_{B,k1}$  nach  $N = 1000$  Lastwechseln leicht über der ermittelten Zugfestigkeit  $R_{B,k0}$  der unbeanspruchten Referenzprobe liegt. Im Gegenzug hat sich die Dehnung  $\varepsilon_{B,k0}$  bei Höchstzugkraft  $R_{B,k0}$  verringert. Beide Beobachtungen waren unabhängig von der zwischen 0,1 Hz und 10 Hz gewählten Frequenz  $f$  sowie dem dazugehörigen dynamischen Verhältnis  $R$  zwischen 0,11 und 0,78.

Die Versuche von [SÜRKEN-94] ließen einen Zusammenhang zwischen der Amplitude  $\sigma_a$ , also dem dynamischen Verhältnis  $R$  und der Oberflächentemperatur  $T_o$  der Proben erkennen. Eine Verringerung des dynamischen Verhältnisses  $R$ , das eine größere zyklische Beanspruchung kennzeichnet, führt bei gleich bleibender Frequenz  $f$  zu einer Erhöhung der Probenoberflächentemperatur  $T_o$ . Diese kann nach [SÜRKEN-94] Werte bis zu  $T_o = 50 \text{ °C}$  annehmen. Die maximalen Oberflächentemperaturen  $T_o$  während eines jeden Versuchs werden bereits nach wenigen Minuten erreicht.

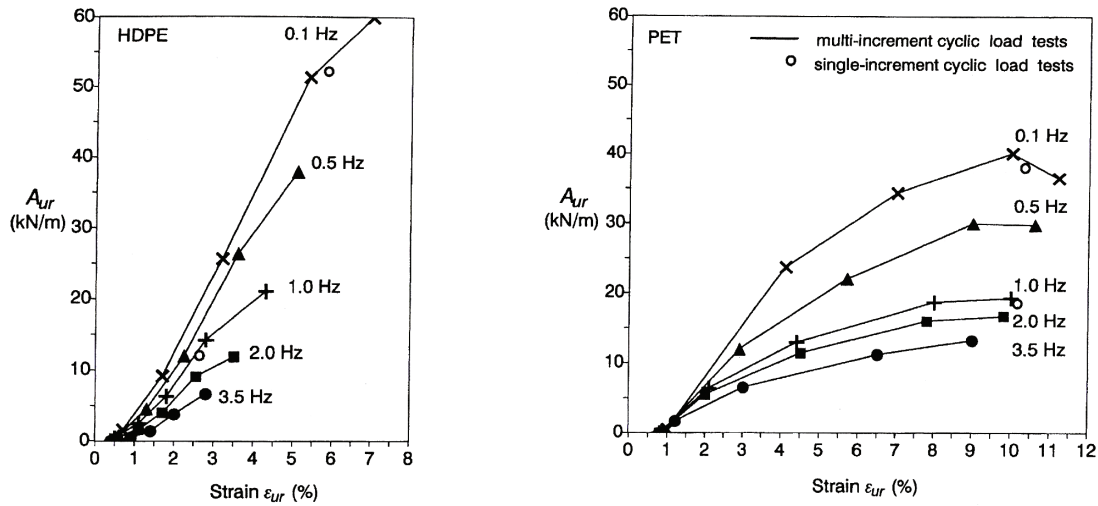
Mit Hinblick auf die erhöhten Temperaturen  $T_o$  der Proben, die durch Energieumwandlung entstehen und [SÜRKEN-94] zu folge nach den ersten Zyklen ihren Maximalwert erreichen, ist die Betrachtung der während der zyklischen Beanspruchung von Geokunststoffen in der Be- und Entlastungsphase verrichtete Arbeit von Interesse. Dafür ist die Aufzeichnung der Hystereseschleifen des jeweiligen Geokunststoffes hilfreich.

So hat [BATHURST-94] die Differenz der Integrale zwischen der Be- und Entlastung abhängig von der maximalen Dehnung  $\varepsilon$  der Zyklen aufgetragen. Die Flächendifferenz der Integrale der Be- und Entlastungskurve ist ein Maß für die Energie  $W$ , von der pro Zyklus ein Teil in Wärmeenergie umgewandelt wird. Der andere Teil ist dem visko-elastischen Verhalten der Thermoplaste geschuldet, aus denen die untersuchten Geokunststoffe hergestellt werden.



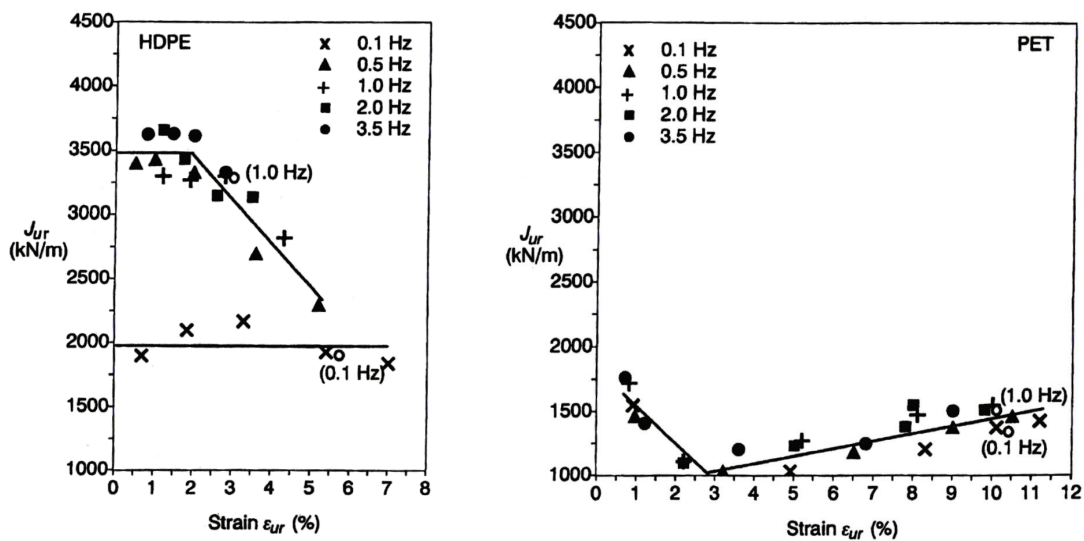
**Abbildung 5 Beschreibung einer Hystereseschleife**

Die Fläche innerhalb der Hystereseschleife ist frequenzabhängig, sie wird bei gleich bleibenden Randbedingungen mit steigender Frequenz  $f$  kleiner. [BATHURST-94] hat seine Messungen diesbezüglich in Abbildung 6 zusammengefasst. Dabei ist  $A_{ur} = A_{hys}$  und  $\varepsilon_{ur} = \max \varepsilon$  der jeweiligen Hystereseschleife. Der Trend aus den Ergebnissen seiner Untersuchungen, dass sich bei gleicher Dehnung  $\varepsilon$  die von der Hystereseschleife eingeschlossene Fläche  $A_{hys}$  mit zunehmender Frequenz  $f$  verringert, kann allerdings nicht verallgemeinert werden. Abbildung 6 zeigt für die untersuchten Geokunststoffe, dass die Hystereseschleifen von PEHD bei gleicher Dehnung eine größere Fläche umschließen als die von PET. Das deckt sich mit den Erfahrungen, dass bei der zyklischen Beanspruchung von Polyolefinen generell mehr Wärmeenergie entsteht als bei PET. Aus den Untersuchungen von [SÜRKEN-94] schlussfolgernd kann, dies zu einem ernstzunehmenden Problem für die Aussagekraft der Versuchsergebnisse werden, da bei zu hohen Temperaturen die Auswirkungen der zyklischen Beanspruchung gegenüber den thermischen Effekten in den Hintergrund treten. Hinzu kommt, dass die Kühlung der Kunststoffe während der Versuche schwierig ist, da die Wärme im Inneren der Materialien entsteht und eine oberflächige Kühlung mittels Ventilatoren oder Flüssigkeitsbädern nicht die Temperatur des gesamten Probenquerschnitts konstant halten kann.



**Abbildung 6** Flächen  $A_{nys} = A_{ur}$  der Hystereseschleifen eines gestreckten PEHD-Geogitters und eines gewebten PET-Geogitters aus [BATHURST-94]

Bei den von [BATHURST-94] untersuchten Materialien hat sich der Anstieg Sekanten der Hystereseschleifen  $\tan \alpha$  nach Abbildung 5 während der zyklischen Beanspruchungen verändert. Der Anstieg der Hysteresesekanten ist ein Maß für die Steifigkeit des Geokunststoffes mit deren Hilfe die von den anderen Autoren beobachteten „Trainingseffekte“ durch die zyklischen Beanspruchungen quantifiziert werden können. [BATHURST-94] hat 10 Zyklen je Laststufe untersucht. Da er die Beanspruchungen auf bis zu 5 verschiedenen Niveaus eingetragen hat, wurde eine einzelne Probe maximal 50 Lastwechseln unterzogen.



**Abbildung 7** Hysteresesteifigkeit  $\tan \alpha = J_{ur}$  eines gestreckten PE-HD-Geogitters und eines gewebten PET-Geogitters aus [BATHURST-94]

Dies geschah mit einem dynamischen Verhältnis von  $R = 0$ , also vollständiger Dynamik im Zugbereich. D.h. die Proben wurden nach jedem Zyklus komplett entlastet, die Unterspannung  $\sigma_{\text{dyn,u}}$  war 0.

Die Publikation von [BATHURST-94] wurde von anderen Autoren als Anregung für weitere Untersuchungen verwendet. So hat [ASHMAWY-96] Vliesstoffe und Gewebe unter zeitlich veränderlichen Lasten geprüft und versucht, ein Modell zur Prognose ihres Verhaltens zu entwerfen. [ASHMAWY-96] hat dabei einen Zusammenhang zwischen der Dehnung  $\varepsilon$  und der Anzahl der Lastwechsel  $N$  zu Grunde gelegt und gleichzeitig festgestellt, dass dies alleine nicht ausreichend ist. Es wurden Ansätze unternommen, das Kriechen in die Betrachtungen mit einzubeziehen, da während der Versuche aufgefallen war, dass die zyklischen Beanspruchungen einen Ausnutzungsgrad der zuvor ermittelten Kurzzeitzugfestigkeit  $R_{B,k0}$  von etwa 120 % erlaubten. [ASHMAWY-96] selbst hat sich zwar nicht dahingehend geäußert aber wenn auf der Grundlage des von ihm beschriebenen thermisch verfestigten Vliesstoffs und der erläuterten Versuche eine Rückrechnung vorgenommen wird, lässt sich ein zeitlicher Zusammenhang zwischen dem erhöhten Ausnutzungsgrad während der zyklischen Beanspruchung bis zum Versagen der Probe nach 100 Zyklen herstellen. 20 % der Kurzzeitzugfestigkeit  $R_{B,k0}$  bedeuten für den untersuchten Vliesstoff auch etwa 20 % Dehnung  $\varepsilon$  im statischen Zugversuch bei einer Dehnung bei Höchstzugkraft  $\varepsilon_{B,k0}$  von etwa 70 %. Die Geschwindigkeit für den Zugversuch wurde nach [ASTM D 4595] mit 12 % Dehnung / min festgelegt. Danach werden für 20 % Dehnung 1,67 min oder 100 s benötigt. Bei der gewählten Versuchsfrequenz von 1 Hz können in dieser Zeit 100 Lastwechsel vollzogen werden. Demnach wäre eine Kumulation der Zeit, die für die einzelnen Zyklen bis zum Bruch benötigt wird, möglich. Das würde einem Kriechanteil im gleichen Umfang entsprechen.

Eine neue Qualität haben die Bemühungen um die Modellierung des Verhaltens von Geokunststoffen unter zyklischen Beanspruchungen mit dem zunehmenden Einsatz von Computern erfahren. Nicht nur hinsichtlich der Methoden der Finiten und Diskreten Elemente haben sich dem Bauingenieurwesen komplexe numerische Berechnungsverfahren eröffnet. Auch bei der Beurteilung und Auswertung von Messergebnissen kann auf immer umfassendere Lösungsalgorithmen zurückgegriffen werden. Davon partizipieren auch [KONIETZKY-04a] und [LIU-06]. Beide haben Modelle für die Simulation der Geokunststoffe als Teil zyklisch beanspruchter und [LIU-06] explizit durch Erdbeben gefährdete Bauwerke entwickelt.

[KONIETZKY-04a] berücksichtigt den viskosen Anteil der Verformungen der Geokunststoffe unter zyklischen Beanspruchungen. Dadurch kann er für eine begrenzte Anzahl von Lastwechseln die Kriechverformungen sehr gut abbilden. Die Kalibrierung des Verfahrens erfolgte durch statische und zyklische Versuche mit bis zu 3 Laststufen und zwischen 6 und 120 Lastwechseln pro Laststufe. Die Frequenzen  $f$  waren mit 0,01 Hz bis 0,2 Hz sehr gering. Durch das gewählte Verfahren wird die Veränderung der Steifigkeit der Geokunststoffe während einer größeren Anzahl von Lastwechseln nicht exakt wiedergegeben. Im Zusammenwirken zwischen Boden und Geokunststoff kann dies aber nach den Untersuchungen von [KETCHARD-01] wichtig sein, um den positiven Effekt der Bewehrung im Verbund mit dem Verhalten des Bodens unter zyklischen Beanspruchungen in einer KBE-Konstruktion zu verstehen.

Auf die mit der steigenden Anzahl der Lastwechsel  $N$  zunehmende Verfestigung der untersuchten Geokunststoffe ist [LIU-06] eingegangen. Isoliert betrachtet hat er damit einen Weg gefunden den Anstieg der Hystereseschleifen zu beschreiben. Defizite sind in der Berücksichtigung der Kriechverformungen vorhanden. Auf der anderen Seite spielen diese wegen der geringen Lastwechselzahl, wie Sie bei Erdbeben zu erwarten ist, eine untergeordnete Rolle. [STUDER-97] geht von 5 bis 30 Lastwechseln aus.

Abschließend ist neben dem Ermüdungsverhalten der Punkt der möglichen mechanischen Beschädigung von Geokunststoffen durch das Reiben von Bodenpartikeln oder Umlagerungen der Kornstruktur etc. zu erwähnen. Es liegt die Vermutung nahe, dass die zyklischen Beanspruchungen Auswirkungen, ähnlich wie die Verdichtungsvorgänge während des Einbaus, auf die Geokunststoffe haben können.

Hierzu hat [NIMMESGERN-01] einer mit PE-Geogittern bewehrten Stützkonstruktion unter einem Bahndamm nach 10-jähriger Verkehrsbeanspruchung Proben der Bewehrung entnommen und begutachtet. Die Strecke wurde mit ungefähr 20.000 Tonnen oder 45 bis 50 Zugpaaren pro Tag im Mischverkehr beansprucht. Nach der Beschreibung von [NIMMESGERN-01] kann die Strecke der Streckenkategorie M160 nach [Ril 413] zugeordnet werden. Wird die maximale Radsatzlast von 225 kN für diese Strecke nach [Ril 413] angesetzt, dann sind innerhalb der betrachteten 10 Jahre etwa  $N = 3,25 \cdot 10^6$  Lastwechsel durch die Radsätze aus 182.500 Zugüberfahrten eingetragen worden. Im Extremfall könnten dies bei vollständigem Personenverkehr mit einem ICE 3 bei Radsatzkräften nach [GÖBEL-04] von 140 kN für  $N = 5,2 \cdot 10^6$  Lastwechsel gewesen sein. Die Geogitter aus denen Proben

entnommen wurden waren 0,90 m unterhalb der Schienenoberkante (SOK) eingebaut worden. Welchen Umfang die zyklischen Beanspruchungen des Geokunststoffes in dieser Tiefenlage hatten, ist nicht dokumentiert, da die Begutachtung nicht von Anfang an eingeplant war sondern sich nach der geplanten Nutzungsdauer und während der anschließenden Umbauarbeiten anbot. Deshalb wurden die ermittelten Restzugfestigkeiten (mindestens 64 % von  $R_{B,k0,5}$ ) nach der Beanspruchung in der Stützkonstruktion mit den Werten des 95 %igen Vertrauensbereiches der Kurzzeitzugfestigkeit fabrikneuer Proben (100 % für  $R_{B,k0,5}$ ) des gleichen Produktes verglichen. Der Zugfestigkeitsverlust ist auf alle Einwirkungen, also auf Zeitstandverhalten, Transport und Einbau sowie Umweltbedingungen aber auch eventuelle Auswirkungen der zyklischen Beanspruchungen zurückzuführen. Aus den oben genannten Gründen gab es keine Rückstellproben zur systematischen Evaluierung der einzelnen Einwirkungsarten. Deshalb konnten auch die Effekte der zeitlich veränderlichen Lasten aus dem Zugverkehr auf das Geogitter nicht isoliert und explizit ausgewiesen werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Ermittlung der Bemessungsfestigkeit nach Gleichung 12 für die untersuchte Nutzungsdauer der Konstruktion Sicherheitsreserven hatte.

[GÖBEL-06] hat Proben eines Geogitters nach großmaßstäblichen Belastungsversuchen auf eventuelle Beschädigungen visuell untersucht und konnte keine Beschädigungen wie Abriebstellen o.ä. erkennen. Durch den von [GÖBEL-06] gewählten Aufbau des Versuches wurde die Beanspruchung eines 1,4 m unter SOK eingebauten Geokunststoffes simuliert. Mit  $N = 1,28 \cdot 10^7$  Lastwechseln bei einer Frequenz  $f = 7$  Hz und einem dynamischen Verhältnis von  $R = 0,15$  entsprachen die gewählten Randbedingungen nach Einschätzung von [GÖBEL-06] in etwa denen eines Eisenbahnzuges mit einer Fahrgeschwindigkeit von 200 km/h.

In den beiden zuletzt beschriebenen Vorhaben lag der Geokunststoff jeweils oberhalb der gemäß [Ril 836] vorgesehenen Einbautiefe. Nach der momentanen Situation wurden die Geokunststoffe damit stärker durch zyklische Einwirkungen beansprucht als es im Zuständigkeitsbereich der DB AG regelmäßig zulässig ist.

### 2.2.2 Resümee

In Tabelle 2 sind die angesprochenen Quellen mit den einzelnen Versuchsrandparametern und den untersuchten Phänomenen zusammengefasst.

**Tabelle 2 Zusammenfassung der an Geokunststoffen durchgeführten zyklischen Belastungsprüfungen**

Quelle	N [-]	f [Hz]	R [-]		Beobachtete Phänomene
			von	bis	
[MIN-95]	$2,6 \cdot 10^5$	0,5	0,03	0,12	Kriechen bei zyklischer Beanspruchung entspricht 60 % bis 80 % des Kriechens, das eine statische Beanspruchung auf Oberlastniveau hervorruft
[NERNHEIM-05]	$1,0 \cdot 10^4$ ( $1,0 \cdot 10^5$ )	1 (0,5) (2,5)	0,53	0,85	ohne genaue Messungen: Kriechen etwas unter dem Niveau statischer Versuche bei Oberspannung $\sigma_{dyn,o}$
[PERKINS-04]	$1,0 \cdot 10^3$	1,33	n.a.	n.a.	Relaxation nimmt mit N und damit mit der Zeit t zu
[HARTING-93]	$1,8 \cdot 10^7$	5 (25) (50)		0,75 (0,9) (0,95)	Kriechen etwas über dem statischer Versuche bei Mittelspannung keine messbare Erwärmung der Probe im Vergleich zur Referenz



Quelle	N [-]	f [Hz]	R [-]		Beobachtete Phänomene
			von	bis	
[SÜRKEN-94]	1,0·10 <sup>3</sup> 1,0·10 <sup>7</sup>	0,1 1 10	0,11	0,78	Zuwachs an Zugfestigkeit und Abnahme der Bruchdehnung nach 1000 Lastwechseln; Temperatur der Probe ist abhängig vom dynamischen Verhältnis R
[ROCHHOLZ-98]					Geokunststoffe können dem Verhalten von Stahl vergleichbar „hochtrainiert“ werden
[BATHURST-94]	10 50	0,1 0,5 1 2 3,5	0		Hystereseschleifen lassen Rückschlüsse auf Energieumwandlungen zu, Definition der Steifigkeit als Anstieg der Sekante der Hystereseschleifen, Steifigkeit verändert sich mit der Anzahl der Zyklen

Quelle	N [-]	f [Hz]	R [-]		Beobachtete Phänomene
			von	bis	
[ASHMAWY-96]	$10^5$ ( $1,2 \cdot 10^6$ )	1 (2)	0		Ausnutzungsgrad bei zyklischen Beanspruchungen kann für eine Anzahl Lastwechsel größer sein als die statisch ermittelte Kurzzeitzugfestigkeit, Anzahl der Lastwechsel wird durch die Kriechneigung des Materials begrenzt
[KONIETZKY-04]	360	0,01 0,05 0,2	0	0,83	Modell für das viskose Verhalten, gute Abbildung der Kriechverformungen
[LIU-06]	5		0		Modell mit Fokus auf die Verfestigung des Geokunststoffes
[NIMMESGERN-01]	$3,25 \cdot 10^6$ bis $5,2 \cdot 10^6$				Abnahme der Zugfestigkeiten nach Nutzung im Bauwerk, aber keine Zuordnung zu einzelnen Ursachen wie zyklischer Beanspruchung oder Einbaubeschädigung möglich

Quelle	N [-]	f [Hz]	R [-]		Beobachtete Phänomene
			von	bis	
[GÖBEL-06]	$1,28 \cdot 10^7$	7	0,15		keine visuellen Beschädigungen des Geokunststoffes nach Großversuch festgestellt

() Parameter wurden zusätzlich untersucht

Ordnet man die in der Tabelle enthaltenen Publikationen chronologisch, dann werden die großen Schritte im Kenntnisstand zur Einschätzung von Geokunststoffen unter zyklischen Beanspruchungen deutlich. Es kristallisiert sich heraus, dass die Thematik sehr komplex ist und die konventionellen Methoden des Bauingenieurwesens und der Geotechnik alleine nicht mehr ausreichen um die notwendigen Antworten auf die Fragen der Anwender zu finden.

Das wird insbesondere dann deutlich, wenn es um deren Sicherheitsbedürfnis geht und eine Abschätzung der möglichen Nutzungsdauer von KBE-Konstruktionen vorzulegen ist. Die bis heute verfügbaren Informationen können das Verhalten von Geokunststoffen unter zeitlich veränderlichen Einwirkungen nicht umfassend beschreiben. Es gibt im Bereich der Baustoffkunde kein befriedigendes Materialgesetz, mit dem die Betriebsfestigkeit von Geokunststoffen für eine große Anzahl von Zyklen prognostiziert werden kann.

Es wurden bisher verschiedene kunststofftypische Verhaltensweisen unter zyklischen Beanspruchungen untersucht:

- Zugkraft-Dehnungsverhalten
- Kriechen
- Relaxation
- Steifigkeitsänderung
- Temperaturverhalten
- Beschädigung

Die Aktivitäten in diesem Bereich haben gezeigt, dass sich einzelne Effekte überlagern können und dass auch die durch neuere Untersuchungen gefundenen

mathematischen Modelle ihre Grenzen haben. Allen gemeinsam sind die fehlenden Aussagen zu großen Lastwechselzahlen wie sie im Verkehrswegebau zu erwarten sind.

## **2.3 Einbeziehen anderer Einsatzgebiete polymerer Werkstoffe**

### **2.3.1 Kenntnisstand**

Schaut man die von [LIU-06] aufgeführten Referenzen durch, dann fallen Publikationen aus den Jahren 1975 bis 1977 auf. Die dort zitierten Erkenntnisse stammen nicht aus dem Anwendungsbereich der Geokunststoffe. Sie sind allgemeiner Natur und kommen aus der Materialwissenschaft. Derartige interdisziplinäre Netzwerke können helfen, das Verhalten von Geokunststoffen zu verstehen und zu beschreiben.

Polymere Werkstoffe spielen für Anwendungen unter zeitlich veränderlichen Beanspruchungen eine große Rolle. Sie werden als selbständige Bauteile, für Lamine oder in Verbundstoffen verwendet. Sie sollen bei Biege-, Zug-, und Druckbeanspruchungen bzw. deren Kombinationen die erforderliche Stabilität gewährleisten. Erkenntnisse, die auf Geokunststoffe übertragbar sind, könnten aus Überlegungen grundsätzlicher Natur zu Kunststoffen unter Zugbeanspruchung abgeleitet werden.

Modelle zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens von glasfaserverstärkten Kunststoffen für die Rotorblätter von Windkraftturbinen sind in einem europäischen Gemeinschaftsprojekt zusammengetragen und in [KENSCHKE-96] publiziert worden. Es wurden Druck-Zugbeanspruchungen der Rotorblätter untersucht. Mit einer Nutzungsdauer von 20 Jahren und einer zu erwartenden Zyklenzahl von  $N = 10^8$  sind die dort vorgestellten Methoden der Versuchsauswertung für die Anwendung auf Geokunststoffe interessant. Nähere Erläuterungen befinden sich in 2.4.4.

An dieser Stelle sollen noch einmal die Untersuchungen von [HARTING-93] und [ASHMAWY 1996] aufgegriffen werden, die festgestellt hatten, dass für das Zeitstandverhalten von Geokunststoffen unter zyklischer Beanspruchung eine Spannung zwischen der Mittel- und der Oberspannung maßgeblich ist und dass auf dieser Basis ein Ausnutzungsgrad von über 100 % der Kurzzeitzugfestigkeit  $R_{B,k0}$  möglich ist. Gleiches wurde auch von [BOSMAN-01] bei der Beurteilung der

verbleibenden Nutzungsdauer von Befestigungstauen aus PET für Ölplattformen festgestellt. Er hat auf der Basis der Schadensakkumulation nach Coleman und Zhurkov einen Korrekturfaktor für die effektiven Mittelspannungen aus dynamischen Beanspruchungen eingeführt. Die in Gleichung 3 dargestellte Schadensakkumulation beschreibt den Bruch für den Fall, dass  $D = 1$  ist. Coleman und Zhurkov sind davon ausgegangen, dass die Schadenshäufigkeit mit der Zeit linear und exponential mit der eingebrachten Spannung zunimmt.

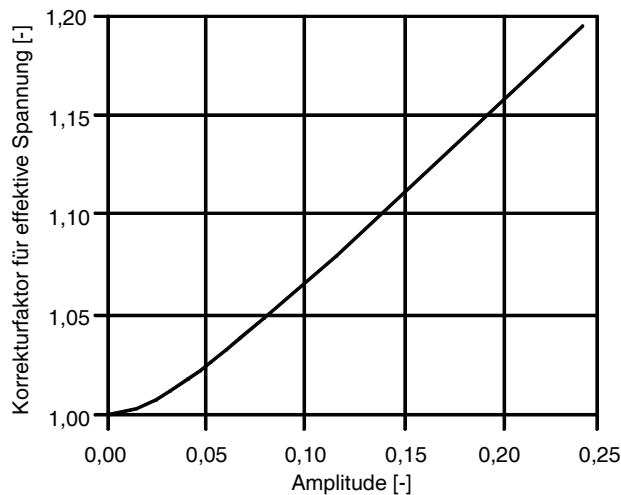
$$D = \frac{t_L}{t_B} \cdot \frac{1}{10^{\frac{100 \cdot (1-\sigma)}{B_K}}}$$

**Gleichung 3 Schadensakkumulation nach Coleman und Zhurkov aus [BOSMAN-01]**

Für die Verwendung der Gleichung 3 sind Materialkennwerte erforderlich, die hier für die untersuchten Befestigungstau eingesetzt wurden.  $B_K$  ist dabei eine materialabhängige Zeitstandbruchkonstante, die von [BOSMAN-01] mit  $B_K \sim 5\%$ -Kurzzeitzugfestigkeit/Dekade eingesetzt wurde. D.h., dass 5 % weniger Ausnutzung bezogen auf die Kurzzeitzugfestigkeit  $R_{B,K0}$  eine zusätzliche Dekade Nutzungsdauer des Befestigungstaus bedeuten. Die Zeit bis zum Bruch  $t_B$  bei 100 %-iger Ausnutzung der Kurzzeitzugfestigkeit ( $\sigma = 1$ ) ist mit  $t_B \sim 1$  s angesetzt worden.

Unter der Voraussetzung, dass das von [BOSMAN-01] verwendete Material auf eine Ausnutzung von 60 % der Kurzzeitzugfestigkeit ( $\sigma = 0,60$ ) bemessen worden ist und dass die Lasteinwirkung nicht länger als  $t_L = 10$  s je Zyklus beträgt, hätte sich die Beschädigung des Befestigungstaus nach  $N = 10^7$  Lastwechseln soweit aufsummiert, dass es zum Bruch kommen würde.

Gleichung 3 zeigt auch, dass durch eine Erhöhung des Ausnutzungsgrades das Versagen wesentlich schneller eintritt. Das hat [BOSMAN-01] für seine Untersuchungen genutzt und mit den tatsächlich ertragenen Lastwechseln verglichen. Daraus ließ sich die Abbildung 8 für den Korrekturfaktor zur Umrechnung der zahlenmäßigen in die effektive Mittelspannung erstellen.



**Abbildung 8 Korrekturfaktor für die Umrechnung zahlenmäßiger in effektive Spannungen in Abhängigkeit von der Amplitude aus [BOSMAN-01]**

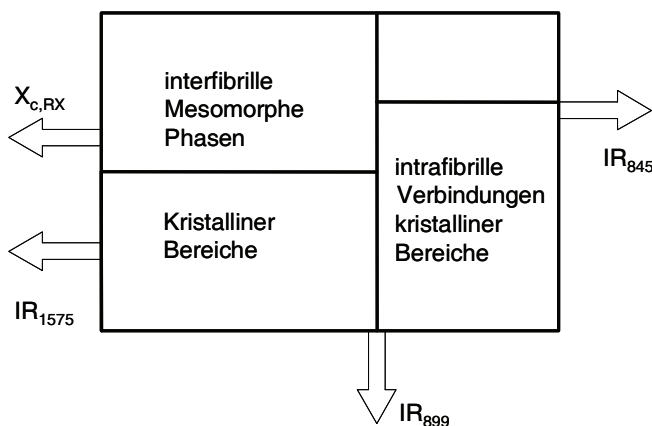
Rein mechanische Betrachtungen des Verhaltens von Thermoplasten führen allerdings auch in der Kunststofftechnologie nur bedingt zum Erfolg. Grundsätzlich besteht das Problem, dass sich die Erkenntnisse, die mit einem Polymer gewonnen wurden, nicht ohne weiteres auf andere übertragen lassen. Sofern sie durch Untersuchungen an Proben eines Rohmaterials erhalten wurden, berücksichtigen sie die Produktionsschritte bis zur Fertigstellung nicht. Untersuchungen an marktreifen Erzeugnissen sind produktspezifisch, da die Verarbeitung, das spätere Beschichten des Kunststoffes oder das Einbetten in andere Materialien Einfluss auf sein Verhalten haben. Deshalb müssen die typischerweise angestellten mechanischen Überlegungen durch Untersuchungen der Morphologie der Polymere ergänzt werden.

Aus der Vielfalt der Literatur sollen an dieser Stelle nur drei Quellen vorgestellt werden, die unmittelbar mit den durchgeführten Untersuchungen zu tun haben.

[OUDET-87] hat festgestellt, dass sich Polyesterfasern mit möglichst großen kristallinen Bereichen, an denen die maximal mögliche Anzahl *mesomorpher Moleküle* angelagert sein sollte, besonders stabil gegenüber zyklischen Beanspruchungen zeigen. Diese Struktur ermöglicht eine optimale Verhakung der im kristallinen Bereich orientierten Moleküle untereinander aber auch eine Überbrückung der amorphen Bereiche. Bevor es zu einem Ermüdungsversagen des Polymers kommen kann, muss diese Struktur umorganisiert werden. Erste Auswirkungen dafür lassen sich manchmal durch Veränderungen an der Oberfläche des Materials erkennen. Derartige Veränderungen der Morphologie sind umso schwieriger zu erkennen, je dichter der *mesomorphe Bereich* ist. [OUDET-87] kommt zu dem Schluss, dass PET grundsätzlich in den amorphen Strukturen versagt. Die

Ermüdungserscheinungen haben sich unter Bildung amorpher Zonen an den Molekülen entlang bis in die Mitte der untersuchten PET-Fasern fortgepflanzt. Erst danach kam es zum Bruch des Materials.

Dass sich das Versagen aufgrund dynamischer Einwirkungen auf PET- und Polyamid-(PA)-Fasern grundsätzlich von denen des Bruchversagens bei der Ermittlung der Höchstzugkraft in einem statischen Zugversuch unterscheidet, hat [VÈVE-87] festgestellt. Während der zyklischen Beanspruchung kommt es mit zunehmender Ermüdung des Kunststoffes zu einer Schadensakkumulation, die der von [OUDET-87] beschriebenen Veränderung der polymeren Morphologie entspricht. Nach [VÈVE-87] können die einzelnen Strukturanteile von PET mittels Röntgen- und Infrarotspektroskopie qualifiziert und quantifiziert werden. Dazu hat er das Polymer in die in Abbildung 9 dargestellten Bereiche eingeteilt.



**Abbildung 9 Einteilung der mittels Röntgen- bzw. IR-Spektroskopie nachweisbaren Bereiche von PET nach [VÈVE-87]**

Interessant ist, dass über die Quantifizierung der einzelnen Bereiche und ihre Abhängigkeiten untereinander eine Art Ermüdungsfaktor für die untersuchten Polymere abgeleitet werden konnte. Die von [VÈVE-87] publizierten Untersuchungen erlauben auch Rückschlüsse auf das dynamische Verhältnis  $R$ , das zum Versagen durch Ermüdung führt. Allerdings ist seine Einschätzung des Verhaltens der getesteten Materialien mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % sehr grob für Zyklenzahlen zwischen  $N = 1 \cdot 10^5$  und  $N = 3 \cdot 10^5$ . Diese Zyklenzahlen können mit der heute zur Verfügung stehenden Versuchstechnik problemlos im Laborversuch nachgewiesen werden.

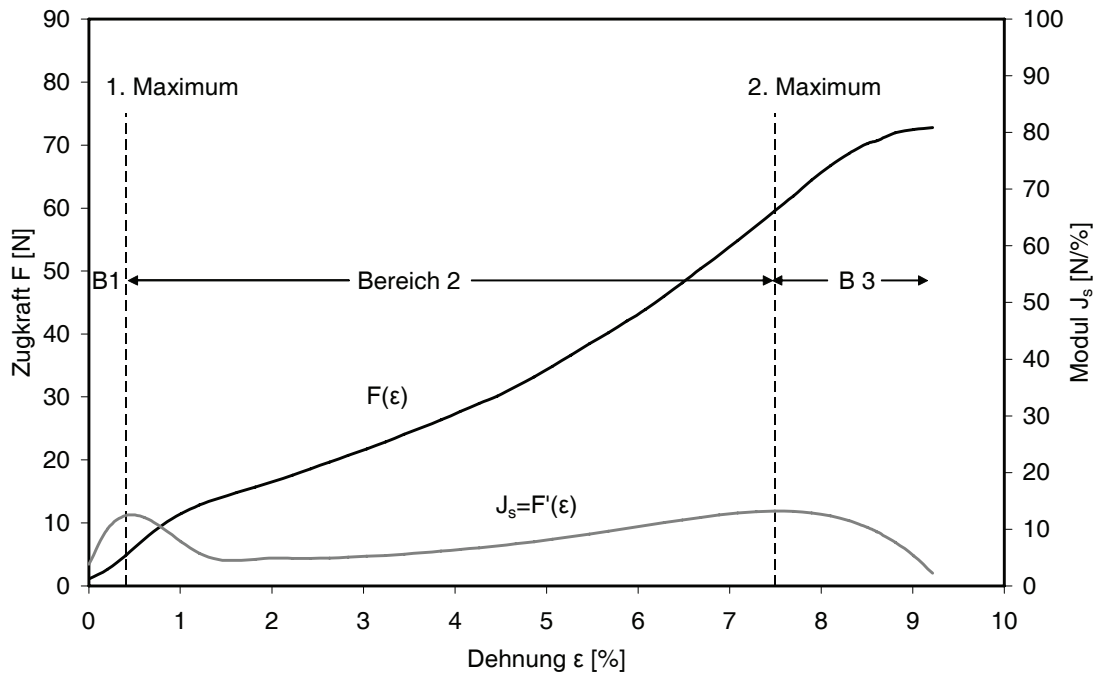
Die Untersuchungen von [KAUSCH-05] haben gezeigt, dass die Länge der Molekülketten und deren Vermögen, sich bei Zugbeanspruchung zu orientieren, eine entscheidende Rolle für das Bruchversagen von Thermoplasten spielen. Für die Untersuchungen der amorphen Bereiche wurde Polymethylmethacrylat (PMMA) und für die kristallinen Bereiche ein Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) mit einem kristallinen Anteil von 99 % gewählt. In den amorphen Bereichen müssen bis zum Versagen lediglich die zwischenmolekularen Kräfte überwunden werden, die bei relativ kurzkettigen Materialien nur etwa zweimal so groß sind wie die Oberflächenspannung des Stoffes. Mit größerer *Molmasse*  $M$ , die mit längeren Molekülketten einhergeht, wird das Auseinanderziehen der Ketten schwieriger und ein zunehmender Anteil der eingetragenen Kräfte wird in andere Energieformen z.B. Wärme umgewandelt. Sobald die Molekülketten lang genug sind, um sich umeinander zu schlingen und Kontaktflächen auszubilden, steigt der Anteil der eingetragenen Kräfte, der in Wärmeenergie umgewandelt wird, rapide an. Dadurch steigt die Festigkeit des Materials. Dieser Anstieg wird durch die van der Waal'schen Kräfte, eine Art zwischenmolekulare Kohäsion, begrenzt. [KAUSCH-05] hat festgestellt, dass die Kräfte, die in nahezu vollständig orientierten Polymeren wie dem untersuchten UHMWPE zum Bruch des Materials führen, um Potenzen höher sind als die des amorphen PMMA. Das liegt daran, dass in den kristallinen Bereichen die Molekülketten selbst zu Bruch gehen müssen, damit das Material versagt. Diese Kräfte sind größer als die Reibungskräfte zwischen den Molekülen. Von [KAUSCH-05] wurden Extremfälle untersucht, die sich auf die amorphen und kristallinen Bereiche *teilkristalliner* Thermoplaste übertragen lassen.

Diesen Sachverhalt haben sich auch [HEUVEL-92] und [HEUVEL-92a] zu nutze gemacht, als sie sich bei der Erklärung des Zugkraft-Dehnungsverhaltens von PET-Garnen auf die amorphen Bereiche konzentrierten und die kristallinen Bereiche als stabile Blöcke angenommen haben.

Für das Zugkraft-Dehnungsverhalten von Polyesterfasern in Abhängigkeit von ihrer Molekülstruktur haben [HEUVEL-92] und [HEUVEL-92a] ein Modell entwickelt, dessen Gültigkeit von [VOSKAMP-01] für Multifilamentgarne und monolithische Streifen bestätigt wurde. Neuere Untersuchungen [VOSKAMP-06] zeigen, dass mit Hilfe dieses Modells das gesamte Spektrum des Zeitstandverhaltens hochkristalliner Polyestermaterialien, wie sie für die Herstellung von Geokunststoffen verwendet werden, beschrieben werden kann.



Dazu wird die Zugkraft-Dehnungslinie des PET-Materials in drei Bereiche B1 bis B3 eingeteilt, die durch die 2 Maxima der 1. Ableitung der Zugkraft-Dehnungslinie abgegrenzt werden (vgl. Abbildung 10).



**Abbildung 10** Analyse des charakteristischen Verlaufs der Zugkraft-Dehnungslinie von PET-Fasern nach [HEUVEL-92a]

Dieser differenzierte Modul  $J_s = F'(\epsilon)$  ist ein Ausdruck für eine materialtypische Steifigkeit, die einem inkrementell kleinen Sekantenmodul entlang der Zugkraft-Dehnungskurve gleichgesetzt werden kann.

Die einzelnen Bereiche B1 bis B3 in **Abbildung 10** sind von [VOSKAMP-01] wie folgt charakterisiert worden.

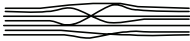
## Bereich B1



**Abbildung 11** Modell für die Molekülstruktur von PET im Bereich B1

Mit der beginnenden Zugkraftbeanspruchung kommt es zunächst zu einem teilweisen Ausrichten und Orientieren der Moleküle in den amorphen Bereichen des PET in Krafrichtung. Dies sorgt für einen Anstieg des Moduls, was sich im Anstieg der 1. Ableitung der Zugkraft-Dehnungslinie (**Abbildung 10**) widerspiegelt.

## Bereich B2



**Abbildung 12** Modell für die Molekülstruktur von PET im Bereich B2

Ist das 1. Maximum überschritten werden Verdrehungen der Moleküle selbst und Überlagerungen mit anderen Molekülen in den amorphen Bereichen aufgelöst, so dass die zwischenmolekularen Beziehungen etwas gelockert werden und ein weiterer Dehnungszuwachs mit einem geringeren Aufwand möglich ist. Das bedeutet zunächst eine Abnahme des nicht-elastischen Anteils am Modul wobei der elastische Anteil stetig zunimmt. D.h. in diesem Bereich erfolgen durch die Dehnungen teilweise irreversible Veränderungen der Polymerstruktur in den amorphen Bereichen. Der Modul steigt bis zum 2. Maximum in **Abbildung 10** an, weil mit zunehmender Dehnung  $\epsilon$  immer mehr Moleküle in Zugrichtung ausgerichtet und gestreckt werden und somit zum wachsenden Zugwiderstand beitragen.

## Bereich B3



**Abbildung 13** Modell für die Molekülstruktur von PET im Bereich B3

Wenn die Verformungen infolge der äußeren Einwirkungen das 2. Maximum erreicht haben, wird ein Teil der Molekülketten selbst oder die Vernetzung mit anderen überbeansprucht und sie beginnen zu versagen. Es kommt dabei zu Spannungskonzentrationen der Moleküle in den amorphen Bereichen, da durch die unvollständige Orientierung der Ketten über den gesamten Querschnitt der Teil der stärker orientierten Moleküle in einem größeren Umfang an der Kraftaufnahme beteiligt ist als die Strukturelemente, die relativ ungeordnet sind. [HEUVEL-92] hat berechnet dass mit Überschreiten des 2. Maximum etwa 3 % der Molekülketten in diesen überbeanspruchten amorphen Bereichen abscheren, so dass es sehr wahrscheinlich ist, dass in diesem Bereich das Versagen des ganzen Elementes beginnt.

### 2.3.2 Resümee

Die zitierten Quellen haben die Möglichkeiten für die Beurteilung von Geokunststoffen unter zyklischen Beanspruchungen erweitert. Es ist deutlich geworden, dass neben den rein mechanischen Betrachtungen, wie sie bisher im Bereich der Geotechnik durchgeführt wurden, auch analytische Verfahren aus der Polymertechnik zur Anwendung kommen sollten. Dabei kann auf die genauere Untersuchung der amorphen Bereiche der *teilkristallinen* Thermoplaste fokussiert werden. Methoden, wie die IR-Spektroskopie in Kombination mit Analyseverfahren, die Rückschlüsse auf die Molmassenverteilung  $M$  und damit auf den Grad der *Kristallinität* sowie weitere morphologische Veränderungen erlauben, könnten nach dem derzeitigen Kenntnisstand zielführend sein.

## 2.4 Konventionelle Verfahren und Methoden zur Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von Werkstoffen

### 2.4.1 Vorbemerkungen

Mit dem Wissen, dass Bauteile unter wiederholter zyklischer Beanspruchung ermüden, ist diese Arbeit entstanden. Die systematische Untersuchung der Ermüdungsvorgänge ist untrennbar mit dem Namen August Wöhler verbunden. Er hat im Jahr 1870 die später nach ihm benannten Wöhlerkurven zur Darstellung des Ermüdungsverhaltens metallischer Werkstoffe erstmals veröffentlicht [RIECHLE-00]. Im klassischen Auftrag der Wöhlerkurven wird die Mittelspannung  $\sigma_{\text{dyn,m}}$  oder die

Amplitude der Spannungen  $\sigma_a$  über die Anzahl der Lastwechsel  $N$  aufgetragen. Danach gab es eine Anzahl weiterer Ansätze, das Ermüdungsverhalten von Werkstoffen zu visualisieren, z.B. die Kurvendarstellung von Smith aus dem Jahr 1910, die bis heute angewendet wird. Er hat die Linien für die dauerhaft tolerierbare Ober- und Unterspannung eines Materials in seine Auswertung einfließen lassen [WEIBULL-61]. Bei der Recherche für diese Arbeit ist aufgefallen, dass die bereits im Jahr 1917 von Haigh entwickelten Kurven auch heute noch angewendet werden [WEIBULL-61]. Haigh-Diagramme stellen eine Schar Wöhlerkurven dar. [KENSCH-96] hat die ursprünglichen Haigh-Sonderberg-Diagramme für das Ermüdungsverhalten im Zugspannungsbereich um die Druckspannungen ergänzt.

Allen genannten Methoden ist gemeinsam, dass die Prüfungen auf einem hohen Spannungsniveau durchgeführt werden müssen um in einem überschaubaren Zeitraum zu Ergebnissen zu kommen. Deshalb ist es erforderlich das Ermüdungsverhalten durch statistische Verfahren auf das Ermüdungsverhalten unter geringeren Ausnutzungsgraden der Materialien zu übertragen. Dafür sind statistische Verteilungen und Schadensakkumulationshypothesen erforderlich. Hier haben sich die für metallische Werkstoffe verbreitete Weibull-Verteilung [KÜHLMAYER-01] und Hypothesen nach Miner etabliert [KENSCH-96a].

#### **2.4.2 Wöhlerkurven**

Zur Ermittlung der Wöhlerkurven nach dem bis heute angewendeten Wöhlerverfahren werden mindestens 6 bis 10 identische Werkstoffproben bis zum Bruch kontinuierlich mit zyklischen Spannungen beansprucht. Voraussetzung für diese geringe Probenzahl ist allerdings, dass keine nennenswerten Streuungen auftreten. Mit einem hohen Lastniveau, das relativ schnell zum Bruch führt, wird in der Regel begonnen, um dann die Lastwechsel bis zum Bruch auf niedrigeren Niveaus zu ermitteln. Dies wird solange fortgesetzt, bis eine Probe, ein so genannter Durchläufer, eine sehr hohe Anzahl an Zyklen ertragen kann ohne dass es zum Bruch kommt.



- Von der Dauerfestigkeit eines Materials kann im Bereich 3 ausgegangen werden.

Der Übergangsbereich von der Zeitfestigkeit zur Dauerfestigkeit wird bei etwa  $N = 1 \cdot 10^6$  Zyklen für weiche Stähle und etwa  $N = 3 \cdot 10^6$  Zyklen für harte Stähle erreicht. Von [SAECHTLING-01] wurde festgestellt, dass dieser Grenzwert nicht für Kunststoffe gilt. Ab etwa  $N = 10^6$  Lastwechseln beginnt sich bei dem untersuchten glasfaserverstärkten PA6 ein von der Temperatur unabhängiges Ermüdungsverhalten einzustellen.

[ZANZINGER-06] hat eine Dauerfestigkeit für thermoplastische Materialien aufgrund des visko-elastischen Verhaltens ganz ausgeschlossen. Das drückt sich in der ausgeprägten Kriechneigung dieser Werkstoffe aus, die unter Belastung einem zeitabhängigen Festigkeitsabbau unterliegen. Die Untersuchungen von [SÜRKEN-94] konnten ebenso keinen Übergang in den Bereich der Dauerfestigkeit für das untersuchte Geogitter feststellen. Für ein gewebtes Geogitter aus PET hat [ZANZINGER-06] die Wöhlerkurve in Abbildung 15 ermittelt.

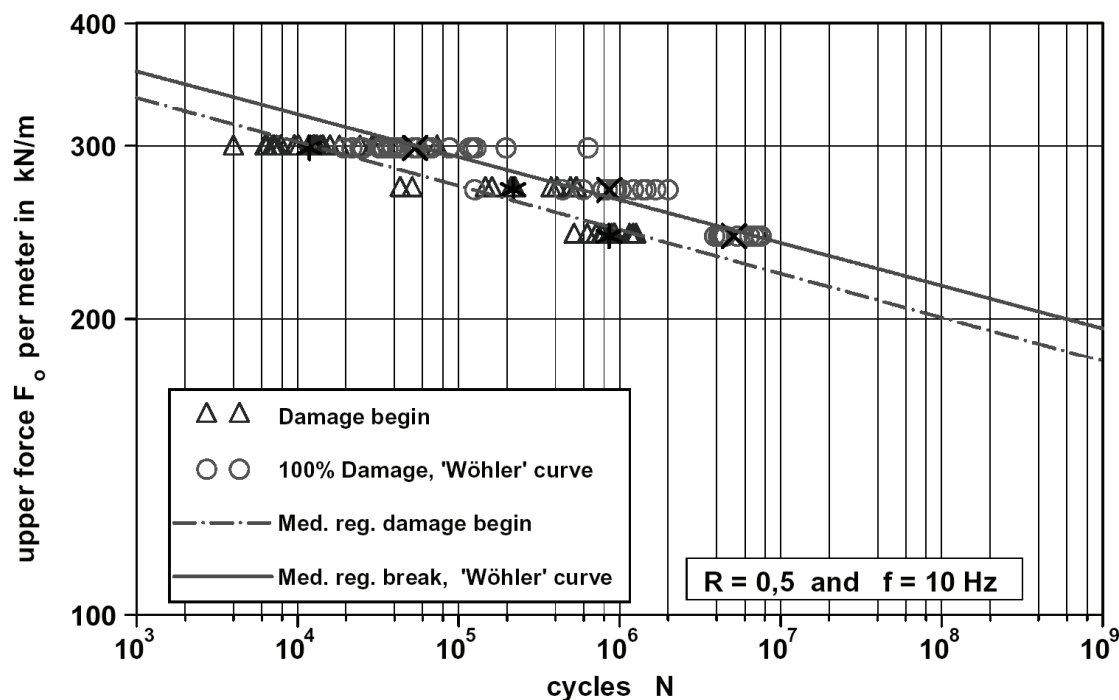


Abbildung 15 Wöhlerkurve für ein gewebtes PET – Geogitter aus [ZANZINGER-06]

Die Ergebnisse lassen keine asymptotische Annäherung an einen Grenzwert, der die Dauerfestigkeit des Materials kennzeichnet, erkennen. Zusätzlich zur Linie des Bruches hat [ZANZINGER-06] eine Schadenslinie ermittelt. Damit hat er einen Punkt aufgegriffen, der bei der Übertragung klassischer Wöhlerlinien auf Kunststoffe zu beachten ist.

Wöhlerlinien decken die Bildung und das Wachstum von Rissen bis zum Bruch von Werkstoffen ab. Kritisch zu sehen ist dabei allerdings, dass die Mechanismen hinter den Wöhlerlinien mit Gesetzen der Bruchmechanik beschrieben werden, so dass dabei nur das Wachstum der Risse, nicht aber deren Bildung mit den gängigen Betrachtungen beschrieben wird [HORNBOGEN-02].

Die dabei verwendeten linearen Zusammenhänge, wie bei der Schadensakkumulation nach der Palmgren-Miner-Regel (Gleichung 4), sind für metallische Werkstoffe, die über einen weiten Bereich ein Hooke'sches Verhalten aufweisen, geeignet.

Die Idee hinter dieser Hypothese ist, dass Bauteile eine endliche Lebensdauer besitzen. Deshalb verursachen schon geringe Belastungen eine Schädigung des Materials. Die Beanspruchung  $n_B$  kann mit zunehmender Dauer  $t$  bzw. Lastwechselzahl  $N_B$  zum Versagen führen oder wie bei dynamisch beanspruchten Bauteilen in ihrer Summe die Lebensdauer des Bauteiles bestimmen. [UNI STUTTGART-05]

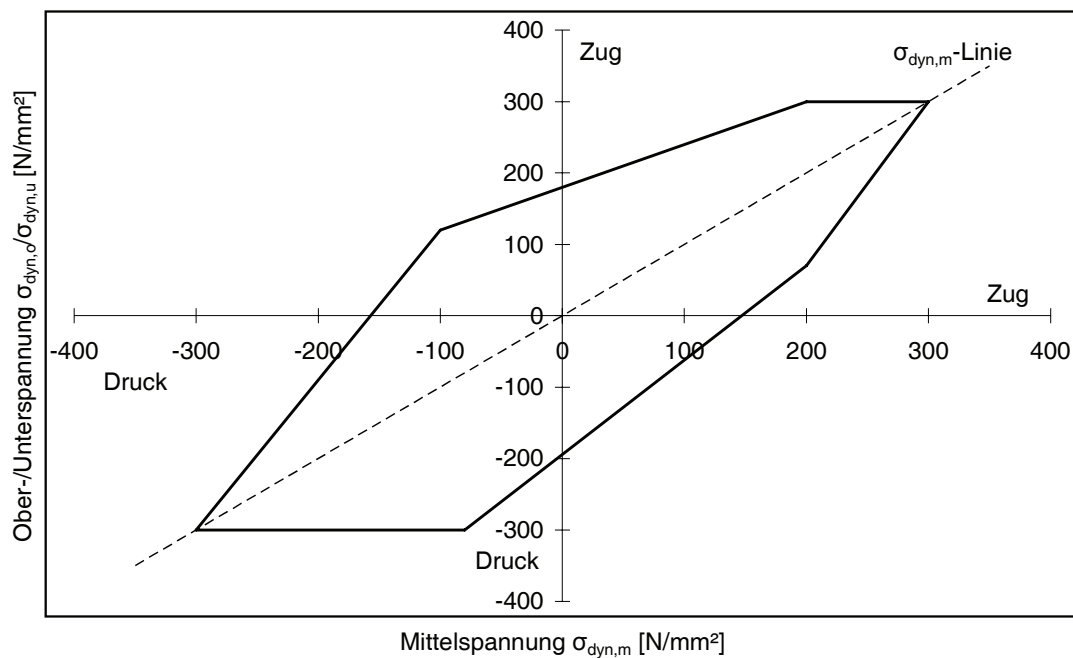
$$\sum_{B=1}^k \frac{n_B}{N_B} = 1$$

#### **Gleichung 4 Lineare Palmgren-Miner-Regel**

Da das Spannungs-Dehnungsverhalten von Kunststoffen nicht linear ist, wird die Zeitfestigkeit von Kunststoffen bei der Verwendung dieser linearen Ansätze sehr stark unterschätzt. Es kommt hinzu, dass Kunststoffe anderen Bruchmechanismen unterliegen als Metalle. Untersuchungen mit anderen Schadensakkumulationen, wie z. B. der in Gleichung 3 beschriebenen, könnten den möglichen Ausnutzungsgrad von Geokunststoffen besser beschreiben.

### 2.4.3 Smith-Diagramme

Smith-Diagramme sind eine andere Form die Ergebnisse der Wöhlerversuche zu veranschaulichen. Sie erlauben sowohl die Darstellung im Wechselbereich von Druck- und Zugbeanspruchungen als auch isolierte Betrachtungen. Im Gegensatz zu den Wöhlerkurven werden hier die Ober- und Unterspannung über der Mittelspannung  $\sigma_{\text{dyn},m}$  an einer durch den 1. und 3. Quadranten des Diagramms laufenden Gerade aufgetragen. Die Bezugslinie hat eine Neigung von  $45^\circ$ . Angegeben werden die Grenzwerte für die einzelnen Spannungen, die das Erreichen einer bestimmten Anzahl an Lastwechseln  $N$  ermöglichen oder die Dauerfestigkeit gewährleisten. Darüber hinaus kann das tolerierbare dynamische Verhältnis ermittelt werden, das mit zunehmender statischer Vorspannung (Grund- bzw. Unterspannung) abnimmt.



**Abbildung 16** Beispiel eines vereinfachten Smith-Diagramms nach [HORNBOGEN-02] und [RIECHLE-00]

Da Geokunststoffe nur auf ihre Zugfestigkeit beansprucht werden, ist lediglich der 1. Quadrant relevant. Dieser ist in Abbildung 16 grau hinterlegt. In diesem Bereich ergeben sich die Grenzlinien für die Ober- und Unterspannung wie folgt:



$$\sigma_{dyn,o} = \sigma_{dyn,m} + \sigma_A$$

$$\sigma_{dyn,u} = \sigma_{dyn,m} - \sigma_A$$

### Gleichung 5 Grenzlinien der Spannungen im 1. Quadranten

Der gute Informationsgehalt der Smith-Diagramme erfordert eine größere Anzahl an Wöhlerkurven, was die Erstellung solcher Schleifendiagramme sehr aufwendig macht. In der Regel können die Smith-Diagramme für eine große Anzahl von Bauteilen und insbesondere für Werkzeuge vereinfacht werden [RIECHLE-00]. Dort wo keine plastischen Verformungen zulässig sind, kann das Diagramm in Höhe der statischen Streckgrenze durch eine Gerade begrenzt werden.

#### 2.4.4 Haigh-Diagramme und Derivate

Das Besondere an Haigh-Diagrammen ist, dass mehrere Wöhlerlinien für verschiedene Lastwechselzahlen eingetragen werden (Abbildung 17). Zunächst wurden diese Diagramme nur für positive Mittelspannungen  $\sigma_{dyn,m}$  verwendet.

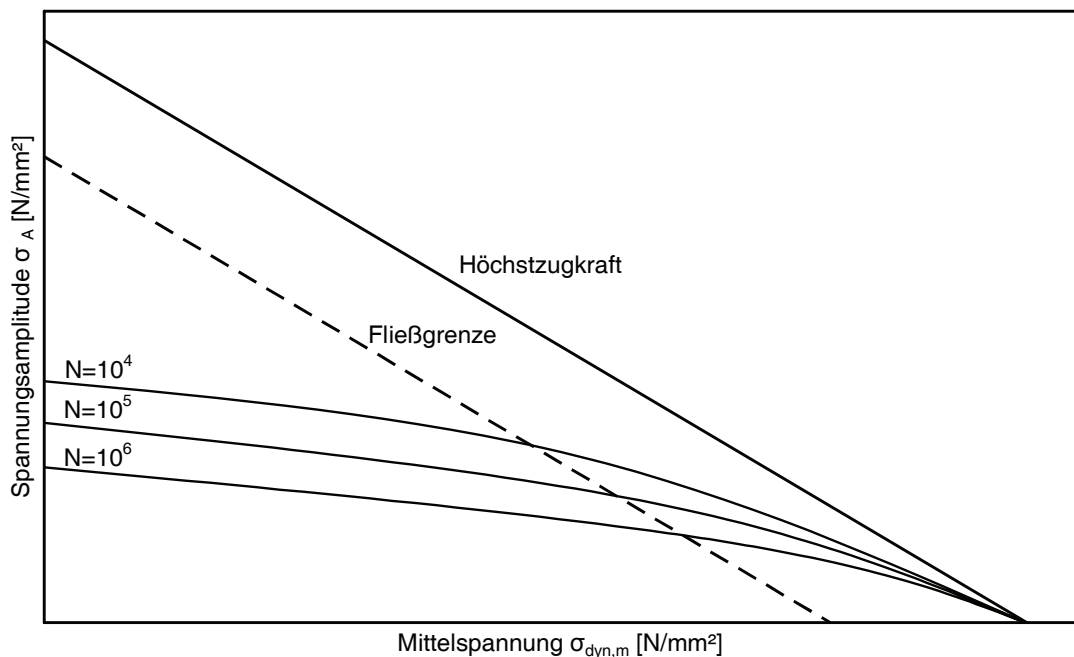
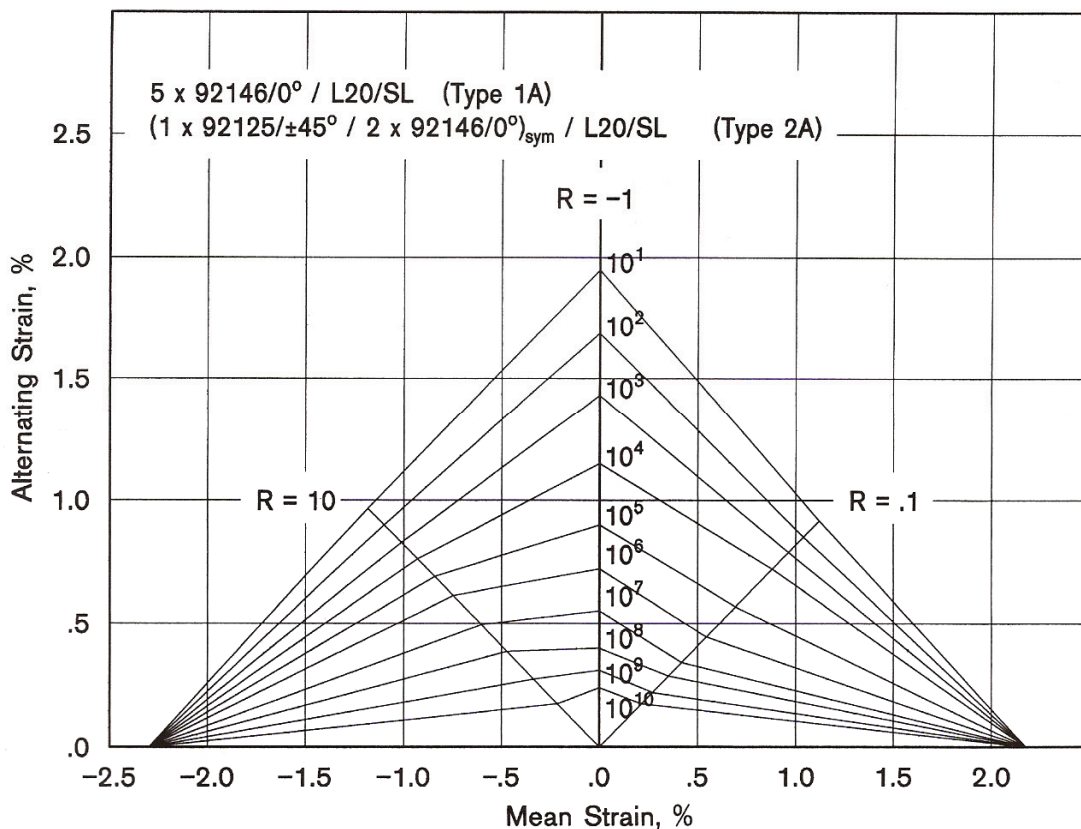


Abbildung 17 Beispiel eines Haigh-Diagramms nach [WEIBULL-61]

Den Haigh-Diagrammen eigen ist, dass sie reine Messwerte enthalten ohne dass diese im Vorfeld mit Hilfe mathematischer Gesetzmäßigkeiten aufbereitet werden [WEIBULL-61].

Die Einschränkung der Anwendbarkeit der Haigh-Diagramme liegt in der Fließgrenze der Materialien. Spannungen oberhalb der Fließgrenze können nicht für die Auswertung des Ermüdungsverhaltens mit Haigh-Diagrammen herangezogen werden. Für Analysen mit Hilfe von Haigh-Diagrammen eignen sich also nur Werkstoffe, die in ihrem Materialverhalten dem Hooke'schen Gesetz folgen, z.B. Metalle.



**Abbildung 18 Haigh-Diagramm für einen glasfaserverstärkten Kunststoff aus [KENSCHÉ-96]**

Das hat [KENSCHÉ-96] aufgegriffen und für Untersuchungen zur Lebensdauerabschätzung der Rotorblätter von Windkraftturbinen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen, neben anderen auch PET, verwendet. Da Rotorblätter während ihrer Nutzungsdauer neben Zugspannungen auch Druckspannungen bzw. entsprechenden Wechselbeanspruchungen ausgesetzt sind,

wurden die Haigh-Diagramme um negative Mittelspannungen  $\sigma_{\text{dyn},m}$  erweitert (Abbildung 18).

Bei glasfaserverstärkten Verbundstoffen dominieren die Glasfasern hinsichtlich der Festigkeit, des E-Moduls, der Bruchdehnung und anderer richtungsabhängiger Eigenschaften. Das visko-elastische Verhalten eines Bindemittels oder Füllstoffes aus PET tritt hinter dem Hooke'schen Verhalten der Glasfaserverstärkung zurück. Damit lässt sich die Anwendung der von [KENSCHKE-06] verwendeten Derivate der Haigh-Diagramme nachvollziehen. Auch die Anwendung der linearen Palmgren-Miner-Regel führte zu entsprechend realistischen Werten. Nach [KENSCHKE-06a] stimmen die mit der linearen Schadensakkumulation ermittelten Werte sehr gut mit der 95 %igen Überlebenswahrscheinlichkeit der von ihm untersuchten Materialien überein.

Das macht deutlich, dass die großen Abweichungen in der Beschreibung des Ermüdungsverhaltens von Thermoplasten auf der Basis linearer Verfahren und deren tatsächlichem Verhalten auf Diskrepanzen zwischen den Eigenschaften der Kunststoffe und den angewendeten Materialgesetzen zurückgeführt werden müssen und weniger ein positiver Sicherheitsaspekt sind.

#### 2.4.5 Weibull-Verteilung

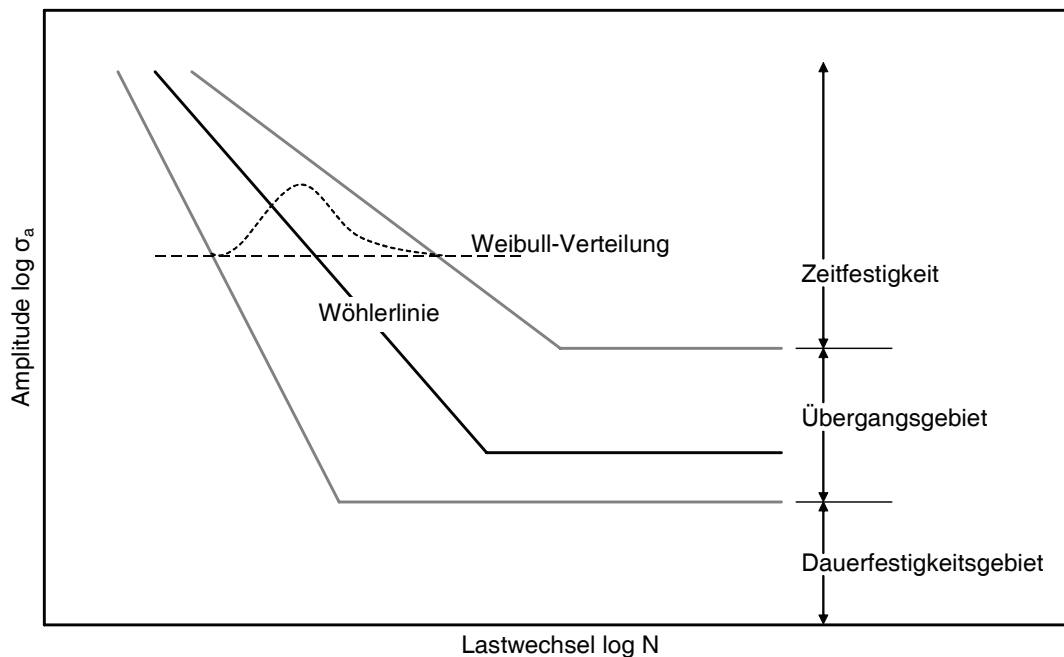
Die Zahlen der Lastwechsel  $N$  bis zum Bruch unterliegen in der Regel großen Streuungen. Deshalb ist es wichtig die Ergebnisse dieser Untersuchungen statistisch abzusichern. Bei Versuchsreihen wie den Wöhlerversuchen, die die Basis aller in diesem Abschnitt bisher vorgestellten Verfahren sind, stellen die wenigsten Lastwechsel den ungünstigsten Fall dar. Auch dieser ist, selbst wenn mit den gewählten Lastkombinationen dieser Extremwert nicht explizit ermittelt werden konnte, abzusichern. Dies kann durch Extremwertverteilungen  $F_n(x_{(n)})$ , die die Verteilung der Extremwerte einer Stichprobe angeben, erfolgen. [KÜHLMEYER-01] Zur Anwendung kommen dabei asymptotische Extremwertverteilungen. Solche Verteilungen berücksichtigen einen unendlich großen Stichprobenumfang. Eine derartige Verteilung ist die Weibull-Verteilung. Für die Anwendung seines Verfahrens empfiehlt [WEIBULL-61] einen Probenumfang von  $n \geq 50$ . Das führt zu einer signifikanten Verringerung des Fehlers im Vergleich zu  $n = 5$  oder  $n = 10$ .

Weibull hat seine Analysen im Jahre 1951 im Zusammenhang mit Lebensdauerfragen von Werkstoffen präsentiert. Die von ihm ermittelte Summenfunktion für die Lastwechsel vor dem Versagen in Ermüdungsversuchen

metallischer Werkstoffe stellt wie in Abbildung 19 eine Gerade dar. Damit ist die Weibull-Verteilung als Wahrscheinlichkeitsgesetz für die Absicherung der Lebensdauer von Werkstoffen unter zyklischen Beanspruchungen geeignet. [KÜHLMAYER-01]

Nachdem [ZILCH-02] die Weibull-Verteilung vornehmlich Zufallsvariablen für Festigkeitsgrößen bei sprödem Verhalten und dem Ermüdungsverhalten zuordnet, bietet er eine alternative eindimensionale Verteilungsfunktion an. Die Exponentialfunktion als Modell für die Verteilung für Zeiten zwischen außergewöhnlichen Lastereignissen oder eben dem Ermüdungsverhalten.

Die Anwendung der Exponentialfunktion würde der Auffassung von Coleman und Zhurkov (Gleichung 3) näher stehen.



**Abbildung 19 Weibull – Verteilung für eine Wöhlerlinie nach [KÜH-01]**

An dieser Stelle soll nicht weiter auf die heuristische Begründung und die komplexen mathematischen Grundlagen der Weibull-Verteilung oder der Exponentialverteilung eingegangen werden. Es war wichtig zu zeigen, welcher Aufwand betrieben werden muss, um mit konventionellen Verfahren, die alleine auf mechanische Vorgänge bei der Beurteilung des Ermüdungsverhaltens abstellen, verlässliche Aussagen zum Ermüdungsverhalten von metallischen Werkstoffen machen zu können. Durch die

vereinfachten linearen Modelle ist für Kunststoffe ein größerer Aufwand zu erwarten, um eine vergleichbare Qualität der Aussagen für Polymere wie für metallische Werkstoffe zu erhalten.

## 2.5 Verfahren zur chemischen Analyse von Polymeren

### 2.5.1 Vorbemerkungen

Neben den konventionellen Verfahren aus der Werkstoffkunde sollen an dieser Stelle zwei Methoden der chemischen Analytik grundlegend erläutert werden, mit denen Ergebnisse ermittelt werden können, die im Vorfeld bereits erwähnt wurden. Das sind zum einen die Zusammenhänge zwischen dem Grad der *Kristallinität* und der *Molmasse*  $M$  und zum anderen die Aussagen von [VÈVE-87] zu den einzelnen Bereichen von PET (vgl. Abbildung 9) sowie Erkenntnisse über eine sich verändernde Morphologie der Polymere während zyklischer Beanspruchungen. In welcher Form diese beiden Verfahren für die Beschreibung der zu untersuchenden Geokunststoffe zur Anwendung kamen, wird in 3.3.5.1 und 3.3.5.2 näher erörtert.

### 2.5.2 IR-Spektroskopie

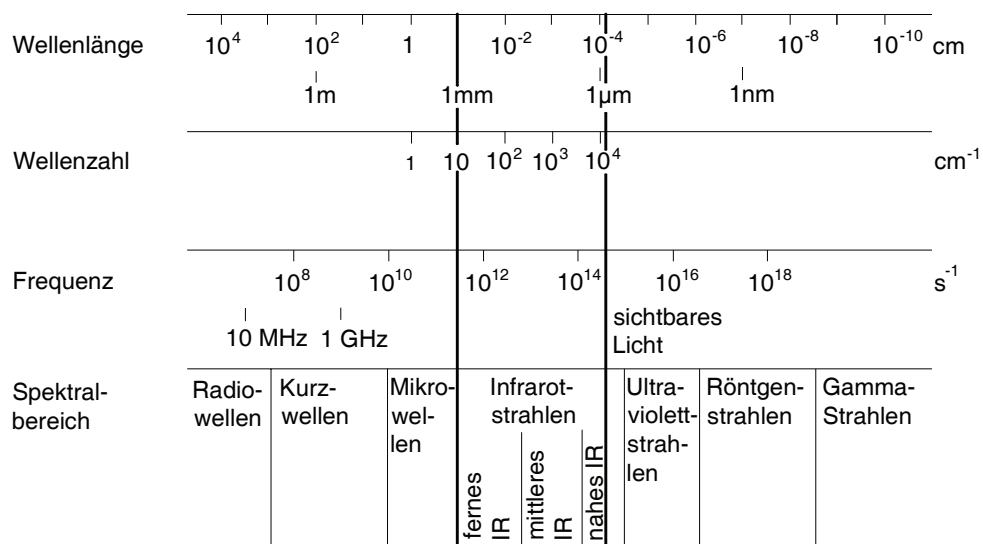
Diese Methode der instrumentellen Analytik nutzt die Anregung von Molekülschwingungen durch elektromagnetische Strahlung aus dem infraroten Spektralbereich.

Durch typische Bindungskräfte und Trägheitsmomente der Atombindungen in langkettigen Molekülen, die zu charakteristischen Energiezuständen führen, kann durch Rotations- und Schwingungsspektren auf die Größe der Moleküle, deren Verzweigung, ihre *Kristallinität*, *Taktizität* und *Isomerie* geschlossen werden [COWIE-97].

Die Spektren entstehen durch Energiedifferenzen der Schwingungs- oder Rotationszustände und können sowohl als Absorption oder Emission registriert werden. Da der Nachweis emittierter Strahlung wesentlich anspruchsvoller ist, werden generell IR-Absorptionsspektren betrachtet. Das zu untersuchende Material wird dafür von einer kontinuierlichen IR-Strahlung be- oder durchstrahlt. Sobald die elektromagnetischen Schwingungen und die Frequenz der Rotations- und Schwingungsübergänge übereinstimmen, werden die Moleküle angeregt, so dass sich eine resonante Energieabsorption einstellt. Da die kontinuierliche IR-Strahlung

durch einen *Monochromator* in ihre einzelnen Frequenzen zerlegt wird, kann die Energieabsorption den einzelnen Frequenzbereichen zugewiesen werden. [LENK-89]

Der Bereich der infraroten Strahlen umfasst die Wellenlängen  $\lambda$  von etwa 780 nm bis 1 mm (Abbildung 20). Für die IR-Spektroskopie wird im Allgemeinen der Bereich zwischen 1  $\mu\text{m}$  und 25  $\mu\text{m}$  genutzt [HELLERICH-01], d.h. die Analysen werden vornehmlich mit nahen Infrarotstrahlen durchgeführt. Davon ist der  $\lambda$ -Abschnitt von 6,67  $\mu\text{m}$  bis 12,50  $\mu\text{m}$  der so genannte „finger print“-Bereich, da sich hier die größten Abweichungen zwischen den Polymeren finden lassen [COWIE-97]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Absorptionsspektren der untersuchten Polymere für Wellenlängen  $\lambda$  zwischen 2,5  $\mu\text{m}$  und 15  $\mu\text{m}$  aufgezeichnet. Das entspricht den in den Abbildungen ausgewiesenen Wellenzahlen  $\nu$  von 4000  $\text{cm}^{-1}$  bis 650  $\text{cm}^{-1}$ .



**Abbildung 20** Elektromagnetisches Spektrum nach [GÜNZLER-03]

Die Wellenzahl  $\nu$  hat sich in der IR-Spektroskopie als der reziproke Wert der Wellenlänge  $\lambda$  etabliert. Als wichtigstes Argument dafür wird von [GÜNZLER-03] die Proportionalität der Wellenzahl zur Frequenz  $\tilde{\nu}$  des Lichtvektors (Gleichung 6) angeführt.

$$\nu = \frac{\tilde{\nu}}{c_n}$$

**Gleichung 6 Definition der Wellenzahl  $\nu$** 

Um die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$  den Messungen in einem bestimmten Medium anzupassen und Fehler bei der Auswertung zu vermeiden, ist der Brechungsindex  $n_x$  des jeweiligen Mediums nach Gleichung 7 zu berücksichtigen. Dadurch ergibt sich eine geringere Lichtgeschwindigkeit  $c_n$  in einem Medium als im Vakuum.

$$c_n = \frac{c_0}{n_x}$$

**Gleichung 7 Lichtgeschwindigkeit in einem mit Materie gefüllten Raum**

Auch wenn physikalisch der Begriff Absorption  $A_{IR}$  für die Aufnahme der Strahlungsenergie durch ein Medium steht, wird als gängiger Begriff in der Spektroskopie die Durchlässigkeit  $D_{IR}$  verwendet. Sie ist Ausdruck des vom Probekörper nicht absorbierten Anteils der Strahlung. Daraus ergibt sich die Definition der Durchlässigkeit  $D_{IR}$ .

$$D_{IR} = 1 - A_{IR}$$

**Gleichung 8 Definition der Durchlässigkeit  $D_{IR}$** 

Für die Identifikation von Polymeren kann auf eine Vielzahl veröffentlichter Messungen zurückgegriffen werden. So kann mit heute zur Verfügung stehenden Informationstechnologien ein elektronischer Vergleich der selbst aufgezeichneten Absorptionsbanden mit katalogisierten Vergleichsspektren durchgeführt werden. Das ist auch die Grundlage so genannter Atlanten für Absorptionsspektren in denen die Peaks der verschiedenen Absorptionsbanden bei den jeweiligen Wellenzahlen  $\nu$

beschrieben werden. Für diese Arbeit wurde die Zusammenstellung von [SOCRATES-01] verwendet.

### 2.5.3 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Von den thermischen Analysen, die es erlauben, aus der Abhängigkeit des Verhaltens eines Kunststoffes von der Temperatur oder der Zeit, auf physikalische und chemische Eigenschaften zu schließen, wurde die Dynamische Differenzkalorimetrie ausgewählt. Dabei wird die für eine Stoffumwandlung erforderliche bzw. die dabei entstehende Wärmemenge bestimmt. Dies hat Einfluss auf die innere Energie eines Stoffes. Die innere Energie eines Stoffes unter konstantem Druck wird als Enthalpie bezeichnet. Für die Auswertung von DSC – Kurven ist die Enthalpieänderung  $\Delta H$  zwischen zwei Zuständen interessant:

$$\Delta H = \int c_p \cdot dT$$

#### Gleichung 9 Enthalpieänderung

Die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  ist Ausdruck für die Wärme, die aufgewendet werden muss um 1 g der untersuchten Substanz um 1 K bei konstantem Druck zu erwärmen. Während der Änderung der Enthalpie  $\Delta H$  werden endotherme und exotherme Prozesse unterschieden.

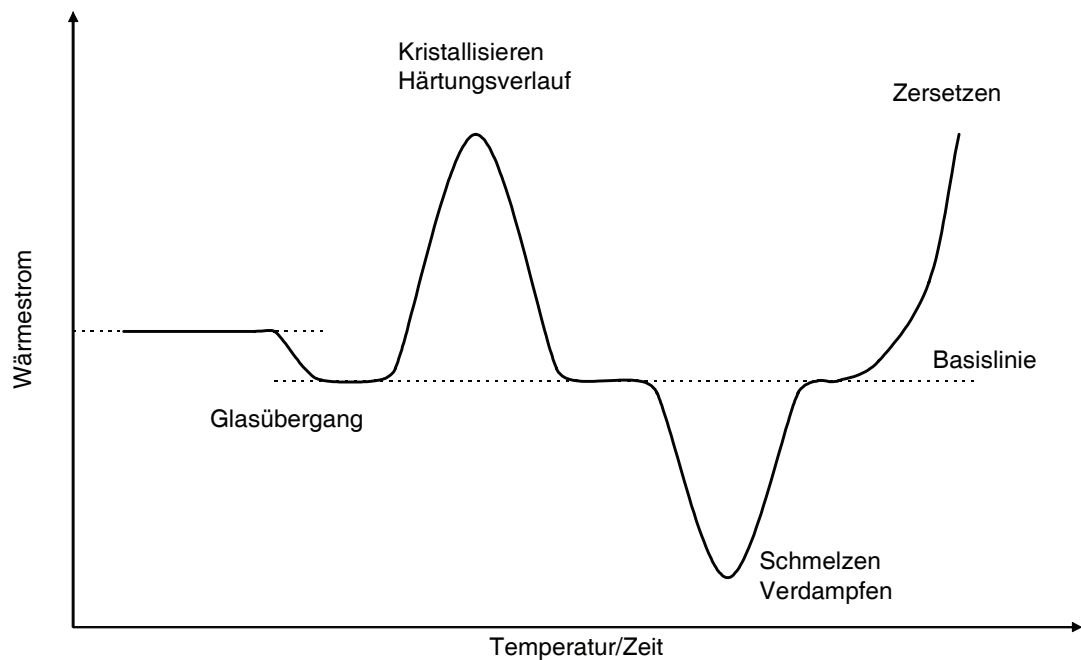
Endotherme Vorgänge führen zu einer Erhöhung der Enthalpie und exotherme führen zu einer niedrigeren Enthalpie.

**Tabelle 3** Mögliche Ursachen für Übergangsbereiche der DSC – Kurve

Endotherme Vorgänge	Exotherme Vorgänge
Schmelzen	Kristallisation
Verdampfen	Härtungsverlauf
Glasübergang	Zersetzen

Abbildung 21 ist eine schematische Darstellung der einzelnen Vorgänge in einer DSC – Kurve als Abweichung von der Basislinie.





**Abbildung 21** Prinzipdarstellung einer DSC – Kurve und möglicher Effekte nach [EHRENSTEIN-03]

Die Basislinie ist eine fiktive Linie, die entstehen würde, wenn keine Reaktionswärme freigesetzt oder aufgenommen worden wäre. [HEMMINGER-89]

Die Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  ist sehr aufwendig. Alternativ wird der Wärmestrom  $\dot{Q}$  als Wärmemenge der Masse  $m$  je Zeiteinheit gemessen. Diese ist proportional zur Wärmekapazität  $c_p$ . Der Proportionalitätsfaktor in Gleichung 10 ist die Heizrate  $v_h$ .

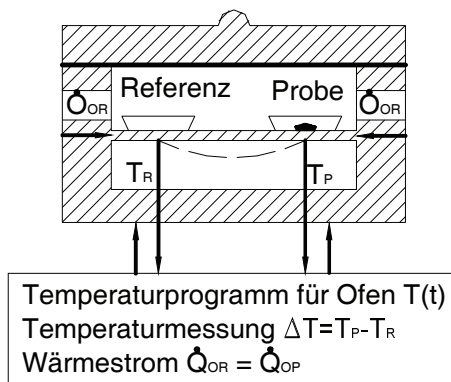
$$\frac{\dot{Q}}{m} = v_h \cdot c_p$$

**Gleichung 10** Einfluss von Masse und Heizrate

### 2.5.3.1 Messprinzip

Das zur Verfügung stehende Gerät DSC 821e der Firma Mettler Toledo arbeitet nach dem Verfahren der Dynamischen Differenzkalorimetrie. Dabei befinden sich die zu

untersuchende Probe und das Referenzmaterial in einer Kammer des Ofens. Somit werden beide dem gleichen Temperaturprogramm unterzogen. Sofern die Materialien dem Temperaturprogramm in gleicher Weise folgen, sind die Wärmeströme von der Heizquelle in das Probe- und das Referenzmaterial konstant. Das trifft dann auch für die Temperaturdifferenz zu. Sollte sich z.B. eine Verzögerung der Erwärmung für das Probenmaterial ergeben, dann würde die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zu einer Wärmestromänderung  $\Delta \dot{Q}$  führen.



**Abbildung 22** Prinzip eines Wärmestrom-Differenzkalorimeters

### 2.5.3.2 Übergangsbereiche

#### 2.5.3.2.1 Glasübergangsbereich

Die Glasübergangstemperatur  $T_g$  ist eine Größe um Kunststoffe zu charakterisieren und zu identifizieren. Sie kennzeichnet den Übergang vom Glas- in den kautschukelastischen Zustand amorpher und nicht vollständig kristallin strukturierter Polymere. Unterhalb dieser Temperatur haben die Molekülketten quasi keine Bewegungsfreiheit. Erst oberhalb der Glasübergangstemperatur wird so viel thermische Energie zugeführt, dass sich die Molekülketten kooperativ bewegen können. [COWIE-97]

Idealkristalline Polymere, so genannte Kristallite, haben keinen Glasübergangsbereich und auch keine charakteristische Glasübergangstemperatur  $T_g$ . *Teilkristalline* Polymere vereinen beide Strukturelemente, die amorphen und die kristallinen Bereiche, in sich. In den amorphen Bereichen gilt das von [COWIE-97] beschriebene Phänomen uneingeschränkt. In den kristallinen Bereichen wird die

Mobilität der beweglichen Molekülketten durch benachbarte, orientierte Strukturen eingeschränkt. In diesen Bereichen hat das Polymer eine optimierte Lagerungsdichte. Deshalb muss bei einem höheren prozentualen Anteil kristalliner Bereiche in einem Polymer mehr thermische Energie zugeführt werden, um eine vergleichbare Beweglichkeit der Molekülketten zu ermöglichen wie bei geringerer *Kristallinität* desselben Polymers. Das bedeutet dass die Höhe der Glasübergangstemperatur  $T_g$  vom Grad der *Kristallinität* abhängt und mit ihr zunimmt.

Ein weiterer Zusammenhang mit der Glasübergangstemperatur lässt sich für die *Molmasse*  $M$  eines hochmolekularen Polymers herstellen. [COWIE-97] führt das auf die Tatsache zurück, dass freie Kettenenden mehr *freies Volumen* benötigen als Segmente innerhalb der Molekülketten. Von daher haben Kettenenden mehr Bewegungsfreiheit, die sie mit zunehmender thermischer Energie nutzen können, als die übrigen Abschnitte der Molekülketten. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass kurzkettige Polymere weniger thermische Energie für den Übergang in den kautschukelastischen Bereich benötigen und somit auch eine geringere Glasübergangstemperatur  $T_g$  haben. Das heißt aber auch, dass ein Aufspalten von langkettigen Polymeren durch Alterung oder äußere Einwirkungen zu einer Verringerung der *Molmasse*  $M$  führt und damit auch zu einer niedrigeren Glasübergangstemperatur  $T_g$ .

#### 2.5.3.2.2 Schmelzen

Für polymere Werkstoffe eine feste Schmelztemperatur anzugeben, die sie charakterisiert, würde deren vollkommene *Kristallinität* voraussetzen. Da dem nicht so ist, erstreckt sich das Schmelzen als ein Prozess, der eine Volumenänderung zur Folge hat, über einen Temperaturbereich. [COWIE-97] listet die folgenden Einflussfaktoren für das Schmelzen auf:

- Kristallitgröße / Kristallinitätsgrad
- *Molmasse*
- Symmetrie
- *Taktizität*
- Verzweigung
- Intermolekulare Bindungen

Vor dem Hintergrund, dass mit den analytischen Methoden Geokunststoffe vor und nach einer zyklischen Beanspruchung verglichen werden sollten, werden hier

lediglich Veränderungen des Kristallinitätsgrades und einer damit einhergehenden Molmassenänderung betrachtet.

Messbare Veränderungen der anderen Einflussgrößen hätten die mechanischen Eigenschaften so deutlich verändert, dass die Restfestigkeit  $R_{B,k1}$  der untersuchten Geokunststoffe signifikant niedriger gewesen wäre als ermittelt.

Der Temperaturbereich, in dem ein Polymer schmilzt sagt etwas über den Grad der *Kristallinität* und die Größe der *kristallinen Bereiche* aus. [COWIE-97] zitiert dazu Untersuchungen, die entsprechende Abhängigkeiten erkennen lassen. Demnach schmelzen Polymere mit kleinen *kristallinen Bereichen* eher als die mit größeren. Des Weiteren führt ein geringerer Kristallisationsgrad zu einer Verbreiterung des Schmelzbereiches.

Dies wird in der gleichen Quelle auf einen Überschuss an freier Energie in den Grenzflächen zwischen den kristallinen und den ungeordneten amorphen Bereichen zurückgeführt. Dort reichen die freien Enden der Molekülketten aus den *kristallinen Bereichen* in die amorphe Struktur hinein. Relativ verursachen viele kleine Grenzflächen einen größeren Überschuss und somit niedrigere Schmelztemperaturen. Schmelzen ist hier als ein Prozess zu sehen, der die Beweglichkeit der Molekülketten erhöht. Daher begünstigen bewegliche Anteile der Struktur den Schmelzprozess.

Aus dem gleichen Grund fördert auch die Abnahme der *Molmasse*  $M$  den Schmelzvorgang und führt zu niedrigeren Schmelztemperaturen. Zum einen ist die Anzahl der Kettenenden erhöht und zum anderen können kürzere Ketten mit weniger Energieaufwand bewegt werden.

Unter diesem Gesichtspunkt wurden die beiden Einflussfaktoren für das Schmelzen, die *Kristallinität* und die *Molmasse*  $M$  eines Polymers, über die DSC - Kurven der jeweiligen Polymere verglichen. Beide können durch mechanische Beanspruchung während des Versuches, also Nachkristallisation oder das Aufbrechen von Molekülketten, Alterung durch *Oxidation* oder *Hydrolyse*, verändert worden sein.

### 2.5.3.3 Einflussgrößen

#### 2.5.3.3.1 Einwaagemenge

Für unterschiedliche thermische Vorgänge sind nach [EHRENSTEIN-03] und [HATAKEYAMA-99] auch unterschiedliche Mengen Probenmaterial erforderlich. Dies

kann insbesondere bei *teilkristallinen* Thermoplasten, wie den hier untersuchten, zu einer veränderten Wärmestromleitung nach dem Schmelzen führen. Dies wiederum spiegelt sich in einer unklaren Basislinie wieder. Zudem führt der langsamere Wärmestrom durch die größere Probenmenge zu breiteren Schmelzbereichen, was wiederum zu Ungenauigkeiten bei der Festlegung der Peaktemperaturen führt. Die Festlegung der Probenmenge erfolgte gemäß 3.3.5.2.

Der Einfluss der Probenbeschaffenheit auf die Wärmeleitung über die Tiegelwand etc. wurde bei den durchgeführten Versuchen nicht weiter berücksichtigt, da gleichartiges Probenmaterial aus den zyklischen Versuchen miteinander verglichen werden sollte und deshalb vergleichbare Ausgangszustände gegeben waren.

#### 2.5.3.3.2 Heiz- und Kühlrate

Auch hinsichtlich der Heizrate  $v_h$  geben [EHRENSTEIN-03] und [HATAKEYAMA-99] praxisrelevante Hinweise. Die Heizrate  $v_h$  beeinflusst demnach nicht nur die Versuchsdauer, sondern auch die Aussagekraft der Wärmestromkurve für die verschiedenen Effekte unterschiedlich. Gleichung 10 beschreibt die direkte Proportionalität zwischen Wärmestrom  $\dot{Q}$  und Heizrate  $v_h$ . Das bedeutet, dass eine höhere Heizrate  $v_h$  zu einem größeren Wärmestrom  $\dot{Q}$  führt und somit auch weniger ausgeprägte Effekte sichtbar gemacht werden können.

Dies ist besonders für die Feststellung des Glasübergangspunktes interessant, der wie in Abbildung 21 über den Versatz der Basislinie ermittelt wird.

Die Heizrate  $v_h$  ist eine wichtige Einflussgröße beim Vergleich von Messungen der Glasübergangstemperatur  $T_g$ , da sich die Stufe in der Kurve mit zunehmender Heizrate  $v_h$  zu höheren Temperaturen hin verschiebt.

Eine große Heizrate  $v_h$  führt zu einer geringeren Auflösung der Schmelzpeaks, so dass eng nebeneinander liegende Schmelzpeaks nicht in jedem Fall ausreichend visualisiert werden. [HEMMINGER-89]

Neben der Heizrate  $v_h$  hat auch die Kühlrate  $v_k$  Einfluss auf die Ausprägung des Glasüberganges im 2. Zyklus des Aufheizens. Hier verursachen sehr geringe Kühlraten von  $v_k = 1$  K/min ein ausgeprägtes Maximum im Vergleich zu Kühlraten von  $v_k = 10$  K/min oder mehr. Der Unterschied zwischen üblichen  $v_k = 10$  K/min und  $v_k = 100$  K/min ist dagegen nicht so signifikant. Eine zu hohe Kühlrate  $v_k$  kann zu einer Verschiebung der Temperaturen, insbesondere der der Kristallisationskurve hin zu niedrigeren Niveaus zur Folge haben. Deshalb sind gerade bei vergleichenden

Untersuchungen zur Beurteilung des Kristallisationsverhaltens gleiche Kühlraten  $v_k$  zu verwenden.

Speziell bei *teilkristallinen* Thermoplasten kann es durch die Aufheizung während der thermischen Analyse zur Nach- oder Umkristallisation kommen. Diese Kunststoffe weisen eine *metastabile Struktur* auf. Dadurch laufen Umwandlungsprozesse wie die Kristallisation mit einer zeitlichen Verzögerung zu den äußeren Bedingungen, hier der Temperatur, ab. Durch eine ausreichend große Heiz- und Kühlrate kann die Dauer der Analyse auf einen Zeitraum beschränkt werden, der zur Nach- oder Umkristallisation nicht ausreichend ist. Eine Nach- oder Umkristallisation hätte einen Anstieg der Schmelzenthalpie  $\Delta H$  zur Folge. [EHRENSTEIN-03]

Für die Stabilität der *teilkristallinen* Struktur im Sinne dieses Abschnittes ist zudem die thermische Vorgeschichte der Geokunststoffe maßgebend. Von daher können hier nur Polymere aus gleichen Produkten miteinander verglichen werden.

### **3 Eigene Untersuchungen**

#### **3.1 Herleitung der zyklischen Beanspruchung der Geokunststoffe für die eigenen Versuche**

##### **3.1.1 Vorbemerkungen**

Die durchgeführten Versuche sollen eine Aussage über die Nutzungsdauer von Geokunststoffen unter zyklischen Beanspruchungen erlauben. Deshalb wurden die Versuchsrandbedingungen auf die geotechnischen Erfordernisse abgestimmt.

Dazu waren Festlegungen bezüglich:

- der Anzahl der Lastwechsel  $N$ ,
- des dynamischen Verhältnisses  $R$  und
- der Frequenz  $f$

erforderlich.

Hauptaugenmerk wurde dabei auf die größten, regelmäßig auftretenden Beanspruchungen aus dem Eisenbahnverkehr gelegt, da diese die zyklischen Einwirkungen des Lkw-Verkehrs deutlich übersteigen. Die dynamischen Beanspruchungen, die unter Maschinenfundamenten entstehen können, wurden auf Grund ihrer unterschiedlichen Charakteristika nicht explizit berücksichtigt.

Da die Anzahl der Peaks transienter Ereignisse (Abbildung 3) bei Erdbeben typischerweise zwischen 5 und 30 liegt [STUDER-97], also sehr klein ist, wurden derartige Einwirkungen in diesem Versuchsprogramm nicht berücksichtigt.

An diesem Abschnitt wird erneut die besondere Herausforderung interdisziplinärer Arbeiten ersichtlich. Wie schon in den vorangegangenen Ausführungen zu anderen Gebieten, haben hier ebenfalls nur grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Baugrunddynamik Eingang in die Ableitung der geotechnischen Randbedingungen für die durchgeführten Versuche gefunden. Mit dieser Vorgehensweise sollen das maßgebliche dynamische Verhältnis  $R$  und nicht die durch die tatsächliche zyklische Beanspruchung über den Boden in die Geokunststoffbewehrungen eingetragenen nominellen Kräfte ermittelt werden. Es soll nicht den Ergebnissen der laufenden Forschungen an der TU Bergakademie Freiberg vorgegriffen werden, die sich explizit mit dieser Problematik beschäftigen. Die Einbettung dieser Arbeit wurde aber kontinuierlich abgestimmt.

Die Art und Weise der Ermittlung der Bemessungszugfestigkeit der Bewehrungselemente geokunststoffbewehrter Bauwerke nach Gleichung 11 macht es möglich, die nominellen Kräfte bei der hier vorgestellten versuchstechnischen Ermittlung des Ermüdungsverhaltens auszublenden. Ausgangspunkt der Gleichung 11 ist die Kurzzeitzugfestigkeit  $R_{B,k0,5}$  des Geokunststoffes.

$$R_{B,kd} = \frac{R_{B,k0,5}}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot \gamma_B}$$

**Gleichung 11 Ermittlung der Bemessungszugfestigkeit von Geokunststoffbewehrungen aus [DGGT-07]**

Die einzelnen Abminderungsfaktoren  $A_1$  bis  $A_5$  werden als jeweiliges Verhältnis zwischen der charakteristischen Kurzzeitzugfestigkeit  $R_{B,k0}$  und der Festigkeit nach den jeweils zu berücksichtigenden Einwirkungen  $R_{B,ki}$  ermittelt (Gleichung 12).

$$A_i = \frac{R_{B,k0}}{R_{B,ki}}$$

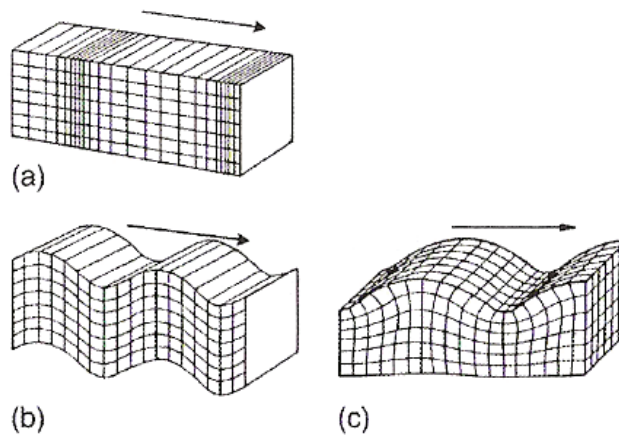
**Gleichung 12 Ermittlung von Abminderungsfaktoren**

Danach ist durch die angesetzte charakteristische Kurzzeitzugfestigkeit  $R_{B,k0}$  jeder Abminderungsfaktor  $A_i$  eine Extremwertbetrachtung für den Geokunststoff. Dieses System hat eine hohe inhärente Sicherheit und ermöglicht Vereinfachungen, wie sie auch auf die Ermittlung der zyklischen Beanspruchungen angewendet werden können. Für die Ermittlung des Abminderungsfaktors ist somit hinsichtlich der Zugkraft lediglich das dynamische Verhältnis  $R$  erforderlich. Es bestimmt in Abhängigkeit von der Kurzzeitzugfestigkeit  $R_{B,k0}$  des Geokunststoffes die aufnehmbaren Kräfte. Der Entwurfsverfasser einer KBE-Konstruktion kann dann anhand der Produktpalette mit den unterschiedlichen Kurzzeitzugfestigkeiten  $R_{B,k0,5}$  der am Markt erhältlichen Geokunststoffe und der nach Gleichung 11 ermittelten Bemessungszugfestigkeit das Material auswählen, dass den tatsächlich auftretenden Kräften den notwendigen Widerstand entgegensetzen kann, um die Standsicherheit des Bauwerkes zu gewährleisten.



Dabei ist es letztendlich nachrangig, ob die Lasteinwirkung vertikal oder horizontal ist, da für die Aktivierung der Bewehrung eine Kraftübertragung in den Geokunststoff erfolgen muss. Diese kann nur durch eine Relativverschiebung im Korngerüst des Bodens in unmittelbarer Nähe der Bewehrungslage erfolgen. Zur Erklärung der Ausbreitung und Fortpflanzung der Einwirkungen von der Induktionsquelle bis hin zum Geokunststoff können Theorien zu Wellen im Boden und ihre Ausbreitung im elastischen Halbraum herangezogen werden.

Nach [DGGT-02] lässt sich die Ausbreitungscharakteristik der Einwirkungen im Nahfeld der Induktionsquelle auf Raumwellen, also Kompressions- und Scherwellen nach Abbildung 23 beschränken.



**Abbildung 23 Wellentypen: (a) Kompressions- oder P-Welle, (b) Scher- oder S-Welle, (c) Rayleigh- oder R-Welle aus [DGGT-02]**

Oberflächenwellen in Form der Rayleigh-Wellen dominieren die Ausbreitung der Einwirkung im Fernfeld. Als Grenze zwischen Nah- und Fernfeld definiert [DGGT-02] eine Wellenlänge  $\lambda_R$  der oberflächennahen R-Wellen. [BRÄU-03] hat unter Annahme eines elastischen Halbraumes die R-Wellenlänge  $\lambda_R$  für mitteldichte Sande bis hin zu dichten sandigen Kiesen mit den Dichten dieser Böden und charakteristischen Frequenzen  $f$  zwischen 2 Hz und 20 Hz nach Gleichung 13 ermittelt.

$$\lambda_R = \left( \frac{G}{\rho} \right)^{0,5} \cdot f^{-1}$$

### Gleichung 13 Wellenlänge von Rayleigh- bzw. R – Wellen nach [BRÄU-03]

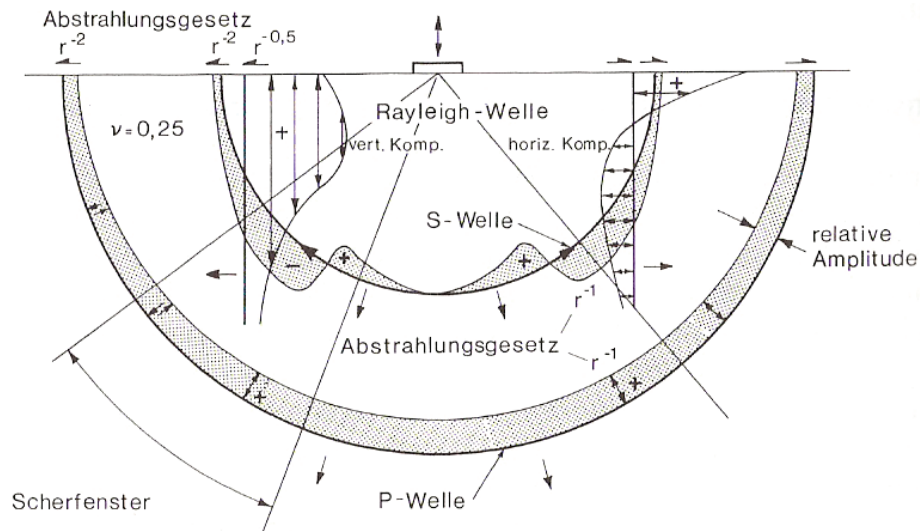
Die von [BRÄU-03] ermittelten Wellenlängen  $\lambda_R$  lagen zwischen 11 m und 68 m. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich Geokunststoffbewehrungen regelmäßig im Nahbereich der Induktionsquellen befinden, deren eingetragene Spannungen sie aufnehmen sollen. Für die Aktivierung der Bewehrung unter zyklischen Beanspruchungen sind deshalb P-Wellen und S-Wellen zu analysieren.

Beide Wellenarten breiten sich in einem relativ homogenen Baugrund über das Korngerüst des Bodens aus. Grundwasser oder Porenwasser beeinflussen den Baugrund derart, als würden geschichtete Verhältnisse vorliegen [STUDER-97]. Interessanterweise hat dies nicht nur Einfluss auf die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit sondern auch auf Wellenreflektion und -refraktion. Innerhalb eines wassergesättigten Bodens werden Wellen nicht nur über das Korngerüst sondern auch durch das Wasser übertragen. An dieser Stelle sei noch einmal auf die Relativverschiebungen verwiesen, die notwendig sind um Kräfte in die Bewehrungslagen einzuleiten. Wasser kann keine Relativverschiebungen des Korngerüsts erzeugen und deshalb auch die erforderlichen Relativverschiebungen nicht übertragen oder weiterleiten. Somit wird Wasser zum „Filter“ für Wellen, die Relativverschiebungen im Korngerüst verursachen können.

Nach [STUDER-97] kann Wasser in gesättigten Böden keine S-Wellen übertragen. Damit stammt die messbare Wellenbewegung des Porenwassers aus der Anregung mit P-Wellen.

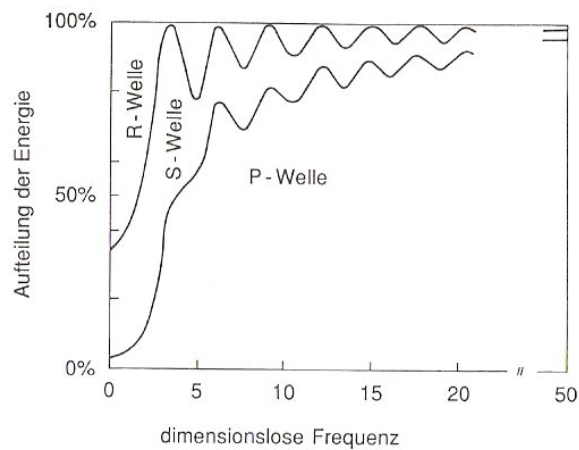
Diese Interpretation deckt sich mit der Auffassung von [POCANSCHI-03], dass P-Wellen nur zu Kompressionen und Dilatationen im Boden führen und S-Wellen hingegen Biege- und Scherkräfte erzeugen. S-Wellen können Relativverschiebungen verursachen.

Wenn Geokunststoffbewehrungen durch zyklische Einwirkungen aktiviert werden, dann geschieht dies primär durch S-Wellen.



**Abbildung 24** Wellentypen an einer vertikal schwingenden Punktquelle aus [STUDER-97]

Abbildung 24 zeigt noch einmal die Ausbreitung der drei genannten Wellentypen und die Orientierung ihrer Amplituden im elastischen Halbraum. Ergänzend dazu ist in Abbildung 25 die durch die einzelnen Wellentypen in den Halbraum abgestrahlte Energie quantifiziert. [STUDER-97] zitiert hier Werte für eine Poisson-Zahl des Bodens von  $\mu = 0,33$  in Abhängigkeit einer dimensionslosen Frequenz.



**Abbildung 25** Aufteilung der in den unendlichen Halbraum abgestrahlten Energie der drei Wellentypen aus [STUDER-97]

Die von [BRÄU-03] und [ZILCH-02] aus unterschiedlichen Quellen zitierten und in Tabelle 4 zusammengefassten analytischen Betrachtungen für die Energieverteilung nach den Wellentypen passen ebenfalls zu den Analysen in Abbildung 25.

**Tabelle 4 Energieverteilung nach Wellentypen**

Wellentyp	Energieanteil aus [BRÄU-03]	Energieanteil aus [ZILCH-02]
P-Welle	7 %	7 %
S-Welle	28 %	26 %
R-Welle	67 %	67 %
	$\Sigma$ 102 %	$\Sigma$ 100 %

Die erhöhte Gesamtsumme der Energien in Tabelle 4 für die Werte aus [BRÄU-03] kann an dieser Stelle nicht erklärt werden. Sie ist möglicherweise auf die für die analytischen Betrachtungen verwendeten Modelle zur Ermittlung der Energieverteilung oder einfach einen Druckfehler zurückzuführen.

[BRÄU-03] stellt für die Energieverteilung zwar auf das Fernfeld ab, da dort die Energie der R-Wellen erst wieder relevant wird, doch der Energieanteil selbst wird bereits bei der Entstehung der Welle aufgenommen.

In jedem Fall ist aber zu berücksichtigen, dass Verkehrswege Linienbauwerke sind und dass die Induktionsquellen nicht örtlich fixiert sind, sondern dem Fahrzeug folgen. Daraus können nach [KATZENBACH-05] zwei kurzzeitdynamische Stabilitätsprobleme erwachsen:

- Ausbildung einer als stoßförmig registrierbaren Welle in Form einer R-Welle vor dem fahrenden Zug
- Resonanz zwischen Eigenfrequenz einer gering tragfähigen Bodenschicht und der Erregung durch den Zug

Sofern die Betrachtung auf die Geokunststoffbewehrung reduziert wird, haben diese Punkte aus folgenden Gründen keine Auswirkungen:

Unabhängig von der Zuggeschwindigkeit bilden sich R-Wellen als horizontale Wellen eigentlich nur an der freien Oberfläche aus [ZILCH-02]. Ihre Tiefenwirkung ist sehr gering und kann in der Regel Schichtgrenzen wie Schotteroberbau-/Frostschutzschicht bzw. feste Fahrbahn/Frostschutzschicht im Eisenbahnverkehr

nicht überwinden. Das wird nach [BLUM-93] bei Eisenbahnstrecken durch die Dämpfungseigenschaften des Schotterbettes verhindert.

Hinzu kommt, dass Dispersionen und Grenzfrequenzen die Wellenfortpflanzung behindern. Oberflächenwellen können nur dann entstehen oder sich fortpflanzen, wenn die Einwirkung mit sehr hohen Frequenzen in die jeweilige Bodenschicht eingetragen wird.

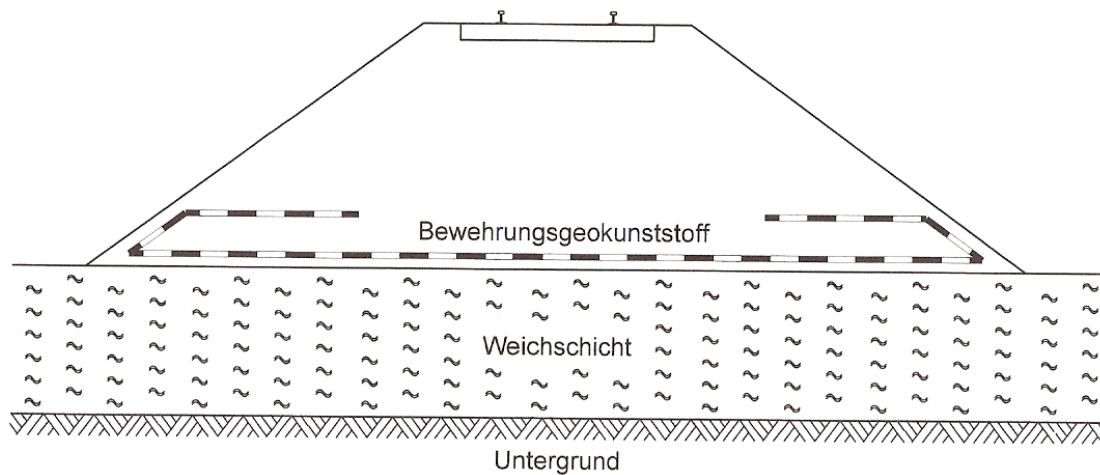
Eine Erregung von tragenden Bodenschichten mit ihrer Eigenfrequenz stellt ein grundsätzliches Stabilitätsproblem dar, das die Lagerungsdichte des Bodens negativ beeinflusst und die Standsicherheit der Konstruktion unabhängig von der Geokunststoffbewehrung gefährdet. Das ist ein Problem, dem durch geeignete Maßnahmen vorgebeugt werden muss.

Letztendlich lässt sich aus diesen Vorbemerkungen schlussfolgern, dass maximal 30 % der dynamisch oder zyklisch eingetragenen Energie in einer gleichmäßig gebetteten Geokunststoffbewehrung ankommen können. Dieser Richtwert ist für die durchgeführten Versuche ausreichend gewesen.

### **3.1.2 Beanspruchungen aus Eisenbahnverkehr**

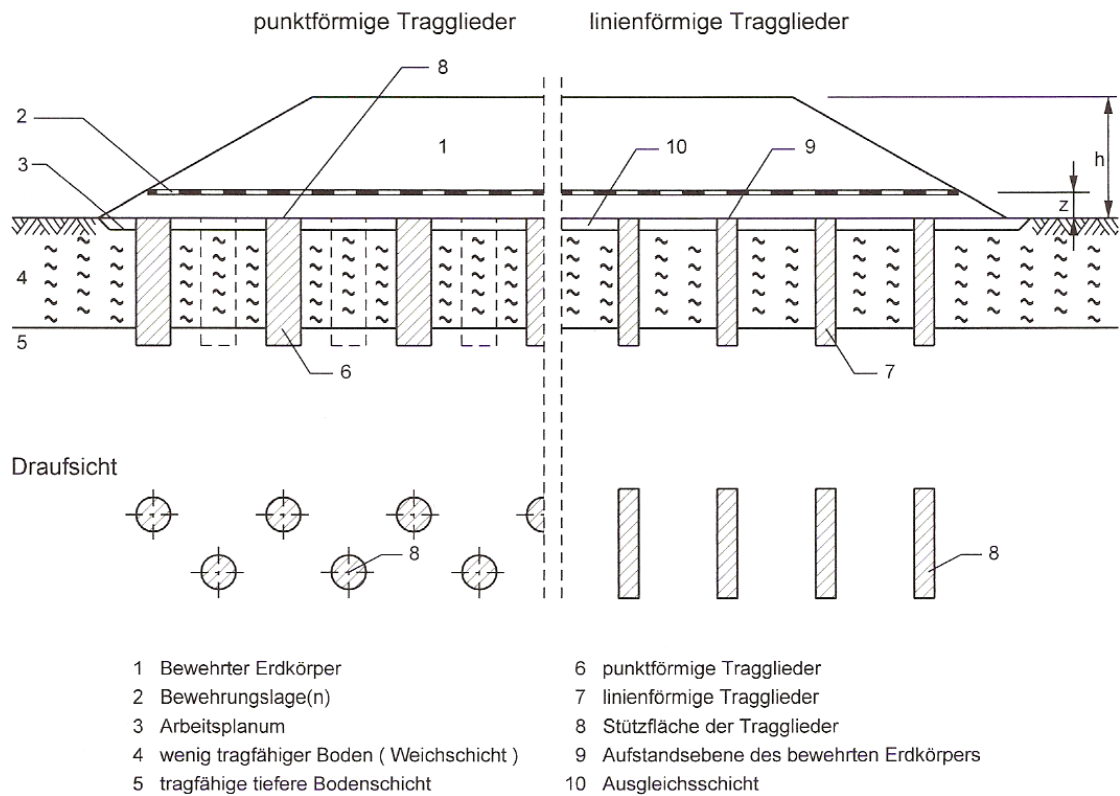
#### **3.1.2.1 Dynamisches Verhältnis R**

Ein Hauptanwendungsgebiet für Geokunststoffbewehrungen, in dem mit zeitlich veränderlichen Beanspruchungen zu rechnen ist, sind Verkehrswege unter Eisenbahnbetrieb. Dabei kann nach [GÖBEL-04] zwischen Sohlbewehrungen von Dämmen auf wenig tragfähigem Untergrund (Abbildung 26) und sowohl tief liegenden (Abbildung 27) als auch hoch liegenden (Abbildung 28) Geokunststoffbewehrungen über punkt- oder linienförmigen Traggliedern unterschieden werden.



**Abbildung 26 Beispiel für eine Sohlbewehrung bei Dämmen auf gering tragfähigem Untergrund aus [GÖBEL-04]**

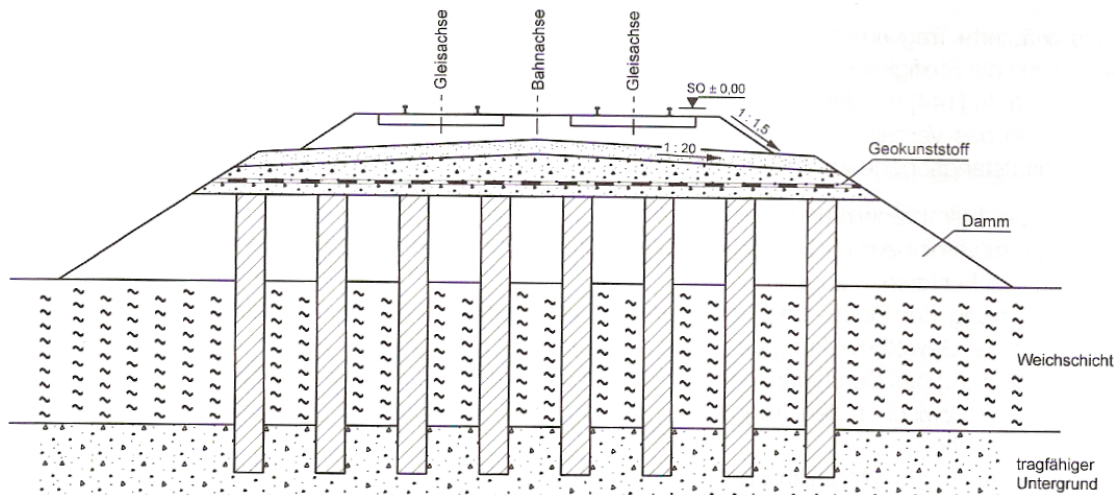
Während Sohl- und tief liegende Bewehrungen vornehmlich für Neubaustrecken zur Anwendung kommen, spielen hoch liegende Geokunststoffbewehrungen vor allem bei der Ertüchtigung bestehender Bahnstrecken eine Rolle. Grundsätzliche Unterschiede der beiden Arten von Bewehrungen bestehen in der Art und Weise der nach [DIN 1054] zu führenden Standsicherheitsnachweise. Erwähnt sei hier nur die systemspezifische Lastumlagerung bei punkt- oder linienförmigen Traggliedern durch die Gewölbe- und Membranwirkung. Beides kann durch die Einlage von Geokunststoffbewehrungen unterstützt bzw. erst ermöglicht aber auch dementsprechend beansprucht werden. Die Vorgehensweise für die Nachweise im Einzelnen ist [DGGT-97] bzw. [DGGT-07] zu entnehmen.



**Abbildung 27 Beispiel für eine tief liegende Bewehrung über punkt- oder linienförmigen Traggliedern aus [GÖBEL-04]**

Von den drei vorgestellten Konstruktionen stellen die Sohlbewehrungen von Dämmen und die mit tief liegenden Bewehrungslagen überbauten Tragglieder keine extremen Beanspruchungen der Geokunststoffe hinsichtlich zyklischer Einwirkungen auf der Dammkrone dar. Die Dynamik in der Wellenausbreitung nimmt mit zunehmendem Abstand von der Quelle ab. Die Energie einer Welle ist proportional zum Quadrat ihrer Amplitude. Die Spannungsamplitude  $\sigma_a$  von S- und P-Wellen nimmt mit dem Reziproken des Abstandes  $r$  vom Ausgangsort der Welle ab [ZILCH-02]. Zu dieser geometrischen Dämpfung der Raumwellen kommt die Materialdämpfung durch den Boden, so dass in der Tiefenlage der Geokunststoffbewehrung evtl. nur noch statische Einwirkungen zu berücksichtigen sind. Gleichzeitig nimmt der statische Anteil der Grundspannung  $\sigma_{\text{stat}}$  auf Grund des Eigengewichtes des überlagernden Bodens zu (Abbildung 2).

In diesen Fällen treten die größten dynamischen Beanspruchungen der Sohlbewehrung und der tief liegenden Bewehrung im Bauzustand auf.



**Abbildung 28 Beispiel für eine hoch liegende Bewehrung über punktförmigen oder linienförmigen Traggliedern aus [GÖBEL-04]**

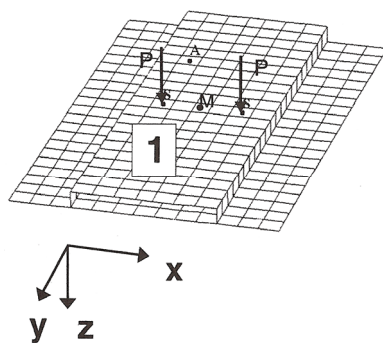
Im Vergleich zu den anderen beiden Konstruktionsarten ist es wahrscheinlicher, dass sich hoch liegende Bewehrungen über punktförmigen oder linienförmigen Traggliedern im Bereich zyklischer Beanspruchungen befinden, da sie dichter an der Induktionsquelle sind. Durch die Verfüllung des Raumes zwischen den Traggliedern kann von einer annähernd gleichmäßigen Bettung der Geokunststoffbewehrung ausgegangen werden. Nach [GÖBEL-04] hat die Bewehrungslage in diesem Fall faktisch keine Membranwirkung und verhält sich mehr wie eine klassische Untergrundstabilisierung zur Vergleichmäßigung der Bettung darüber liegender Schichten. Für diesen Fall würde dann wieder etwa ein Drittel der Beanspruchungen über Scherwellen in die horizontal verlegten Geokunststoffe eingetragen werden.

[GÖBEL-06] hat bei seinen Versuchen mit dem gewählten Lastbild Zugüberfahrten bei 200 km/h simuliert. Dieser großmaßstäbliche Laborversuch ist in 2.2.1 näher erläutert. Vergleicht man seine Versuchsrandbedingungen mit den Messungen von [AUERSCH-05] fällt auf, dass die jeweiligen Autoren die Thematik unterschiedlich angegangen haben. Während [GÖBEL-06] die Auswirkungen der jeweiligen Drehgestelle berücksichtigt, sieht [AUERSCH-05] diese für den Boden als unkritisch an und konzentriert sich auf die hochfrequenten Einwirkungen als Folge von:

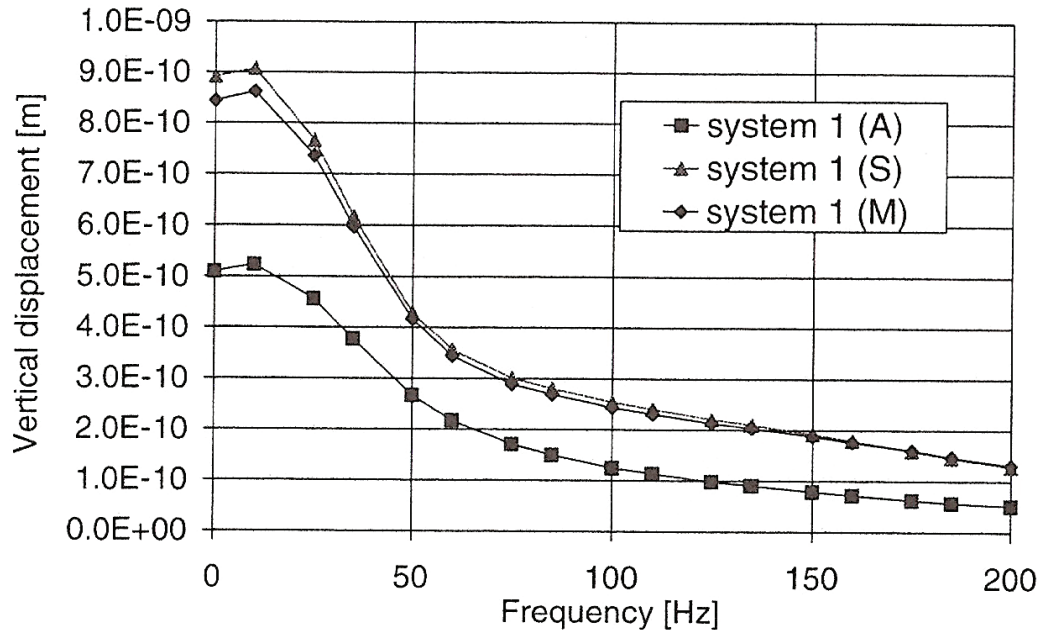
- Radunrundheiten
- Oberflächenfehlern der Gleise
- Lagefehlern der Gleise
- Steifigkeitsunterschieden zwischen Schienenstrang und Boden
- hohl liegenden Schwellen



Da die Amplitude der durch die Drehgestelle angeregten Schwingungen eigentlich nur im unmittelbaren Umfeld des Gleises in ihrer vollen Höhe wirkt und sich danach sehr schnell abbaut, ist sie seines Erachtens nicht maßgeblich für das Verhalten des Bodens. Ab einer bestimmten Wirtiefe erzeugt sie nur noch eine quasi-statische Bewegung des Bodens. Daraus ergibt sich die Frage, auf welche Weise diese quasi-statischen Einwirkungen auf das Korngerüst des Bodens wirken. Wenn Sie zur elasto-plastischen Verformung im Boden führen, dann klingt die Dynamik mit der Zeit ab. Nach [RETZLAFF-05] bauen sich dann Spannungsspitzen ab, um zu einem homogenen Spannungszustand zwischen den Bewehrungslagen und dem umgebenden Boden zu gelangen. Dies spiegelt sich dann meist in messbaren Verformungen an der Oberfläche und im Geokunststoff wider. Wenn derartig große Verformungen auftreten ist die Wahrscheinlichkeit am größten, dass dies in dem von [GÖBEL-06] gewählten Lastbild geschieht. Das entspricht den von [FRIEDRICH-03] entwickelten Modellen zum frequenzabhängigen Verformungsverhalten unter Bahnstrecken. Wie in Abbildung 30 dargestellt, werden die größten Verformungen bei Frequenzen  $f < 20$  Hz in den Untergrund weitergeleitet.



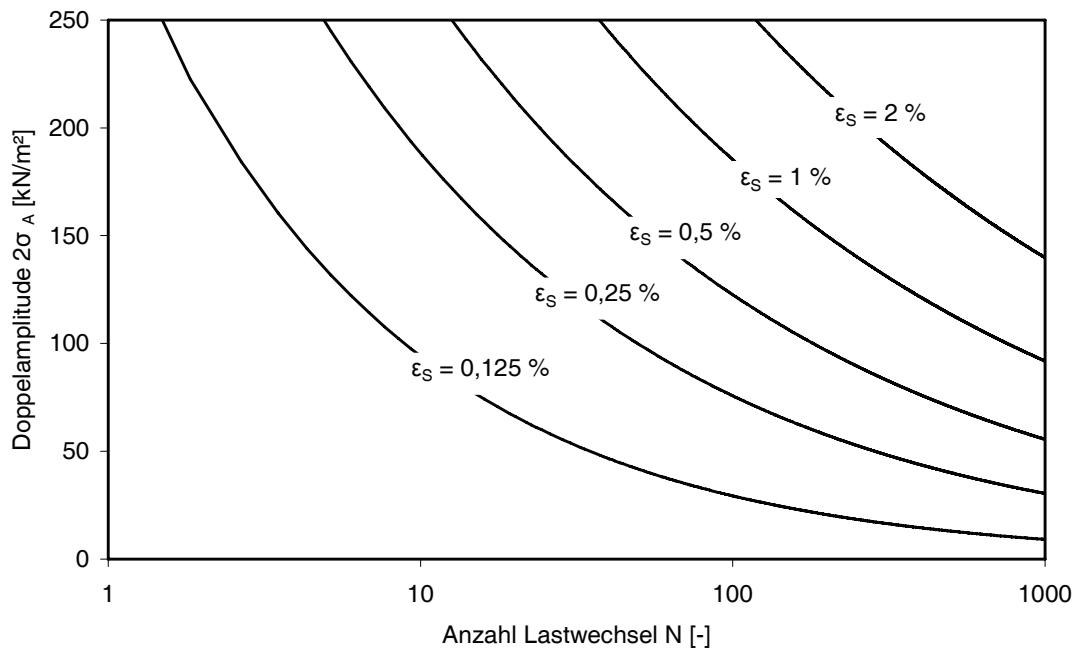
**Abbildung 29 Geometrie für Verformungsmodellierungen des Systems feste Fahrbahn aus [FRIEDRICH-03]**



**Abbildung 30** Vertikale Verformungen in den gekennzeichneten Punkten des Systems in Abbildung 29 aus [FRIEDRICH-03]

Das deckt sich mit den praktischen Erfahrungen von [LIEBERENZ-07]. Er hat bestätigt, dass unterhalb der Schutzschichten, dort wo Geokunststoffbewehrungen eingebaut werden könnten, aber nach dem jetzigen Stand der [Ril 836] nicht dürfen, nur vertikale Einwirkungen mit einer Frequenz bis etwa  $f = 10$  Hz wahrgenommen werden. Damit können die Übergänge der einzelnen Drehgestelle im Hochgeschwindigkeitsverkehr der Eisenbahn registriert werden. Andere Spannungsspitzen mit höheren Frequenzen, wie z.B. die der Radunrundheiten ab etwa  $f = 65$  Hz, wirken sich im Untergrund nicht mehr als messbare Einzelereignisse aus. Vergleicht man die von [GÖBEL-06] gewählte Frequenz von  $f = 7$  Hz mit [LIE-05] dann lässt sich das bereits in 2.2.1 beschriebene Lastbild ebenso den Drehgestellen der einzelnen Waggons zuordnen. Das erklärt auch die hohe Oberspannung von  $\sigma_{\text{dyn,o}} = 94,5 \text{ kN/m}^2$  in den von [GÖBEL-06] durchgeführten Versuchen.

Für die reine zyklische Beanspruchung der Geokunststoffbewehrung sind linear-elastische Verformungen des Bodens von Bedeutung. In einem solchen Fall kommt es zu zyklischen Schubbeanspruchungen des Korngerüsts des Bodens, so dass die einzelnen Körner immer wieder Relativverschiebungen erfahren. Diese sind reparabel, da Boden zum einen kompressibel ist und zum anderen das Bestreben hat, in einen gleichmäßigen Spannungszustand zurück zu kehren.



**Abbildung 31 Extrapolierte Schubdehnungen  $\epsilon_S$  von Sand**

Die Abhängigkeit der Schubdehnungen  $\epsilon_S$  von der Amplitude  $\sigma_a$  und der Anzahl der Lastwechsel  $N$  soll die Abbildung 31 beispielhaft für Sand deutlich machen. Dafür wurden Daten für das Festigkeitsverhalten von Sand aus [STUDER-97] entnommen und für kleine Schubdehnungen ausgewertet. Es wird deutlich, dass bei gleich bleibenden Amplituden größere Verformungen nur mit einer überproportional großen Anzahl an Lastwechseln erreicht werden können.

Mit der von [AUERSCH-05] gewählten Vorgehensweise ist es möglich die rein zyklischen Beanspruchungen auf eingelegte Geokunststoffbewehrungen zu isolieren. Deshalb wurden seine Messwerte dem gewählten dynamischen Verhältnis dieser Versuchsreihe zu Grunde gelegt. Diese wurden hinsichtlich des dynamischen Verhältnisses  $R$  von [HEROLD-06] und [HEROLD-07] bestätigt.

Tabelle 5 zeigt die aus den Messungen von [AUERSCH-05] ermittelten dynamischen Verhältnisse  $R$  nach den Ursachen der Beanspruchungen:

**Tabelle 5      Dynamische Verhältnisse und ihre Ursachen**

Ursache	R
Bahnverkehr unter idealen Verhältnissen	0,87
Radunrundheiten, Unwuchten	0,66 bis 0,77
Stoß- oder schlagartige Beanspruchungen, wie Überfahrt von Weichen	0,33 bis 0,50

Neben der zyklischen Beanspruchung aus dem Bahnverkehr können auch Radunrundheiten und Unwuchten sowie Ähnliches regelmäßig auftreten. Im Gegensatz zu den besonderen Einwirkungen, wie sie beim Überfahren einer Weiche entstehen, sind die ersten beiden Ursachen mobil. Sie lassen sich nicht einem bestimmten Ort zuordnen, so dass keine konstruktiven Maßnahmen wie im Weichenbereich vorgesehen werden können. Sie müssen deshalb bei der Einschätzung des Ermüdungsverhaltens von Geokunststoffen Berücksichtigung finden.

Von den ermittelten dynamischen Verhältnissen aus dem Eisenbahnverkehr wurde  $R = 0,66$  für die Versuche als maßgeblich festgelegt, da ein kleines Verhältnis  $R$  eine größere dynamische Beanspruchung bedeutet (Gleichung 1) und somit das Spektrum darunter mit abdeckt.

### 3.1.2.2 Anzahl der Lastwechsel $N$

Die Festlegung der zu fahrenden Lastwechsel im Versuch wurde durch tatsächliche Streckennutzungen am Beispiel des Netzes der Deutsche Bahn AG festgelegt.

Abhängig vom Wartungszustand der Züge könnten Radunrundheiten die Anzahl der Lastwechsel noch erhöhen. Pro Rad könnten theoretisch bis zu 3 Radunrundheiten auftreten [GERSTBERGER-03]. Unter der Voraussetzung, dass nicht jedes Rad fehlerhaft ist, wurden die Radunrundheiten mit maximal einer Abweichung pro Rad angenommen, so dass die Radsatzüberfahrten der tatsächlichen Anzahl der Lastwechsel  $N$  entsprechen.

Die DB AG hat Ihre Strecken in Kategorien eingeteilt. Dabei lässt die Streckenkategorie P300, die für den Hochgeschwindigkeitspersonenverkehr ausgelegt ist, im Zugprogramm SPFV (Schienenpersonenfernverkehr) mit 120

Zugpaaren/d und Gleis die meisten Lastwechsel zu. Eingeschränkt wird die Anzahl der Züge nur durch die maximale Gleisbelastung von 115.000 t/d.

Unter Berücksichtigung einer Radsatzlast von 140 kN, sowie der dynamischen Einflüsse der Gleislagestabilität und der Fahrgeschwindigkeit für einen ICE 3 kann von ca. 4.500 Achsübergängen als maximale Kapazität pro Tag ausgegangen werden. Die Nutzungsdauer bei Bahnstrecken ist aus der Literatur nicht einheitlich ersichtlich und wird von [HARTWIG-05] für die Ausbaustrecke Uelzen-Stendal mit 27 Jahren beziffert. Beispielsweise wurde die Strecke Berlin-Hamburg im Jahr 2003 für 44 Zugpaare täglich genutzt. Das bedeutet für einen ICE 1 mit 56 Radsätzen bei zweigleisigem Ausbau der Strecke  $N = 2.464$  Lastwechsel am Tag. Für eine angenommene Nutzungsdauer von 30 Jahren würde das zu insgesamt  $N = 2,7 \cdot 10^7$  Lastwechseln während dieser Zeit führen. Auf der Neubaustrecke Köln-Frankfurt verkehren durchschnittlich 3 Zugpaare pro Stunde, d.h. etwa 72 pro Tag. Damit ist es eine der am höchsten ausgelasteten Strecken dieser Streckenkategorie in Deutschland. Das bedeutet pro Tag etwa  $N = 4.000$  Lastwechsel, was nahe der Kapazitätsgrenze liegt. Nach 30 Jahren verursacht dieser Nutzungsgrad ca.  $N = 4,4 \cdot 10^7$  Lastwechsel.

Wie bereits in 2.2.1 erläutert und in Tabelle 2 dargestellt kann das von [NIMMESGERN-01] untersuchte Geogitter innerhalb von 10 Jahren maximal  $N = 1,5 \cdot 10^7$  Lastwechseln ausgesetzt gewesen sein.

Aus diesen Gegebenheiten lassen sich  $N = 10^7$  Lastwechsel als relevante Anzahl für die Nutzungsdauer einer Bahnstrecke ableiten. Diese Anzahl der Lastwechsel  $N$  wurde den Versuchen zu Grunde gelegt.

### **3.1.2.3 Zusammenfassung**

Die Ermittlung des Ermüdungsverhaltens von Geokunststoffen für die Anwendung in Bereichen mit zyklischer Beanspruchung aus Verkehrslasten wurde mit folgenden Randbedingungen durchgeführt:

**Tabelle 6 Zusammenfassung der Versuchsrandbedingungen**

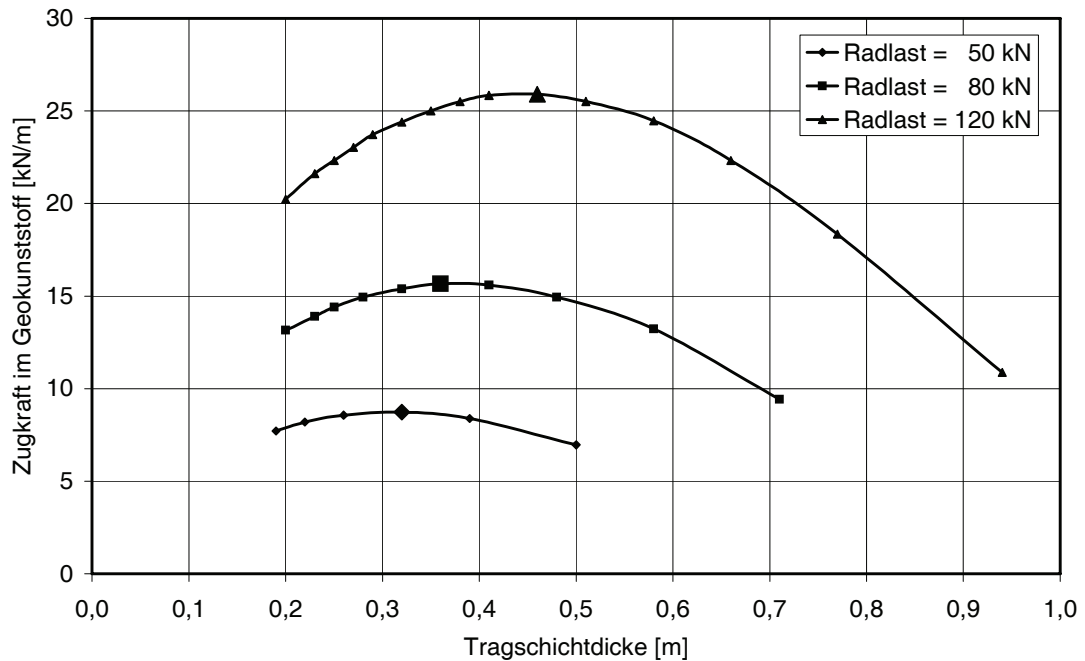
KenngroÙe	Wert
Anzahl Lastwechsel N	$n = 10^7$
Frequenz f	$f \leq 10 \text{ Hz}$
Dynamisches Verhältnis R	$R \leq 0,66$

### 3.1.3 Anwendung analytischer Verfahren zur Ermittlung der Beanspruchung von Geokunststoffen

#### 3.1.3.1 Tragschichtbewehrung nach dem BKT – Verfahren

Das Bemessungskonzept Tragfähigkeit (BKT-Verfahren) [TURCZYNSKI-05] ist eine Methode, die vornehmlich im Verkehrswegebau und insbesondere im StraÙenbau zur Anwendung kommt. Aufbauend auf dem Verfahren nach [INGOLD-98] und weiteren bodenmechanischen Ansätzen ermöglicht es die Berechnung der erforderlichen bewehrten Bodenschicht, der Zugfestigkeit des Geokunststoffes, seiner erforderlichen Verankerungslänge sowie über die Einsenkung an der Fahrbahnoberfläche den zu erwartenden Verformungsmodul auf der OK der bewehrten Bodenschicht.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen dienen zunächst einmal der Ermittlung der durch verschiedene Radlasten in den Geokunststoff eingetragenen Zugspannungen. Zur Überprüfung der Plausibilität der Rechenergebnisse wurden Labor- und Feldversuche herangezogen.



**Abbildung 32 Zugbeanspruchung von Geokunststoffen in Abhängigkeit von der Tragschichtdicke nach Berechnungen mit dem BKT-Verfahren**

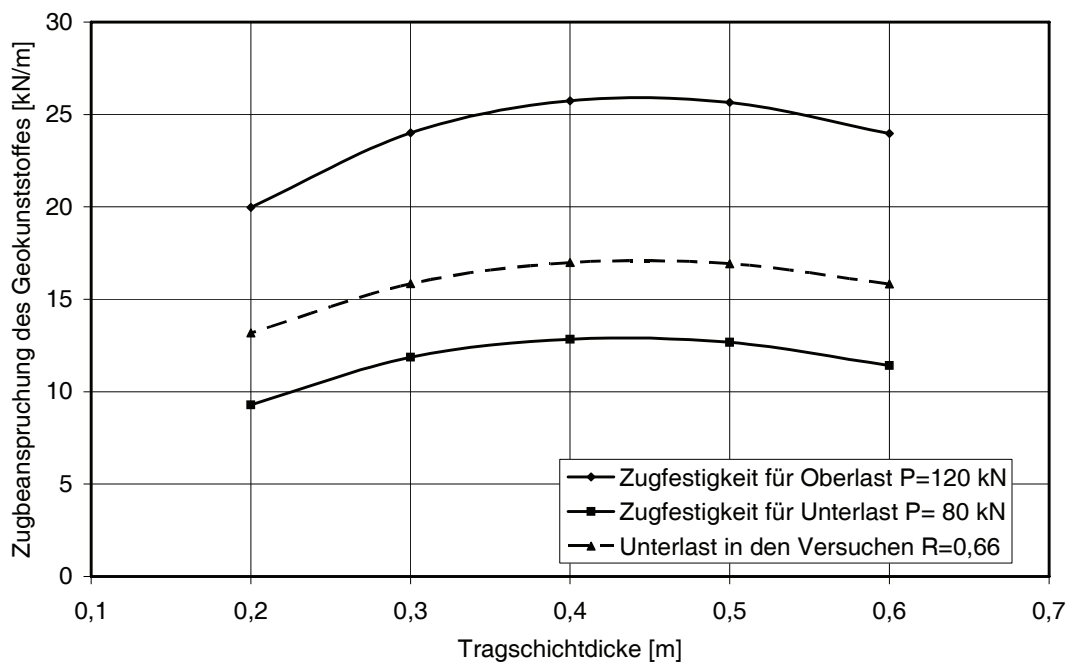
Die der Berechnung zu Grunde liegenden Eingangswerte und ihre Ergebnisse wurden nicht faktorisiert, so dass ein möglichst charakteristisches Bild der Beanspruchung der Geokunststoffe wiedergegeben wird. Danach sind ungebundene Tragschichtdicken über geosynthetischen Bewehrungen mit Dicken zwischen 0,30 m und 0,50 m und den aufgeführten Radlasten am effektivsten.

[DRATWA-98] und [BANJAC-98] kamen unter den von ihnen gewählten Bedingungen und einer begrenzten Anzahl von Messungen aus großmaßstäblichen Labor- und Baustellenversuchen mit verschiedenen Geokunststoffen zu vergleichbaren Ergebnissen.

Da die messtechnische Erfassung des Effektes von Geokunststoffen unter ungebundenen Tragschichten sehr schwierig ist, können die durchgeführten Untersuchungen [DRATWA-98] und [BANJAC-98] den Effekt lediglich qualifizieren und nur tendenziell quantifizieren somit ist die Gültigkeit ihrer Ergebnisse eingeschränkt. Das liegt zum einen am nicht vollständig geklärten Mechanismus der Kraftübertragung zwischen Geokunststoff und Boden und zum anderen an den vielen Randbedingungen, die das Tragverhalten beeinflussen und von Baustelle zu Baustelle variieren können.

Auch neuere Untersuchungen von [RETZLAFF-06] zeigen, dass Tragschichtdicken um 0,40 m in Abhängigkeit von der Untergrundtragfähigkeit den größten Effekt

haben. Dazu ist allerdings eine Mindesttragfähigkeit des Untergrundes erforderlich. Bei den Untersuchungen von [RETZLAFF-06] lag diese bei  $\text{CBR} = 2,2\%$ . Messungen bei einem CBR-Wert des Untergrundes von  $1,1\%$  haben gezeigt, dass diese Tragschichtdicke nicht ausreichend ist um ein vergleichbares Verhältnis der Tragfähigkeiten zwischen dem bewehrten und unbewehrten System zu erzielen. Dies war erst bei einer Mächtigkeit von  $0,60\text{ m}$  möglich. Messungen bei  $\text{CBR} = 5,0\%$  hingegen wiesen ein wesentlich ungünstigeres Verhältnis der Tragfähigkeiten zwischen den Systemen mit und ohne Geokunststoff auf als bei  $\text{CBR} = 2,2\%$ . Allerdings war die Wirkung auch hier bei  $0,40\text{ m}$  Tragschichtdicke am deutlichsten. Ein Vergleich der Berechnungen nach dem BKT-Verfahren und den von [RETZLAFF-06] durchgeführten Messungen lässt den Schluss zu, dass der bisherige Kenntnisstand durch die analytische Methode gut beschrieben werden kann.



**Abbildung 33 Beanspruchungsniveaus aus Berechnungen nach dem BKT-Verfahren und zyklische Versuche mit  $R = 0,66$**

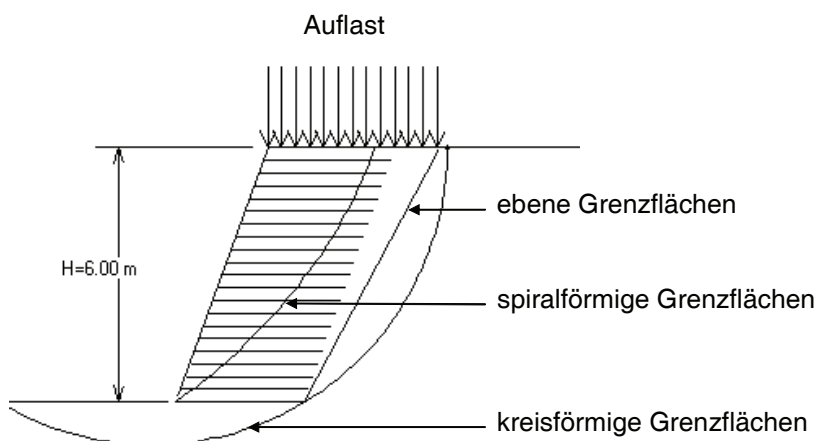
Sowohl eine Veränderung des Lastausbreitungswinkels  $\theta$ , des inneren Reibungswinkels des Bodens  $\varphi'$  als auch der Auflast selbst, haben nach diesem Verfahren keinen signifikanten Einfluss auf das errechnete Verhältnis zwischen der erforderlichen Ober- und Unterlast, wohl aber auf die absoluten Werte der von den Geokunststoffen aufzunehmenden Zugkräfte. Es wurden mit einem inneren



Reibungswinkel von  $\varphi' = 42^\circ$  und einer Wichte  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  Bodenparameter für die Berechnung benutzt, die eine Schottertragschicht beschreiben. Der Lastausbreitungswinkel wurde zwischen den in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellten  $\theta = 26^\circ$  und maximalen  $\theta = 45^\circ$  variiert. Die Berechnungen wurden zusätzlich auch für Radlasten von 160 kN, die als Verkehrslast in einer Oberlast von 240 kN resultieren, durchgeführt. Grundsätzlich haben alle Variationen der Eingangswerte und deren Kombinationen zu keiner nennenswerten Veränderung des dynamischen Verhältnisses R geführt. Sie resultierten jedoch in unterschiedlichen Zugspannungen in den Geokunststoffen selbst (vgl. Abbildung 32).

### 3.1.3.2 Bewehrte Stützkonstruktionen

Während des Überfahrens von Stützkonstruktionen können sich die obersten Bewehrungslagen im unmittelbaren Einflussbereich dynamischer Beanspruchungen befinden. Die Standsicherheit dieser Bauwerke wird mit klassischen Nachweisen der Lagesicherheit, der Bauteilsicherheit und des Gesamtsystems nach [DIN 1054] geführt. Es ist davon auszugehen, dass die dynamische Beanspruchung der Geokunststoffe dann am größten ist, wenn sie direkt überfahren werden. Dieser Beanspruchungsfall wurde mit Hilfe des Programms ReSlope 4.0 [ADAMA-03] näher untersucht. Mit Hilfe dieser Software können die in Abbildung 34 dargestellten Versagensmechanismen analytisch untersucht werden.



**Abbildung 34** Mit ReSlope 4.0 untersuchte Versagensmechanismen der gewählten bewehrten Stützkonstruktion

Dazu gehören die in Abbildung 34 dargestellten Mechanismen:

- kreisförmige Grenzflächen
- spiralförmige Grenzflächen und
- ebene Grenzflächen

Die Beanspruchung der Stützkonstruktion wurde analog zum Ermüdungslastfall 3 des [DIN FB 101] angesetzt.

Mit dem Programm ReSlope 4.0 wurden Berechnungen, die den Empfehlungen in [LESHCHINSKY-97] folgen, durchgeführt. Die Software wurde gewählt, weil sie die Möglichkeit eröffnet, die rechnerisch wirkende Zugbeanspruchung in den einzelnen Geokunststofflagen zu ermitteln. Für die oberen Lagen, die der dynamischen Beanspruchung am stärksten ausgesetzt sind, ist der Versagensfall des Gleitens in der Grenzfläche zwischen Geokunststoffbewehrung und umgebendem Boden maßgebend. Das Programm untersucht für alle Geokunststofflagen, die oberhalb des Fußpunktes liegen, das Versagen auf einer möglichen Gleitfläche direkt über und unter dem Geokunststoff.

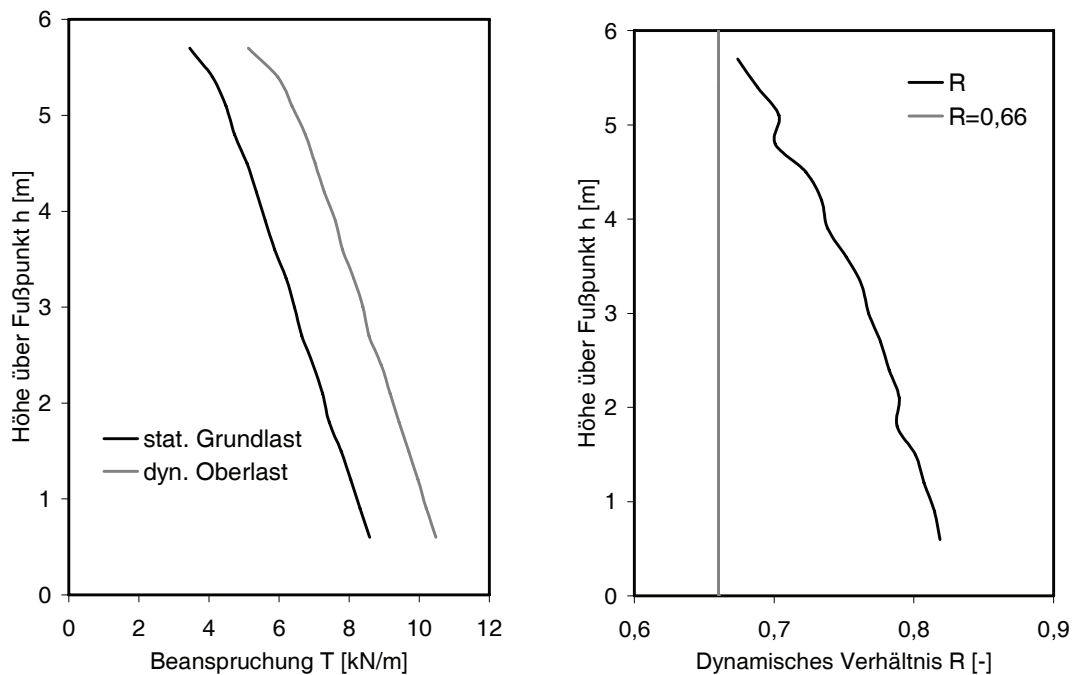
Durch die Untersuchung mit Hilfe von variierenden Zweikörperbruchmechanismen werden nur die tatsächlich durch das Verbundverhalten von Boden und Geokunststoff im Geokunststoff zu mobilisierenden Zugkräfte berechnet. Solange diese Kräfte die Zugfestigkeit des Geokunststoffes nicht übersteigen bzw. das angestrebte Sicherheitsniveau erfüllen, wird der Iterationsprozess des Programms beendet.

**Tabelle 7      Bodenkennwerte für die analytischen Berechnungen**

Boden	Bodenkenngröße	Wert
Bewehrter Bereich	Wichte $\gamma$	20 kN/m <sup>3</sup>
	Innerer Reibungswinkel $\varphi'$	34 °
	Kohäsion $c'$	0 kN/m <sup>2</sup>
Hinterfüllboden	Wichte $\gamma$	20 kN/m <sup>3</sup>
	Innerer Reibungswinkel $\varphi'$	34 °
	Kohäsion $c'$	0 kN/m <sup>2</sup>
Untergrund	Wichte $\gamma$	20 kN/m <sup>3</sup>
	Innerer Reibungswinkel $\varphi'$	34 °
	Kohäsion $c'$	0 kN/m <sup>2</sup>

Es wurden ausreichend hohe Zugfestigkeiten der Geokunststoffe für diese Berechnungen eingegeben. Mit der Untersuchung des Gleitens in den Grenzflächen der Geokunststofflagen zum Boden für eine 6 m hohe Stützkonstruktion mit einem Böschungswinkel von  $\beta = 70^\circ$  und den in Tabelle 7 aufgeführten Bodenkennwerten wurden die in Abbildung 35 dargestellten Zugbeanspruchungen in den Bewehrungslagen ermittelt.

Die Abbildung 35 enthält neben dem dynamischen Verhältniswert  $R$  aus den Berechnungen auch die Grenzlinie des für die Laborversuche angesetzten dynamischen Verhältniswertes  $R = 0,66$ .



**Abbildung 35 Unter-/Oberlast und dynamisches Verhältnis für die verschiedenen Höhenlagen der Bewehrung einer Stützkonstruktion**

Eine Variation der örtlichen Lage der Verkehrslast vom abgleitenden Teil der Konstruktion auf den rückhaltenden Teil war für die Berechnungen nicht erforderlich, da für das Versagen auf den Geokunststofflagen der Gleitwiderstand maßgeblich ist. Dieser wird durch den einseitig anzusetzenden Gleitreibungsbeiwert  $\lambda$  und den inneren Reibungswinkel des Bodens  $\varphi'$  sowie die Normalspannungen  $\sigma$  in der Gleitfläche beschrieben (Gleichung 14).

$$R_{GL} = \sigma \cdot \lambda \cdot \tan \varphi'$$

#### **Gleichung 14 Ermittlung des Gleitreibungswiderstandes**

Da mit zunehmendem Verbund die in die Geokunststoffe eingeleiteten Kräfte zunehmen, stellen die erhöhten Vertikalspannungen, die durch die Verkehrsbeanspruchung erzeugt werden, für diesen Versagensmechanismus den ungünstigsten Lastfall dar. Die Vertikalspannungen  $\sigma$  haben mit dem Proportionalitätsfaktor ( $\lambda \cdot \tan \varphi$ ) direkten Einfluss auf den Gleitwiderstand. Die Grenzen hierfür sind erreicht, wenn nicht mehr das Abgleiten des Stützkörpers in der Kontaktfläche zwischen Geokunststoff und dem angrenzenden Boden maßgebend ist, sondern das Versagen durch Grundbruch.

### **3.2 Untersuchte Geokunststoffe**

#### **3.2.1 Vorbemerkungen**

Die Bandbreite der Geokunststoffe, die in der Geotechnik zur Bodenbewehrung und Stabilisierung eingesetzt werden, ist sehr groß. Sie reicht von mechanisch oder thermisch verfestigten Vliesstoffen über Bändchen- und Multifilamentgewebe bis hin zu gewebten, gelegten und verstreckten Geogittern sowie Verbundstoffen aus diesen Produkten.

Allein durch die Verwendung unterschiedlicher Polymere variieren diese Materialien in ihren Eigenschaften und bieten sich deshalb für unterschiedlichste Anwendungsgebiete an. Zu den üblicherweise verwendeten Rohstoffen für die genannten Geokunststoffe zählen hauptsächlich Thermoplaste. Die meistverwendeten Polymere sind in alphabetischer Reihenfolge:

*Aromatische* Polyamide (Aramide - insbesondere PPTA)

Aliphatische Polyamide (insbesondere PA6)

Polyester (insbesondere PET)

Polyolefine (insbesondere PEHD und PP)

Polyvinyle (insbesondere PVAL)

Ein allgemeiner Überblick all dieser Geokunststoffe und ihrer Herstellungsverfahren soll hier nicht gegeben werden. Dafür stehen neben anderen Standardwerke wie [ROCHHOLZ-05] oder [FGSV-535] zur Verfügung. Diese geben nahezu umfassend Auskunft über die Anwendung von Geokunststoffen in Erd- und Straßenbau.

Hinsichtlich der Wirkung von Geokunststoffbewehrungen sei an dieser Stelle auf [KLAPPERICH-06] und [DGGT-07] verwiesen.

Dem Grunde nach können für alle aufgezählten Materialien zyklische Einwirkungen relevant sein, da sie alle als Bewehrungsmaterial geeignet sind und dementsprechend verwendet werden. In der Auswahl der hier untersuchten Geokunststoffe liegt keine Wertung hinsichtlich ihrer Qualität oder Eignung für die Bewehrung und Stabilisierung in der Geotechnik und im Verkehrswegebau. Aufgrund ihrer Struktur, der Herstellungsart und der verwendeten Polymere lag die Vermutung nahe, dass sich die unterschiedlichen Mechanismen und Phänomene, die während zyklischer Beanspruchungen auftreten können, bei den gewählten fünf Produkten gut isolieren lassen.

### **3.2.2 Strukturen der untersuchten Geokunststoffe**

Aus den zur Verfügung stehenden Geokunststoffen wurden fünf Geogitter ausgewählt und zwar solche, die aus massiven Elementen bestanden. Es handelte sich dabei um vier aus Einzelementen gelegte Geogitter (GG1 bis GG4), je zwei aus PET und PP, sowie ein aus einer extrudierten Bahn gestanztes und verstrecktes Geogitter aus PEHD (GG5).

Das entscheidende Auswahlkriterium für die Geokunststoffe GG1-PET bis GG4-PP war die Homogenität ihrer Struktur und hier insbesondere der einzelnen Elemente. Bei den gelegten Geogittern haben die durchgehenden Stränge nahezu identische Eigenschaften. Die thermisch verbundenen Kreuzungspunkte der Elemente in Maschinenrichtung (MD) und quer dazu (CMD) als mögliche Schwachpunkte auf den ansonsten homogenen Ausgangsmaterialien sind durch die Schweißpunktgeometrie definiert, so dass prädestinierte Versagensbereiche klar abgrenzbar sind.

Aufgrund des Herstellungsverfahrens von GG5-PE war nicht die Homogenität des Geogitters für seine Auswahl ausschlaggebend sondern der Übergang von Knoten- und Längsstabbereich. An dieser Stelle ist der Übergang von den hochkristallinen Längsbereichen in die zunehmend amorphe Struktur der Knoten und damit ein Unterschied in den rheologischen Eigenschaften des Geokunststoffes zu erwarten.

Ein weiterer praktischer Grund war, dass durch die Beschaffenheit der einbezogenen Geogitter Beschädigungen, die auf den Versuchsaufbau und nicht auf die zyklischen Beanspruchungen zurückzuführen sind, sehr gut identifiziert werden können. Das war insbesondere dann wichtig, wenn in der ersten Phase der Versuche Anpassungen der Einstellungen der Prüfanlage an die zu untersuchenden Geokunststoffe vorgenommen werden mussten.

Ausgewählte mechanische Eigenschaften der untersuchten Geogitter und eine Beschreibung ihrer Einzelelemente in Maschinenrichtung (MD) sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

**Tabelle 8 Beschreibung der untersuchten Geogitter-Elemente in MD**

		GG1-PET	GG2-PET	GG3-PP	GG4-PP	GG5-PE
Polymer	-	PET	PET	PP	PP	PEHD
Rußbeigabe <sup>1)</sup>	-	-	+	-	+	+
Knotenabstand	mm	80	100	40	50	160
$R_{B,k0}$ <sup>2)</sup>	N	6441	6356	2025	1819	1355
$\varepsilon_{B,k0}$ <sup>2)</sup>	%	7,2	7,7	7,2	9,6	10,6

<sup>1)</sup> Ruß kann aus herstellungstechnischen Gründen und/oder zur UV-Stabilisierung zugefügt worden sein

<sup>2)</sup> Mittelwerte aus Einzelstrangprüfungen

### 3.2.3 Polymere der untersuchten Geokunststoffe

#### 3.2.3.1 Vorbemerkungen

Die untersuchten Geokunststoffe wurden ausnahmslos aus *teilkristallinen* Thermoplasten hergestellt. Als Thermoplaste werden im Allgemeinen Linearpolymere bezeichnet, bei denen die einzelnen Moleküle im unvernetzten Zustand eine ausreichende Mobilität besitzen, so dass sie ihre gegenseitige Lage verändern können. Deshalb verhalten sie sich beim Erwärmen prinzipiell plastisch [WEISSMANTEL-82]. Durch Additive oder gezielte Eingriffe in den Herstellungsprozess von Thermoplasten können die Linearpolymere bis zu einem gewissen Grad miteinander vernetzt werden. Dadurch sind die

Platzwechselfvorgänge auf die Molekülteile zwischen den Vernetzungsstellen beschränkt. Intermolekulare Gleitvorgänge sind durch das Netzwerk, idealerweise ein räumliches Netzwerk, erschwert. Derartige Thermoplaste sind weniger plastisch.

### 3.2.3.2 Polyethylenterephthalat (PET)

PET ist ein weit verbreitetes Polymer für die Herstellung von Geokunststoffen mit Bewehrungsfunktion. Es handelt sich dabei um ein lineares gesättigtes Polyester.

Seit Ende der 1980iger Jahre hat sich ein Verfahren für die PET-Herstellung durchgesetzt, bei dem Terephthalsäure (Abbildung 36) direkt mit Ethylenglykol (Abbildung 37) *verestert* wird. Aufgrund der schwachen Löslichkeit von Terephthalsäure in diesem Prozess muss mit erhöhter Temperatur und einem Druck von etwa 3 bar gearbeitet werden [MORO-02]. Durch die anschließende *Polykondensation* unter Zugabe von Katalysatoren entsteht das hochmolekulare und *teilkristalline* Polyethylenterephthalat (Abbildung 38), das in verschiedenen Formen für die Herstellung von Geokunststoffen verwendet wird.

Durch die lineare Kettenstruktur beträgt der Kristallinitätsgrad zwischen 30 bis 40 %. [SCHWARZ-05]

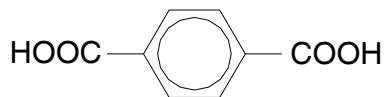


Abbildung 36 Terephthalsäure

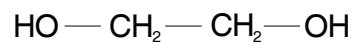


Abbildung 37 Ethylenglykol

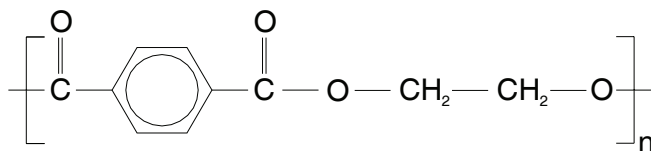


Abbildung 38 Grundstruktur von Polyethylenterephthalat (PET)

Da PET sowohl als Filamentgarne als auch als Formmassen für das Herstellen von Geokunststoffen eingesetzt werden, sind die mechanischen und chemischen Eigenschaften der Endprodukte sehr vielfältig. Die in Tabelle 9 zusammengefassten Eigenschaften von PET sind deshalb als Vergleichswerte für unveredelte

Formmassen zu sehen. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit sind insbesondere die für Thermoplaste hohe Festigkeit und Steifigkeit sowie das günstige Zeitstandverhalten von PET interessant. Die charakteristischen niedrigen Kontaktreibungskoeffizienten von PET und die hohe Abriebfestigkeit können möglichen Beschädigungen durch die zyklischen Beanspruchungen entgegenwirken. Es kann davon ausgegangen werden, dass PET spannungsrißbeständig ist. [SCHWARZ-05]

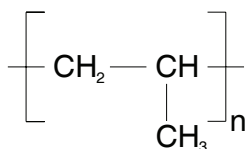
### 3.2.3.3 Polypropylen (PP)

Polypropylene sind *teilkristalline* Thermoplaste, die zu den Polyolefinen gehören. Sie werden durch *Polymerisation* hergestellt.

Auf Grund der unterschiedlichen räumlichen Anordnung der CH<sub>3</sub>-Gruppe bei Polypropylenen werden diese in drei Gruppen eingeteilt:

- isotaktisches Polypropylen: die CH<sub>3</sub>-Gruppen sind alle auf der gleichen Seite der Kohlenstoffkette oder spiralförmig nach außen gerichtet
- syndiotaktisches Polypropylen: die CH<sub>3</sub>-Gruppen befinden sich in einem regelmäßigen Muster auf verschiedenen Seiten der Kohlenstoffkette
- ataktisches Polypropylen: die räumliche Lage der CH<sub>3</sub>-Gruppen zur Kohlenstoffkette ist statistisch verteilt

Technisch am bedeutsamsten ist isotaktisches Polypropylen. Ein „Isotaxie-Index“ von 55 bis 95 entspricht 4.000 bis 10.000 regelmäßig angeordneten Polypropylengruppen der Grundstruktur in Abbildung 39 [SAECHTLING-01]. Mit einem zunehmenden isotaktischen Anteil erhöhen sich der Grad der *Kristallinität*, die Schmelztemperatur  $T_{pm}$  und die Zugfestigkeit. [SCHWARZ-05]



**Abbildung 39 Grundstruktur Polypropylen (PP)**

Die tertiären Kohlenstoffatome der CH<sub>3</sub>-Gruppe sind UV-lichtempfindlich. Polypropylen ist deshalb nur bei angemessener Stabilisierung UV-beständig. Die Stabilisierung kann durch Additive oder die Zugabe von Ruß erfolgen.



### 3.2.3.4 Polyethylen hoher Dichte (PEHD)

Polyethylen ist ein flexibles, *teilkristallines* Polyolefin. Da die *Molmasse*  $M$ , die *Kristallinität* sowie die Struktur die Eigenschaften dieses Polymers sehr stark beeinflussen, wird für Geokunststoffe mit Bewehrungsfunktion vorzugsweise Polyethylen hoher Dichte eingesetzt. PEHD kann unter Anwendung des Mitteldruck- bzw. des Niederdruckverfahrens hergestellt werden. Der Druckbereich des Mitteldruckverfahrens liegt zwischen 30 und 40 bar. Unter Zusatz von Chromoxid als Katalysator lassen sich mit diesem Verfahren *Molmassen*  $M$  von etwa 50.000 g/mol erreichen. Im Niederdruckverfahren zwischen 1 und 50 bar sind unter Verwendung von Katalysatoren *Molmassen*  $M$  zwischen 200.000 und 400.000 g/mol möglich. Mit etwa 5 kurzen Verzweigungsstellen auf 1.000 Kettenglieder ist PE-HD nur sehr schwach verzweigt. Es eine hohe *Kristallinität* zwischen 60-80 % auf. [SAECHTLING-01]

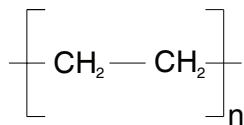


Abbildung 40 Grundstruktur Polyethylen (PE)

Neben der guten Beständigkeit von PEHD gegenüber chemischen Einflüssen, ist es die gute Verarbeitbarkeit, die diesen Rohstoff für die Herstellung von Geokunststoffen qualifiziert.

Wird Polyethylen dem Sonnenlicht ausgesetzt, versprödet es. Das kann durch die Zugabe von Rußpartikeln wirksam verzögert werden.

### 3.2.3.5 Eigenschaften der untersuchten Polymere

In nachfolgender Tabelle 9 sind die für die weiteren Betrachtungen wichtigen Eigenschaften der untersuchten Polymere zusammengetragen. Auf einige der Größen wird im Laufe dieser Abhandlung zurückgegriffen.

**Tabelle 9**      **Ausgewählte Eigenschaften der untersuchten Polymere aus [SAECHTLING-01] und [EHRENSTEIN-03]**

Eigenschaften		PET	PP	PEHD
Dichte $\rho$	g/cm <sup>3</sup>	1,33 - 1,40	0,895 - 0,92	0,94 - 0,96
Kristallinität	%	30 - 40	60 - 70	60 - 80
Glasübergangstemperatur $T_g$	°C	60 bis 95	0 bis 20	< -100
Schmelztemperatur $T_{pm}$	°C	250 - 260	160 - 165	125 - 135
Gebrauchstemperatur (kurzzeitig)	°C	< 170	< 140	< 100
Gebrauchstemperatur (langzeitig)	°C	< 100	< 100	< 90
Enthalpieänderung $\Delta H$	J/g	145	207	293

Die in der Tabelle angegebenen Werte sind charakteristisch für Formmassen und können, wenn andere Quellen zur Datenermittlung herangezogen werden, durch die dort die angegebenen Bandbreiten durchaus erweitert werden. In einem solchen Fall sind unterschiedliche Messmethoden und Polymerzustände zu beachten.

### **3.3 Eigene Laborversuche**

#### **3.3.1 Vorbemerkungen**

Für die Durchführung der Versuche wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Versuchsstände entwickelt und gebaut. Während der durchgeführten Vorversuche konnten notwendige Modifikationen an den im Folgenden beschriebenen Prüfraumen vorgenommen und entsprechende Erfahrungen mit der Regelung gesammelt werden. Während der Versuchsdurchführung hat sich gezeigt, dass polymerspezifische Eigenschaften eine wesentliche Rolle bei der Ermittlung des Ermüdungsverhaltens der Geokunststoffe spielen. Soweit möglich, wurden diese bei der Festlegung der Versuchsrandbedingungen für die einzelnen Geokunststoffe berücksichtigt.

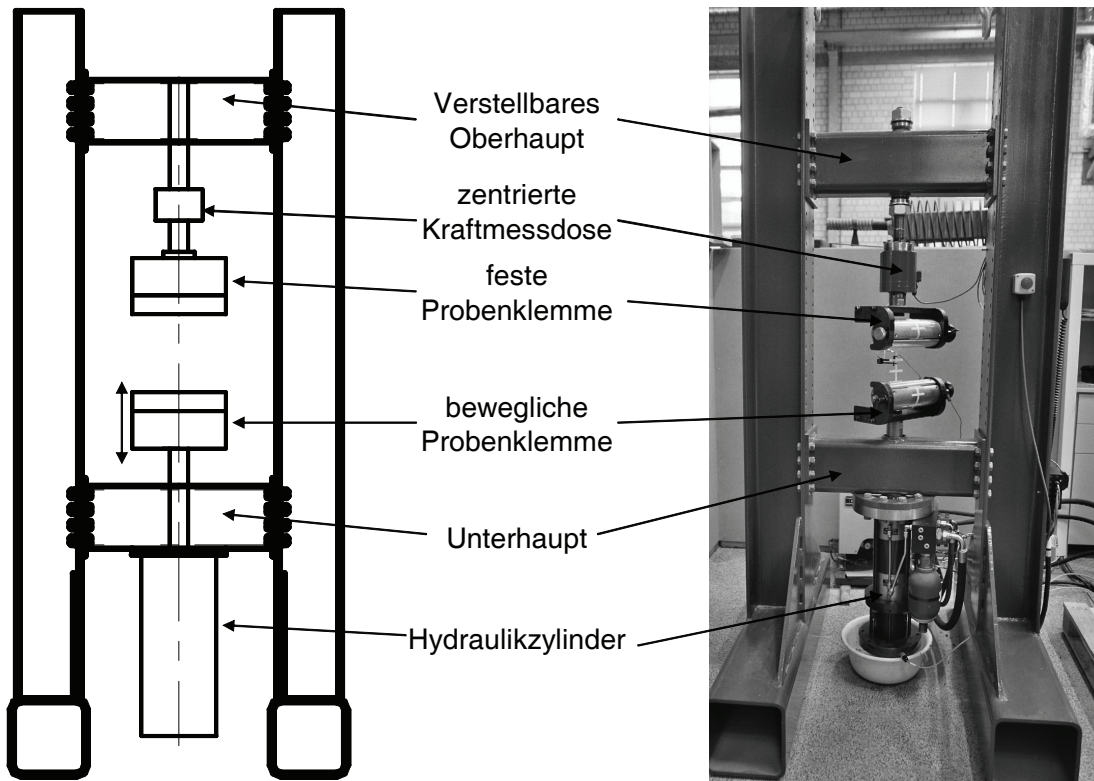
Vor dem Hintergrund der am Anfang der Arbeit zitierten Literaturquellen sollten neben dem mechanischen Verhalten der Geokunststoffe unter zyklischen Einwirkungen strukturelle Veränderungen der Polymere untersucht werden. Durch die Zusammenarbeit mit den Laboren für „Instrumentelle Analytik“ und „Kunststofftechnologie“ des Fachbereichs Chemieingenieurwesens der Fachhochschule Münster, Abteilung Steinfurt, war es möglich die untersuchten Geokunststoffe chemischen Analysen zu unterziehen um die Messungen der mechanischen Eigenschaften durch die chemischen Betrachtungen zu ergänzen.

#### **3.3.2 Versuchseinrichtung**

Die Versuche zur Ermittlung des Zugkraft-Dehnungsverhaltens der untersuchten Geogitter unter zyklischen Einwirkungen wurden an zwei Versuchständen durchgeführt. Dabei kamen zwei verschiedene Systeme zum Einsatz. Da die erforderlichen Baugruppen der Hydraulik wie Zylinder und Aggregat bereits vorhanden waren, wurden entsprechende Rahmen aus Profilstahl entworfen und gebaut sowie Modifikationen einzelner Bauteile vorgenommen, um den erhöhten Versuchsanforderungen zu genügen. (Abbildung 41)

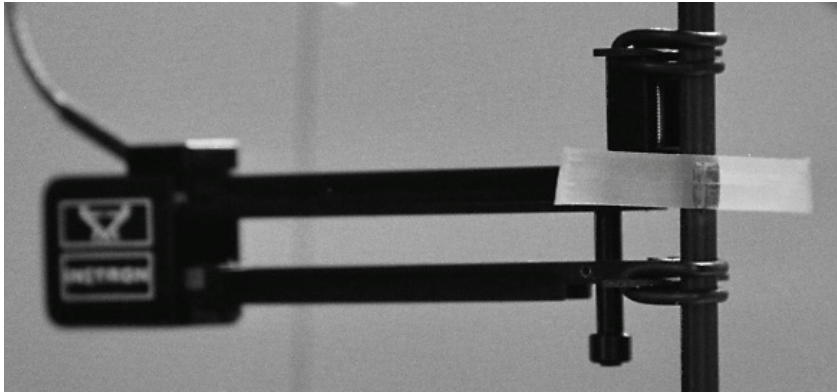
Der Versuchsrahmen I wurde mit einem servo – hydraulischen Zylinder der Firma Roell/Amsler ausgestattet. Der Hub des Kolbens betrug  $\pm 50$  mm. Der Zylinder wurde über eine Substation mit angeschlossenem Servo - Controller vom Typ K7500 vom gleichen Hersteller angesteuert. Die im Versuchsrahmen I eingebaute Kraftmessdose erlaubte dynamische Messungen von  $\pm 25$  kN. Um die analogen Messungen in digitale Signale umzuwandeln wurde ein A/D – Wandler Spyder 8 von der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM) verwendet. Mit Hilfe der Software Catman 4.5

Professional wurden die Daten auf einen handelsüblichen PC übertragen und dort gespeichert. Für die Verformungsmessungen standen DD1 – Ansetzwegaufnehmer aus dem Hause HBM, mit DMS – Vollbrücke und einem maximalen Messweg von  $\pm 2,5$  mm, zur Verfügung. Die Nennmesslänge  $L_0$  wurde mit Zubehörteilen auf 25 mm eingestellt, so dass Dehnungen der untersuchten Geokunststoffe bis umgerechnet  $\varepsilon = 10$  % gemessen werden konnten.



**Abbildung 41 Aufbau des Versuchsrahmens II**

Der Versuchsrahmen II konnte einheitlich mit Instron – Systemkomponenten ausgestattet werden. Der Kolben des servo-hydraulischen Zylinders hatte ebenfalls einen Hub von  $\pm 50$  mm. Der Zylinder wurde über eine Substation der Serie Labtronic 8800 mit der Software Fast Track Console Version 7 angesteuert. Im Gegensatz zum Versuchsrahmen I konnten so alle Messeinrichtungen, wie die Kraftmessdose ( $\pm 25$  kN) und der Ansetzwegaufnehmer (Messabstand 25 mm bei Messweg  $\pm 5$  mm (Abbildung 42)) automatisch kalibriert werden. Ein großer Vorteil der Software war die selbständige Anpassung der PID-Regelung an die sich verändernden Eigenschaften der Geokunststoffe während der laufenden Versuche. Die Messwerte wurden hier mit der Systemsoftware SAX ausgelesen.



**Abbildung 42 Befestigung des Dehnungsaufnehmers an GG4-PP**

Die Wegaufnehmer beider Systeme konnten je nach Materialbeschaffenheit und zu erwartenden Verformungen mit unterschiedlichen Messweiten und Befestigungsvorrichtungen ausgestattet werden. Die Wegaufnehmer waren jeweils so zu befestigen, dass sie einerseits die Probe in Ihrem Verhalten nicht nennenswert beeinflussten und andererseits im Falle eines Versagens der Probe nicht in Mitleidenschaft gezogen wurden. Dies erfolgte durch die Wahl der Befestigung (Federn, elastische Gummiringe) und durch Fangschnüre zum Schutz der Kabelanschlüsse.

Der Klemmung der zu prüfenden Proben im Versuchsrahmen musste besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, da durch die zyklische Beanspruchung ein Scheuern des Materials an metallischen Befestigungsteilen zu befürchten war. Das konnte weitestgehend durch die Anordnung von Gummiplatten, Papier- oder Vliesstofflagen in den sensiblen Bereichen verhindert werden. Für die Befestigung standen Capstan-, Schraub- und Keilklemmen zur Verfügung, die je nach Materialbeschaffenheit und -empfindlichkeit eingesetzt wurden.

Die statischen Zugprüfungen vor und nach der zyklischen Beanspruchung der Probekörper wurden an einer Anlage vom Typ UTS 10 mit externen Wegaufnehmern (L – Sensoren) durchgeführt. Der Prüfraum war mit einer 20 kN Kraftmessdose ausgestattet. Die Datenerfassung erfolgte über einen internen Rechner mit UTS Systemsoftware der Version 2.09. Die Klemmung der Proben erfolgte zunächst pneumatisch und dann mit hydraulischem Druck in Spannzeugen der Firma Instron. Die hydraulische Klemmung bot sich an, da sie vergleichsweise wenig freie

Probenlänge benötigt und dadurch eine zusätzliche Beschädigung durch erneutes Rollen oder Knicken der Proben, insbesondere nach den dynamischen Versuchen, vermieden werden konnte.

Für die Messungen der Raumklimas der Versuchshalle während der dynamischen Beanspruchung der Geokunststoffe kam ein elektronischer Messfühler und Datenlogger testostor 171 für die Aufzeichnung der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit zum Einsatz. Die Oberflächentemperatur der zu untersuchenden Proben und der Referenzproben wurde berührungsfrei mit einem IR-Thermometer vom Typ Minolta Lano Cyclops 300 AF gemessen. Zusätzlich zum beschriebenen Messfühler wurde die Lufttemperatur innerhalb der Versuchsrahmens, die durch die Wärmeabstrahlung der Hydraulikzylinder und -leitungen oberhalb der Raumtemperatur lag mit Hilfe eines elektronischen Thermometers technoterm 9500 beobachtet.

### 3.3.3 Versuchsdurchführung

Auf der Basis der in vorangegangenen Kapiteln hergeleiteten und erläuterten Randbedingungen und in Tabelle 10 zusammengefassten Daten wurde ein Versuchsprogramm zusammengestellt, um die Betriebsfestigkeit von Geokunststoffen und gegebenenfalls einen Abminderungsfaktor  $A_5$  für zeitlich veränderliche Einwirkungen zu ermitteln.

**Tabelle 10** Randbedingungen für die Laborversuche

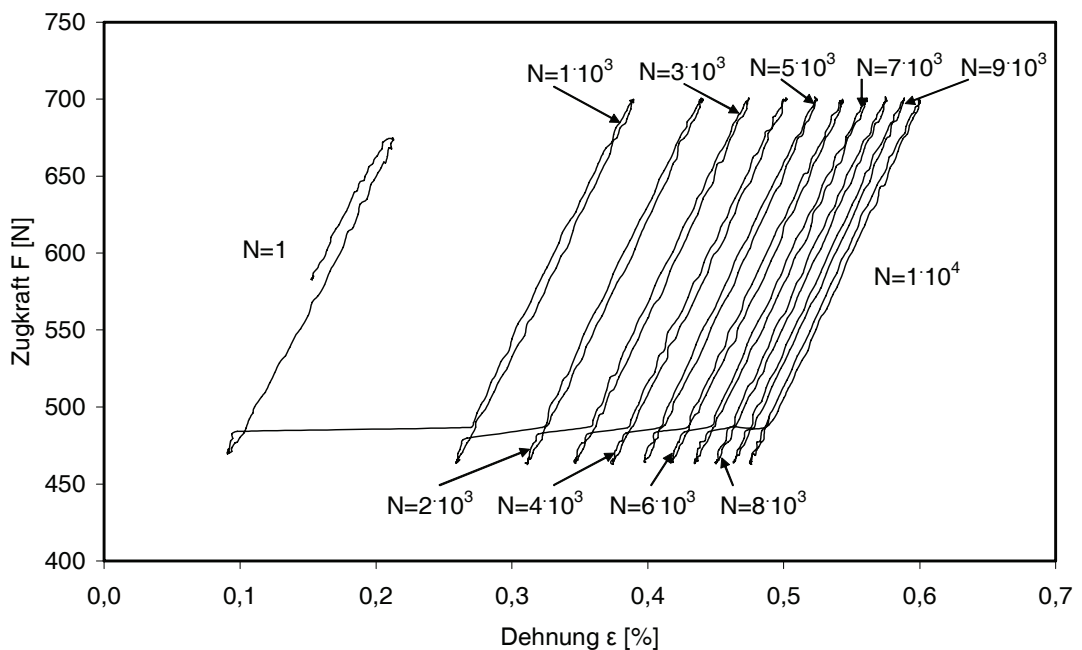
Kenngroße	Wert
Anzahl Lastwechsel N	$10^7$
Frequenz f	10 Hz
Dynamisches Verhältnis R	0,66

Zunächst wurde für jedes zu prüfende Material anhand von Einzelstrangprüfungen an jeweils 10 Proben die Kurzzeitzugfestigkeit  $R_{B,k0}$  bestimmt. Der sich daraus ergebende Median wurde als Referenzwert für die Ermittlung der Ausnutzungsgrades nach Gleichung 15 verwendet.

Daraus ließen sich dann mit Hilfe des dynamischen Verhältnisses  $R$  die Ober- und Unterspannung für die Versuche nach Gleichung 1 errechnen. Somit waren die individuellen Werte für die Versuche für jedes der zu prüfenden Materialien festgelegt.

Während einer Vielzahl von Vorversuchen hatte es sich als sinnvoll erwiesen, in zwei kleineren Schritten die Einstellungen der Regelung und die Klemmung des Materials in der Anlage zu überprüfen, bevor dann letztendlich der Versuch mit  $N = 10^7$  Lastwechseln durchgeführt wurde.

Die erste Stufe der Versuche erfolgte mit  $N = 10^4$  Lastwechseln um die Grundeinstellungen für die Regelung der Hydraulik zu ermitteln, insbesondere die PID-Regelung den jeweiligen Reaktionen der Materialien auf die Dynamik anzupassen. Mit diesen Versuchen sollte zum Ende der ersten 10.000 Lastwechsel das dynamische Verhältnis der alternierenden Zugkräfte von  $R = 0,66$  sichergestellt werden. Danach waren die Veränderungen des Materials so gering, dass die Regelung entweder von Hand oder per Software angepasst werden konnte.



**Abbildung 43** Entwicklung der Hystereseschleifen während der ersten  $10^4$  Lastwechsel von GG4-PP

Im nächsten Schritt wurden dann Versuche mit  $N = 10^5$  Lastwechseln gefahren. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf Beschädigungen des Materials durch die Klemmung und die Temperaturentwicklung gelegt. Aufgrund der Erfahrungen von [SÜRKEN-94] wurde die Temperaturentwicklung der Proben während der eigenen Versuche zunächst beobachtet. Probentemperaturen bis ca.  $30\text{ °C}$  wurden toleriert. Die Temperaturmessungen am Probenmaterial erfolgten periodisch. Während der Vorversuche für die Anpassung der Anlageneinstellungen wurden etwa alle  $N = 10^3$  Lastwechsel Werte der Oberflächentemperatur der Proben aufgenommen um das Materialverhalten zu analysieren. Bei allen Prüfungen wurden Kontrollmessungen über den gesamten Versuchszeitraum durchgeführt.

Im Wesentlichen wurden die Versuche dieses zweiten Schrittes dazu verwendet, die in den Versuchen mit  $N = 10^4$  Lastwechseln gefundene Probenklemmung zu verifizieren und wenn nötig zu optimieren. Diese große Zyklenzahl  $N$  in den Vorversuchen war erforderlich, da sich bei einigen Materialien erst mit zunehmenden Lastwechseln größere Dehnungen einstellten und sich deshalb die Spannungszustände in den Querschnitten der Proben und insbesondere an den Übergängen von den flexiblen Geokunststoffen zu den steifen Klemmen des Versuchsrahmens veränderten. Ursprünglich waren hierfür  $N = 10^6$  Lastwechsel vorgesehen. Doch nach den ersten Versuchen war zu erkennen, dass  $N = 10^5$  Lastwechsel einen vergleichbaren Informationsgehalt lieferten.

Die Versuche mit  $N = 10^4$  und  $N = 10^5$  Lastwechseln wurden jeweils mindestens 3-mal bzw. so oft wiederholt, dass mit mindestens einem Versuch die gefundenen Einstellungen verifiziert werden konnten, bevor mit der nächsten höhere Stufe der Lastwechselzahlen begonnen wurde. Da nach jedem Versuch die Restzugfestigkeit der Geokunststoffe gemessen wurde, konnten die Reproduzierbarkeit der Versuche und die Variationen einzelner Proben eingeschätzt werden. Sofern die Ergebnisse der Einzelversuche hinsichtlich ihres dynamischen Verhältnisses  $R$  und den einzutragenden Spannungen innerhalb der vorgegebenen Grenzen lagen und sich die Probentemperatur im unkritischen Bereich bewegte, wurden die Versuche mit  $N = 10^7$  Lastwechseln gestartet.

Der jeweils letzte Versuch, der dann bis zu mindestens  $N = 10^7$  Lastwechseln durchgeführt wurde, diente der Bestimmung der Betriebsfestigkeit der untersuchten Geokunststoffe hinsichtlich des zuvor definierten Anforderungsspektrums. Mit Hilfe



der abschließend bestimmten Restzugfestigkeit  $R_{B,k5}$  der Materialien konnten die materialspezifischen Abminderungsfaktoren  $A_5$  für zeitlich veränderliche Einwirkungen nach Gleichung 12 bestimmt werden.

Da die Probentemperatur bei Thermoplasten einen Einfluss auf das Spannungs-Dehnungsverhalten eines Geokunststoffes hat, wurden die Proben nach den zyklischen Versuchen bei einer Temperatur von 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit für mindestens 24 Stunden klimatisiert. Das war erforderlich, da sonst Referenzprobe und Versuchsmaterial auf unterschiedlichen Temperaturniveaus geprüft worden wären.

### 3.3.4 Zeitabhängiges Zugkraft-Dehnungsverhalten der untersuchten Polymere

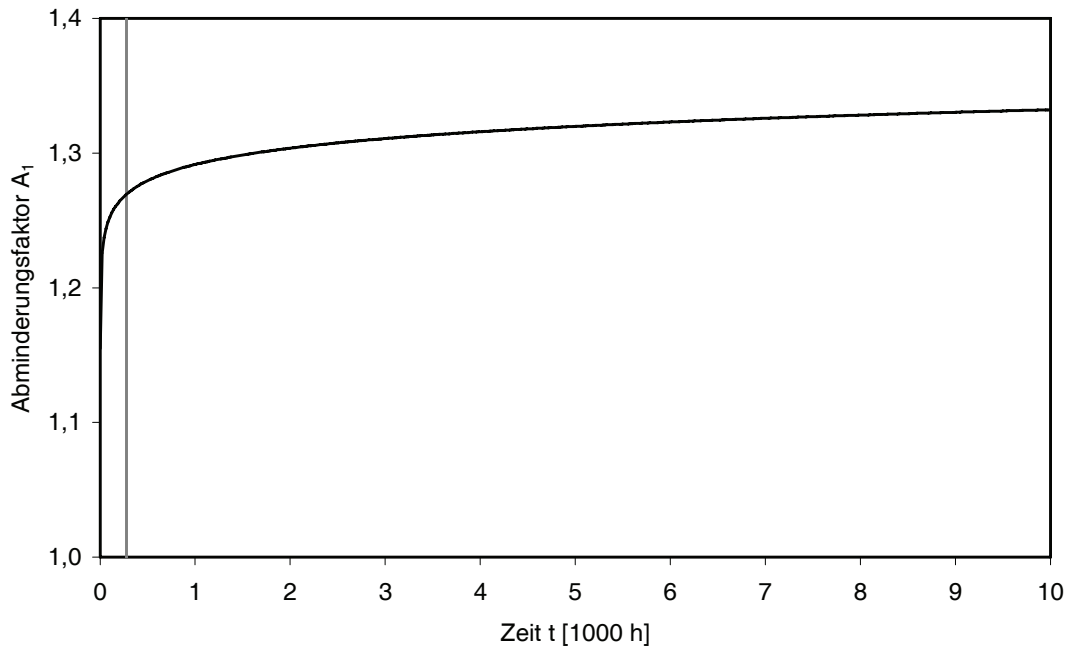
#### 3.3.4.1 Vorbemerkungen

Bei der Ermittlung der Oberlasten der einzelnen Versuche wurde entsprechend den Randbedingungen aus 3.3.3 die ermittelte charakteristische Kurzzeitzugfestigkeit  $R_{B,k0}$  nach Gleichung 15 um den sich aus der Zeitstandkurve ergebenden Abminderungsfaktor  $A_1$  reduziert.

$$R_{B,k1} = \frac{R_{B,k0}}{A_1}$$

#### Gleichung 15 Ermittlung der für den Versuch relevanten Zugfestigkeit

Mit einer Versuchsdauer  $t$  von etwa 278 Stunden, also weniger als 12 Tagen war die zeitliche Beanspruchung im Vergleich zur geplanten Nutzungsdauer von geokunststoffbewehrten Bauwerken relativ klein. Da aber gerade in den ersten Stunden der Effekt des Kriechens auf das Zeitstandverhalten von *teilkristallinen* Thermoplasten besonders hoch ist, musste dem Spannungs-Dehnungsverhalten und der Rheologie der hier untersuchten Geokunststoffe besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Wie groß der Einfluss Zeitstandverhaltens in den ersten Tagen sein kann, zeigt Abbildung 44.



**Abbildung 44** Abminderungsfaktor  $A_1$  für einen Geokunststoff aus PET

Die graue Linie in Abbildung 44 grenzt den für die Versuche relevanten Zeitrahmen von etwa 300 Stunden ab. Hier ist der Anstieg der Kurve am stärksten, bevor sie sich dann asymptotisch einem maximalen Abminderungsfaktor annähert. Kleine Abweichungen in der Zeit oder leichte Verschiebungen der Kurve durch Messstreuungen haben für kurze Zeiträume einen erheblichen Einfluss auf die zu ermittelnde Oberspannung  $\sigma_{\text{dyn,o}}$ .

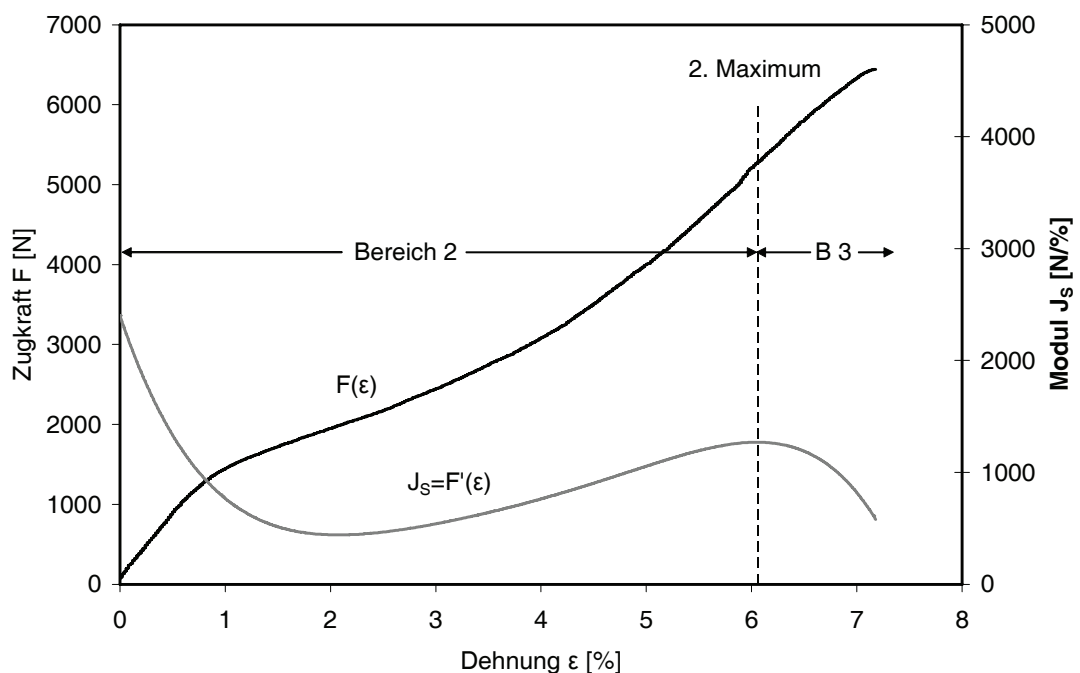
Eine Erklärung warum das so ist und in welchem Umfang dies so kurze Versuche, wie die durchgeführten beeinflussen kann, soll anhand der untersuchten Materialien erläutert werden.

### 3.3.4.2 Modell für PET

Die Zugkraft-Dehnungskurve von PET weist kein ausgeprägtes Fließplateau im Bereich der Höchstzugkraft auf (Abbildung 10 und Abbildung 45). Deshalb kündigt sich der Bruch erst kurz vor Erreichen der Höchstzugkraft durch einen geringeren Anstieg der Zugkraft-Dehnungskurve an. Visualisierbar wird dies durch Differenzierung des Grafen und die anschließende Extremwertbetrachtung seiner ersten Ableitung. Mit der Abnahme des Anstieges der Zugkraft-Dehnungskurve geht

ein Maximum im Modulverlauf der Materialien einher. Dieses Phänomen ist besonders bei Geokunststoffen aus PET ausgeprägt.

Bei den hier untersuchten Geokunststoffen fällt auf, dass die massiven und extrudierten Streifen der Geogitter, im Gegensatz zu den von [HEUVEL-92] und [HEUVEL-92a] untersuchten Spinnfasern (Abbildung 10), so vorbehandelt wurden, dass der Bereich B1 faktisch in der Produktionsphase des Ausgangsmaterials bereits verstreckt wurde. (Abbildung 45)



**Abbildung 45 Analyse der Zugkraft-Dehnungslinie der Referenz von GG1-PET**

Das zweite Maximum der Referenzprobe für die zyklischen Versuche liegt für das GG1-PET bei  $\varepsilon = 6,06\%$  und einer Zugkraft  $F = 5267,2\text{ N}$ . Wenn nun nach Gleichung 15 eine Zugfestigkeit  $R_{B,k1}$  für den Versuch ermittelt wird, die größer ist als die Zugkraft  $F$  am 2. Maximum, dann werden die Versuche im Bereich B3 nach Abbildung 10 und der Beschreibung zu Abbildung 13 durchgeführt. In diesem Bereich ist das Verhalten von PET nach [HEUVEL-92] bereits durch ein teilweises Versagen von Molekülketten beeinflusst. Es unterliegt damit ebenso großen Schwankungen hinsichtlich seines Zeitstandbruchverhaltens. Das wird auch bei der statistischen Auswertung und der Festlegung des 95 %-igen Vertrauensbereiches für den

Abminderungsfaktor  $A_1$  deutlich. Die Standardabweichungen sind dann so groß, dass dieser Wert zu Zugkräften führt, die unterhalb der Zugkraft  $F$  am 2. Maximum liegen und die aufnehmbaren Zugkräfte damit dem Verlauf der Zugkraft-Dehnungslinie nach dem Bereich B2 (Abbildung 10) zugeordnet werden können.

Im Vorfeld zu den eigentlichen Versuchen wurden Vorversuche mit Oberspannungen  $\sigma_{dyn,o}$  über den Zugkräften am 2. Maximum gefahren. Dabei war das Verhalten des Materials nicht prognostizierbar und Brüche traten völlig unkontrolliert auf. Aufgefallen war dies insbesondere bei den PID – Einstellungen zur Regelung der Ober- und Unterspannungen der sinusförmigen Beanspruchungen. Diese waren bei Ausnutzungen des Geokunststoffes bis in den Bereich B3 hinein nur begrenzt von einer Probe auf eine andere desselben Geogitters übertragbar. Sobald die Ausnutzung der Materialien aus PET im Bereich B2 lag, mussten an der PID - Regelung nur die in 3.3.3 beschriebenen Anpassungen vorgenommen werden.

#### **3.3.4.3 Überlegungen zum Verhalten von Polyolefinen**

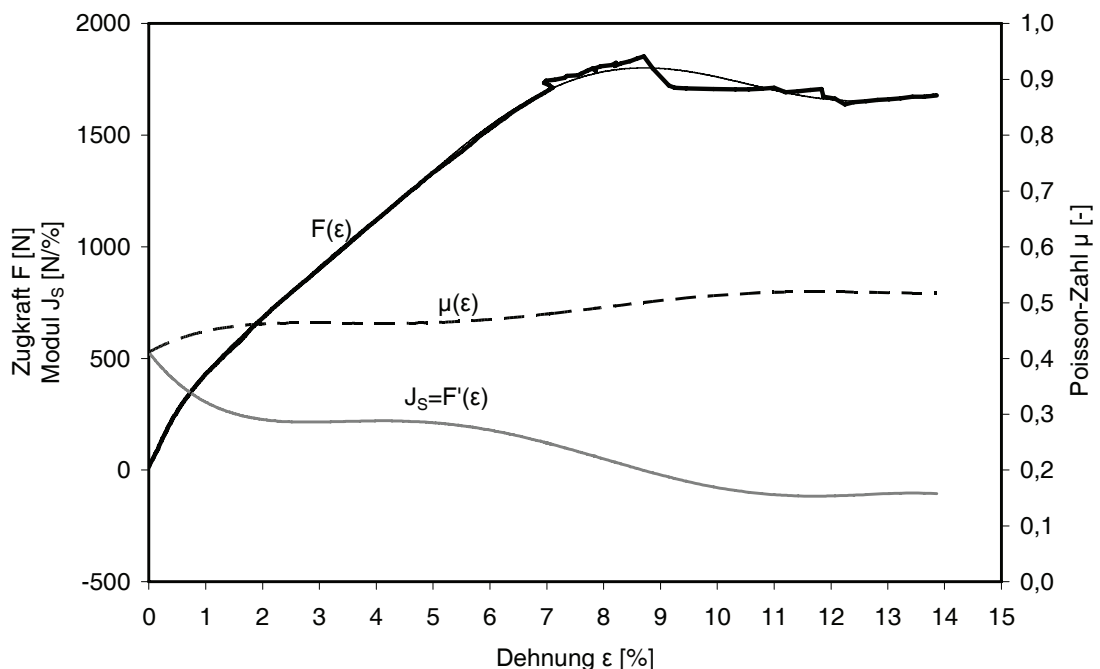
Auch bei den Polyolefinen, zu denen die hier untersuchten Polypropylen- und Polyethylensorten gehören, soll zunächst der Einfluss des Abminderungsfaktors  $A_1$  an Hand von Zugkraft-Dehnungsdiagrammen genauer betrachtet werden. Vorversuche haben gezeigt, dass die Abminderungsfaktoren  $A_1$ , die aus Zeitstandbruchkurven ermittelt wurden, für den relativ kurzen Indexversuch von 12 d mit großer Wahrscheinlichkeit zu klein sind. Die Proben haben regelmäßig vor Erreichen der geplanten Lastwechselzahl  $N$  versagt.

Die Ausgangsdaten für die hier angestellten Überlegungen konnten am einfachsten an einem massiven Material aus PP mit einfacher, nahezu rechteckiger Querschnittsgeometrie und anisotropen mechanischen Eigenschaften in Längsrichtung des Bauteils ermittelt werden.

Durch die Verwendung von Zeitstandbruchkurven für die Bestimmung des Ausnutzungsgrades für eine bestimmte Nutzungsdauer wird akzeptiert, dass die Dehnungen während des Zeitstandversuches wesentlich größer sein können (z.T. das 5-fache und mehr) als die im Kurzzeitzugversuch bis zum Erreichen der maximalen Zugfestigkeit ermittelten.

Durch den Ausnutzungsgrad wird die Zeit bis zum Bruch wesentlich bestimmt. Je größer dieser Zeitraum ist desto größer sind die Kriechdehnungen.

Deshalb ist grundsätzlich ein Abgleich der in einem Kurzzeitversuch ermittelten Festigkeiten mit den langfristig zur Verfügung stehenden Festigkeiten vorzunehmen. Das ist zum einen für die durchgeführten Indexversuche mit einer relativ kurzen Versuchsdauer von wenigen hundert Stunden wichtig, aber auch für das Bauwerksmonitoring, bei dem über Jahre hinweg Verformungen beobachtet werden können. Um dies zu berücksichtigen sind die gemessenen Dehnungen nicht mit denen aus dem Kurzzeitversuch zu vergleichen, sondern es sind Isochronen zu verwenden, um die in der Bewehrungslage wirkenden Kräfte zu ermitteln. Das bedeutet dann aber auch, dass die induzierten Kräfte durch die Relaxation der Geokunststoffe wesentlich geringer sind als vielerorts angenommen.



**Abbildung 46** Beispielhafte Charakterisierung des Zugkraft-Dehnungsverhaltens eines Polyolefins anhand der Referenzkurve von GG4-PP

Von Bedeutung für das visko-elastische und visko-plastische Verhalten von Polyolefinen ist der Beginn des viskosen Fließens.

Während des Zugversuches vergrößert sich die Länge des Probekörpers bis zum Bruch. Im Bereich der elastischen Verformungen wird das Material zwischen den Klemmen über seine gesamte Länge nahezu gleichmäßig gedehnt. Die in diesem Abschnitt des Zugversuches auftretende Querkontraktion verteilt sich über die gesamte Länge des Probekörpers. Deshalb ist die Änderung des

Ausgangsquerschnittes der Probe nur sehr gering im Vergleich zu der plastischen Ausbildung einer Einschnürung. Ein Ausdruck dafür ist die Poisson – Zahl  $\mu$ . Sie spiegelt das Verhältnis der senkrecht zur Spannung entstehenden Querkontraktion  $\varepsilon_q$  zur Längsdehnung  $\varepsilon$  wider.

$$\mu = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon}$$

**Gleichung 16 Definition Poisson – Zahl  $\mu$**

Für die anschließende Analyse der Abbildung 46 wurde die Poisson – Zahl  $\mu$  nach der Mischungsregel von Gienke und Meder (Gleichung 17) aus [SAECHTLING-01] berechnet.

$$\mu = 0,3 + 0,2 \cdot \left( 1 - \frac{E_n}{E_0} \right)$$

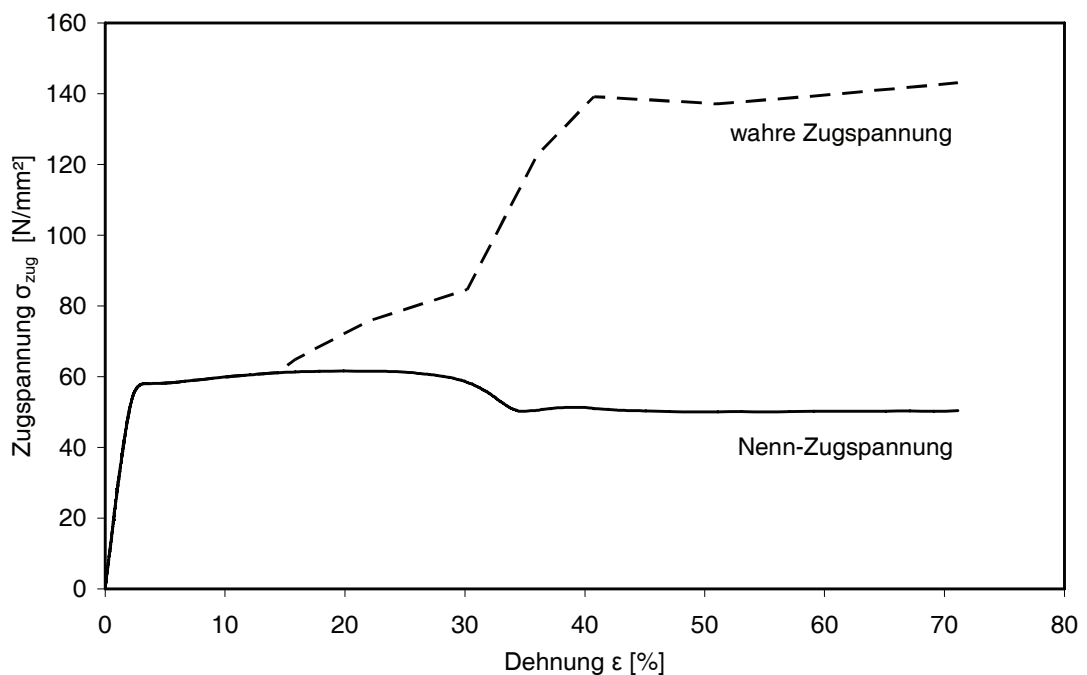
**Gleichung 17 Mischungsregel für die Poisson – Zahl aus [SAECHTLING-01]**

Aus der nahezu konstanten Poisson-Zahl von  $\mu \sim 0,45$ . Lässt sich die Homogenität des untersuchten Materials ableiten. Die Poisson-Zahl liegt im Bereich zwischen 0,3 und 0,5, so dass nach [SAECHTLING-01] von einem homogenen und isotropen Kunststoff ausgegangen werden kann.

Kurz vor dem Erreichen der maximalen Kurzzeitzugfestigkeit weist die Zugkraft-Dehnungslinie Unstetigkeiten auf. Eine beginnende Einschnürung kündigt sich damit an. Es kommt zu einer Volumenänderung des Probenkörpers im Bereich der Einschnürung. Das spiegelt der unstete Verlauf der Poisson-Zahl  $\mu$  in diesem Bereich wider. Eine lokale Querschnittsabnahme des Probekörpers, hat mehraxiale Spannungen zur Folge, die der Einschnürung entgegenwirken. Die zunehmende Einschnürung kennzeichnet den allmählichen Übergang zum Fließen. Da der mehraxiale Spannungszustand nicht mehr vollständig abgebaut werden kann, ist die mittlere Poisson-Zahl  $\mu$  ab diesem Punkt  $\mu = 0,5$  größer als am Anfang. Das spricht für eine beschleunigte Verjüngung des Querschnittes, da jetzt die Spannungen im Bereich der Einschnürung konzentriert werden. Die Längs- und Querdehnungen

werden nun nicht mehr über die gesamte freie Einspannlänge verteilt. Sie entstehen zu einem überwiegenden Teil im Bereich der Einschnürung. Deshalb ist die Poisson – Zahl  $\mu = 0,5$  lediglich als Indiz für das anisotrope Spannungsverhalten in der Probe zu sehen. Sie wurde über die gesamte freie Probenlänge berechnet, da die Geschwindigkeiten der Kurzzeitzugversuche zu groß sind um die Einschnürung mit konventionellen Mitteln zu messen.

Im Gebiet der Einschnürung wird das Material höher beansprucht als in den übrigen Bereichen. Das führt zu einer Spannungskonzentration in dem kleineren und steiferen Einschnürungsquerschnitt. Damit spiegeln die standardmäßig verwendeten Zugkraft-Dehnungsdiagramme nicht die wahren Spannungszustände im Material wieder. Die wahren Spannungen nehmen deshalb auch nach dem Maximalwert der Zugkraft-Dehnungslinie in Abbildung 46 zu. Abbildung 47 zeigt beispielhaft den beschriebenen Unterschied anhand eines Schulterstabes aus Polyamid 6 (PA6). Die Probe war durch ihre Geometrie bei vergleichbarem Spannungsdehnungsverlauf besser geeignet als das Längselement des GG4-PP. Die konstante Prüfgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass eine Vermessung des Querschnittes möglich war.

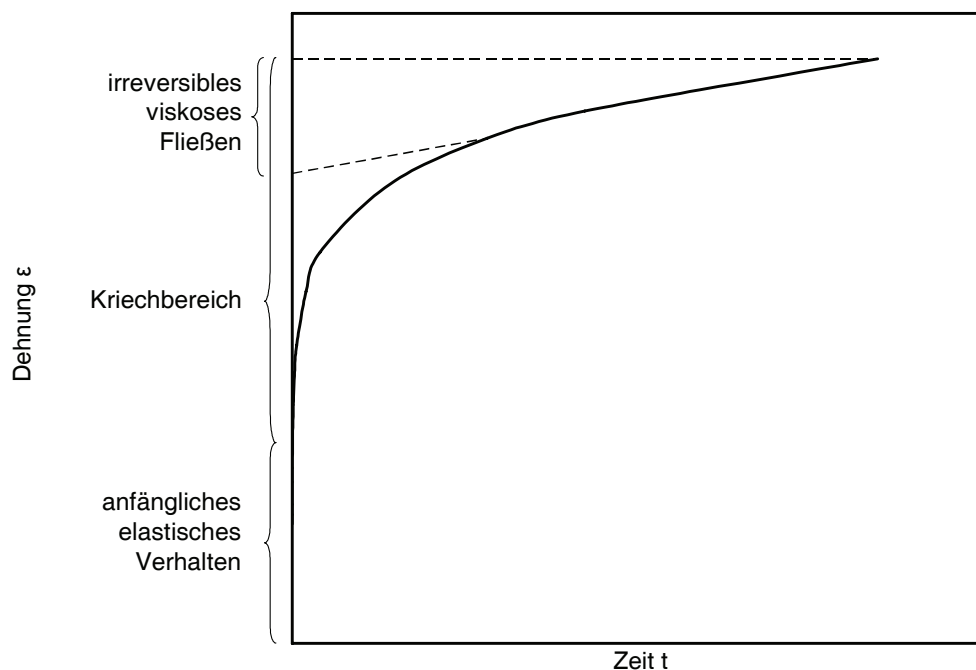


**Abbildung 47** Scheinbarer und wahrer Verlauf der Zugspannungen in einem Schulterstab aus PA6

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Zugkraft-Dehnungskurven aus genormten Versuchen, die die Nennfestigkeit ermitteln, nur bis zur Fließgrenze das Verhalten des Materials mit ausreichender Genauigkeit darstellen. Werte die dabei für den Bereich des viskosen Fließens ermittelt werden, suggerieren eine geringere Beanspruchung des Materials und liegen damit auf der unsicheren Seite. Das führte in den Vorversuchen zu unkontrollierbaren Brüchen der untersuchten Geokunststoffe.

Um dem in den eigentlichen Versuchen vorzubeugen, wurden Überlegungen zur Begrenzung der Verformungen und für die Ermittlung des Abminderungsfaktors  $A_1$  angestellt.

Die Kriechkurve amorpher Polymere kann nach [COWIE-97], wie in Abbildung 48 dargestellt, beschrieben werden.



**Abbildung 48 Schematische Darstellung einer Kriechkurve in Anlehnung an [COWIE-97]**

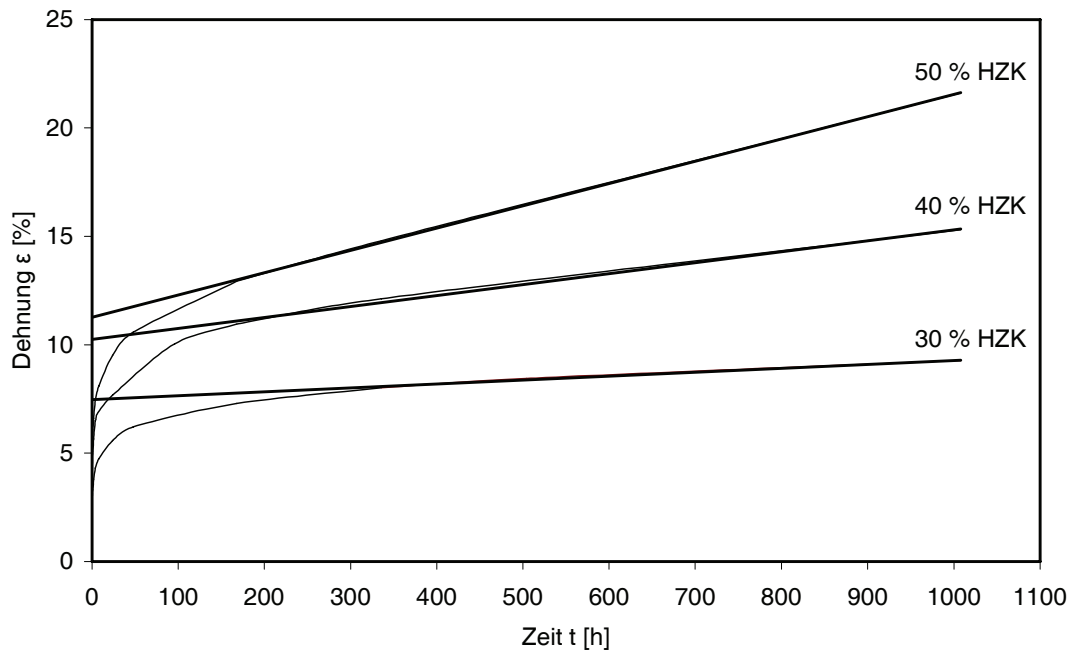
Im Bereich des anfänglich elastischen Verhaltens werden Initialdehnungen unmittelbar mit der Lasteintragung hervorgerufen. Diese Verformungen sind umgekehrt proportional zum Modul des Materials.



Daran schließt sich ein Kriechbereich an, in dem die Dehnungen anfangs sehr schnell zunehmen und sich bei PP und PE mit dem Übergang zum viskosen Fließen auf eine nahezu konstante Kriechgeschwindigkeit verlangsamen.

Diese Erklärung entspricht der von [SHERBY-56], die über das Erreichen einer konstanten Kriechrate den Beginn des viskosen Fließens definiert haben. Allerdings decken sich die hier an einem anisotropen Polypropylenmaterial gemachten Beobachtungen nicht mit der Interpretation von [McGOWN-84], da dort ein PE-Material mit isotropen Teilbereichen untersucht wurde. Bei diesem wandert der am stärksten beanspruchte Querschnitt zunächst von den relativ anisotropen Stabmitten mit einer kleinen Poisson-Zahl  $\mu$  zu den Übergangsbereichen der isotropen Knoten mit einer etwas größeren Poisson-Zahl  $\mu$ .

So lange sich der maßgebliche Querschnitt im anisotropen Bereich befindet, ist das Kriechverhalten des PE-Materials bei [McGOWN-84] vergleichbar mit dem hier beschriebenen Verhalten von PP. Während sich die Kriechrate des getesteten PP-Polymers asymptotisch ihrem Nullwert nähert, weist die Kriechrate des von [McGOWN-84] untersuchten PE-Materials einen minimalen Wert auf, um danach wieder zuzunehmen. Ob der Wendepunkt der Kriechrate mit dem Beginn des viskosen Fließens gleichzusetzen ist, oder ob es nur ein Abbruchkriterium für die vorgestellten Versuche darstellte, hat [McGOWN-84] nicht erläutert.



**Abbildung 49** In 1000 – h – Versuch ermittelte Kriechkurven für GG4-PP

In Abbildung 49 sind die Kriechkurven für GG4-PP für einen Zeitraum  $t = 1000$  h aufgetragen und nach der Interpretation von [COWIE-97] ausgewertet worden. Im Ergebnis dessen ist festzustellen, dass sich bei Auslastungsgraden des GG4-PP zwischen 30 % und 40 % seiner Kurzzeitzugfestigkeit (HZK) noch innerhalb des Versuchszeitraumes konstante Kriechgeschwindigkeiten einstellen, die auf Dehnungen von etwa 10 % über die Nutzungsdauer des Geokunststoffes schließen lassen. [McGOWN-84] hat ein vergleichbares Verhältnis für das von ihm untersuchte Material aus PE bestätigt.

Aufgrund dieser Betrachtungen wurden die Gesamtdehnungen (Initialdehnung und Kriechdehnung) der Geokunststoffe aus PP und PE für die Ermittlung des Abminderungsfaktors  $A_1$  auf 10 % begrenzt.

### 3.3.4.4 Temperaturverhalten

Geokunststoffe werden in der Regel aus Thermoplasten hergestellt. Die Eigenschaften von Thermoplasten verändern sich mit ihrer Temperatur. In Abhängigkeit von der *Kristallinität* des Polymers können bestimmte Eigenschaften verschiedenen Temperaturbereichen zugeordnet werden. Im praktischen Einsatz werden die verschiedenen Bereiche kaum wahrgenommen, da die Bodentemperatur

mit geringen jahreszeitlichen Schwankungen an der unmittelbaren Oberfläche mit Werten zwischen 10°C und 15°C nahezu konstant ist.

Für die Versuche im Labor war jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Geokunststoffe unter der anhaltend hohen zyklischen Beanspruchung durch innere Reibung erwärmen können. [SÜRKEN-94] hatte derartige Erfahrungen mit seinen Versuchen an einem PEHD – Geogitter gemacht. Unter den von ihm gewählten Versuchsbedingungen stiegen die Oberflächentemperaturen des Materials auf ca. 50°C an.

Derartige Temperaturerhöhungen waren besonders bei Polyolefinen zu berücksichtigen. Auf Grund ihrer Molekülstruktur war eine höhere Wärmeentwicklung während der Versuche zu erwarten gewesen. Da die Glasübergangstemperatur  $T_g$  sowohl von PP als auch von PEHD unterhalb der während der Versuche herrschenden Temperaturen liegt (Tabelle 9), könnte eine Erhöhung der Materialtemperatur sehr schnell zu einem merklich veränderten Spannungs-Dehnungsverhalten führen. Eine ständige Kontrolle der Materialtemperatur in Abhängigkeit von der gewählten dynamischen Beanspruchung ist bei derartigen Versuchen angeraten.

### **3.3.5 Verfahren der chemischen Analytik zur Beurteilung der Morphologie der untersuchten Polymere nach zyklischer Beanspruchung**

#### **3.3.5.1 IR - Spektroskopie**

Einigen Polymeren der Geokunststoffe war bei ihrer Herstellung Ruß zugefügt worden (vgl. Tabelle 8). Dies und die massive Struktur der Geokunststoffe haben Durchlichtspektren ausgeschlossen. Das Herstellen von Folien war wegen der hohen Verstreckung der Geokunststoffe problematisch und hätte möglicherweise zu Beschädigungen des Materials geführt, deren Umfang nicht einzuschätzen war. Deshalb wurden Auflichtspektren angefertigt. Die Eindringtiefe der IR - Strahlen war damit auf ungefähr eine Wellenlänge  $\lambda_{IR}$  zwischen 2,5  $\mu\text{m}$  und 15  $\mu\text{m}$  begrenzt. Damit wurde nur der den äußeren Umwelteinwirkungen am stärksten ausgesetzte äußerste Bereich der Proben untersucht.

### 3.3.5.2 DSC - Messungen

Für die Durchführung von DSC-Messungen gibt es eine große Bandbreite an Erfahrungen und daraus resultierenden Empfehlungen für den Versuchsablauf.

**Tabelle 11 Versuchsparemeter für DSC – Messungen**

Thermischer Effekt		Empfohlene Werte		Gewählte Werte
		Glasübergang	Schmelzen	
Einwaagemenge	[mg]	10 – 20	5 – 10	10
Heizrate	[K/min]	20	10	10

Für die beiden in Tabelle 11 genannten Übergangsbereiche der Wärmestromkurven im Bereich des Glasübergangs- und des Schmelzpunktes überschneiden sich die Probenmengen bei 10 mg.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen war es das Ziel, verschiedene Proben miteinander zu vergleichen. Es kam dabei weniger darauf an, die Temperaturprogramme zu variieren, um eine statistisch gesicherte Auswertung der einzelnen Unstetigkeiten in den DSC-Kurven zu erreichen. Vielmehr sollten die Veränderungen der Morphologie der Polymere vor und nach den zyklischen Beanspruchungen in Relation zueinander festgestellt werden. Dazu war es notwendig, paarweise identische Temperaturprogramme zu fahren. Für die Festlegung des Temperaturprogrammes hinsichtlich Heizrate und Probenmenge wurde auf Erfahrungs- und Richtwerte aus [EHRENSTEIN-03], die [DIN EN ISO 11357] und die [DIN 53765] zurückgegriffen, die sinnvolle Ergebnisse erwarten ließen.

Ob und in welchem Umfang die Proben Copolymere, *Nukleierungsmittel*, Additive etc. enthalten, wurde bei der Festlegung der Probenmenge nicht berücksichtigt. Für einen direkten Vergleich gleichartiger Proben war dies nicht zwingend erforderlich.

Unter Berücksichtigung der beschriebenen Vorüberlegungen zu den DSC – Analysen wurde für alle untersuchten Polymere ein Temperaturprogramm mit zwei Aufheizphasen zusammengestellt. Zunächst wurden die einzelnen Proben von Raumtemperatur auf  $T = -40\text{ °C}$  gekühlt. Als Segment- bzw. Spülgas wurde Stickstoff  $N_2$  mit 10 l/min eingeleitet. Die Temperaturregelung insbesondere die Abkühlung der

Probe erfolgten ebenfalls mit Stickstoff  $N_2$ . Die Kühlrate  $v_k$  betrug 10 K/min und wurde für die Dauer der Messungen und alle untersuchten Materialien konstant gehalten. Danach wurden die Proben mit einer Heizrate  $v_h$  von 10 K/min, die ebenfalls für alle Materialien gleich war, auf  $T = 280 \text{ °C}$  erhitzt. Daran schloss sich ein erneuter Abkühlvorgang auf  $T = -40 \text{ °C}$  an. Die 2. Aufheizphase erfolgte ebenfalls auf  $T = 280 \text{ °C}$ . Abschließend wurden die Proben wieder auf Raumtemperatur gekühlt. Danach war der Versuch beendet.



## 4 Ergebnisse und Auswertung der eigenen Versuche

### 4.1 Mechanische Beanspruchung der Geokunststoffe

#### 4.1.1 Vorbemerkungen

Bei den durchgeführten Versuchen wurden neben der Überwachung der Eingangssignale wie dem sinusförmigen Eintrag der Zugkraft  $F$ , der Erregerfrequenz  $f$  und der Anzahl der Lastwechsel  $N$  folgende Ausgangssignale aufgezeichnet:

zur Mechanik

- Weg des Hydraulikzylinders in Abhängigkeit von der Zeit  $t$
- Zugkraft  $F$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$
- Messungen der Wegaufnehmer in Abhängigkeit von der Zyklenzahl  $N$

zum Klima

- Relative Feuchte  $\Phi$  und Lufttemperatur  $T$  des Raumklimas in der Prüfhalle
- Lufttemperatur  $T$  innerhalb des Prüfrahmens in unmittelbarer Umgebung der beanspruchten Probe
- Oberflächentemperatur  $T_o$  einer unbeanspruchten Referenzprobe im Bereich des Prüfrahmens
- Oberflächentemperatur  $T_o$  der zyklisch beanspruchten Probe

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen lag auf möglichen Veränderungen der Geokunststoffe, die sich auf ihre mechanischen Eigenschaften insbesondere ihr Zugkraft-Dehnungsverhalten auswirkten. Dabei wurden zwei unterschiedliche Herangehensweisen gewählt. Die erste folgte der allgemeinen Betrachtungsweise, wie sie für Bemessungen von KBE-Konstruktionen üblich ist. Dazu wurden die ermittelten Zugkräfte der Referenzproben vor den zyklischen Versuchen den Restzugfestigkeiten der beanspruchten Proben gegenüber gestellt. Aus diesem Vergleich ließe sich der Abminderungsfaktor  $A_5$  für zeitlich veränderliche Einwirkungen nach Gleichung 12 errechnen.

Darüber hinaus wurden aber nicht nur die Höchstzugkräfte der Proben miteinander verglichen. Wie in 3.3.4.2 und 3.3.4.3 erläutert, gibt es im Verlauf der Zugkraft-Dehnungslinien der verschiedenen Polymere charakteristische Punkte, die Rückschlüsse auf den aktuellen Ausnutzungsgrad des jeweiligen Geokunststoffes zulassen. Dort wo es möglich war, wurden diese charakteristischen Punkte für die

Auswertung und Normierung der Zugkraft-Dehnungskurven herangezogen. Dadurch konnten Veränderungen der verschiedenen Geokunststoffe während der zyklischen Indexversuche besser visualisiert werden.

In einem nächsten Schritt wurden die aufgezeichneten Hystereseschleifen in die Auswertungen einbezogen. Auf ihrer Basis konnten Aussagen zum Steifigkeitsverhalten und zum Einfluss des Kriechens der Geokunststoffe während der Versuche gemacht werden. Da die aufgezeichneten Hystereseschleifen für die untersuchten Materialien und die gewählte Beanspruchung sehr schlank waren, wurde keine gesonderte Auswertung der Be- und Entlastungsphasen vorgenommen. Vereinfachend wurden die Sekanten der Hystereseschleifen, die durch den unteren und oberen Wendepunkt also die Extremwerte der Oberspannung  $\sigma_{\text{dyn,o}}$  bzw. Unterspannung  $\sigma_{\text{dyn,u}}$ , verliefen für die Auswertung herangezogen. Über den Anstieg dieser Sekanten konnte die Neigung der Hystereseschleifen ermittelt werden. Die Neigung der Hystereseschleifen ist ein Ausdruck für die Steifigkeit eines Materials. Neben der Neigung der Hystereseschleifen verändert sich auch die Lage der Hystereseschleife im Zugkraft-Dehnungsdiagramm mit zunehmender Anzahl der Lastwechsel  $N$ . Dieses Verhalten lässt in einem gewissen Umfang Rückschlüsse auf den Grad der Kriechverformungen des Materials zu. Allerdings können diese auch durch die so genannten Trainingseffekte der Geokunststoffe durch die zyklische Beanspruchung überlagert werden.

Bei der Auswertung des Zugkraft-Dehnungsverhaltens müssen Einschränkungen hinsichtlich der Vergleichbarkeit einzelner Produkte gemacht werden. Da die Daten für die Abminderungsfaktoren  $A_1$  von den Herstellern der jeweiligen Produkte zur Verfügung gestellt wurden, kann es zu Schwankungen bei der Ermittlung der Ausnutzungsgrade der einzelnen Materialien gekommen sein. Wenn Zeitstandbruch- und Kriechkurven nicht alle im selben Labor durchgeführt wurden, treten nicht quantifizierbare Abweichungen in den Ergebnissen auf, da der Einfluss des Versuchsaufbaus und seiner Durchführung unterschiedlich sein kann.

Abschließend wurden die umfangreichen Aufzeichnungen der Temperaturen zusammengefasst und ausgewertet. Dazu sind die verschiedenen Umgebungstemperaturen und ihre Auswirkungen auf den Versuchsablauf betrachtet worden. Ebenso wurde die Oberflächentemperatur der Proben selbst gemessen und es wurde untersucht in welchem Umfang erhöhte Raum- und Probentemperaturen noch zu tolerieren waren. Das hatte einen praktischen Hintergrund, da die



Probentemperatur zum einen von der Raumtemperatur und zum anderen auch von der abgestrahlten Wärme der hydraulischen Anlagen beeinflusst wurde.

#### 4.1.2 Zugkraft-Dehnungsverhalten vor, während und nach den zyklischen Beanspruchungen

##### 4.1.2.1 Zugkraft-Dehnungsverhalten von GG1-PET

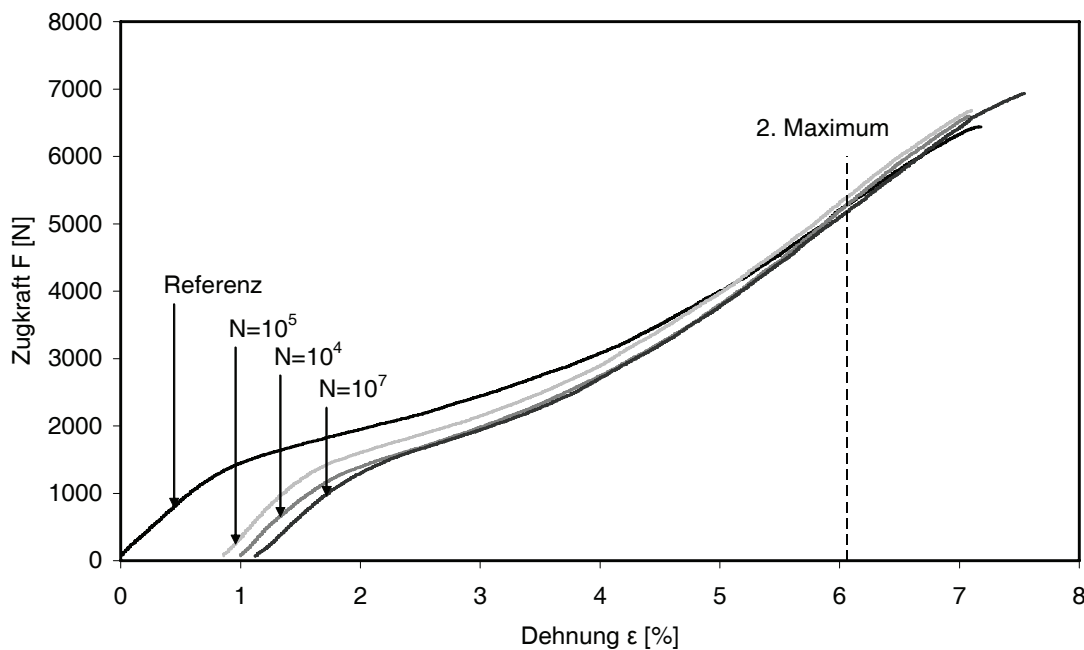
Wie bereits bei den Vorüberlegungen zu den Versuchen in 3.3.4.2, wurde bei der Auswertung der statischen Zugversuche der Referenzmaterialien vor und der Proben nach den zyklischen Beanspruchungen auf die Untersuchungen von [HEUVEL-92] und [HEUVEL-92a] sowie [VOSKAMP-01] zurückgegriffen.

**Tabelle 12 Messergebnisse für das Material GG1-PET**

Lastwechsel N	2. Maximum			Bruch		
	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	F	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	F
[-]	[%]	[%]	[N]	[%]	[%]	[N]
1 (Referenz)	6,06	0,00	5267	7,18	0,00	6441
$10^4$	5,06	-1,00	5270	6,08	-1,10	6599
$10^5$	5,20	-0,86	5382	6,24	-0,94	6688
$10^7$	4,94	-1,12	5167	6,42	-0,76	6936
Mittelwert			5271			6666
Standardabweichung			88			207
Variationskoeffizient			1,67			3,11

Für das Material GG1-PET wurden die Zugkraft-Dehnungskurven der Referenzproben und der Materialien nach der zyklischen Beanspruchung so verschoben, dass ihre 2. Maxima wie in Abbildung 50 übereinander lagen. Ein Vergleich der Variationskoeffizienten in Tabelle 12 für die beiden Fälle der Auswertung nach den Zugkräften am 2. Maximum und den ermittelten Höchstzugkräften im Moment des Bruchs zeigt, dass der Vergleich mit dem 2. Maximum als Kriterium zu genaueren Ergebnissen führt. Im Umkehrschluss zu den in 3.3.4.2 beschriebenen Forschungen war zu erwarten, dass die Zugkräfte am 2. Maximum nahezu konstant sind, da PET bis zu diesem Punkt eine intakte Molekülstruktur aufweist.

Der Variationskoeffizient für die ermittelten Zugkräfte beim Bruch ist zwar relativ klein aber dennoch beinahe doppelt so groß wie der für die Werte am 2. Maximum. Der Variationskoeffizient für die Höchstzugkraft bis zum Bruch wäre nicht in die Betrachtungen eingeflossen, wenn sich die Restzugfestigkeit nicht tendenziell erhöht hätte, denn eine Verringerung der Restzugfestigkeit im Vergleich zur Kurzzeitzugfestigkeit ist der Grund, warum Abminderungsfaktoren ermittelt werden.

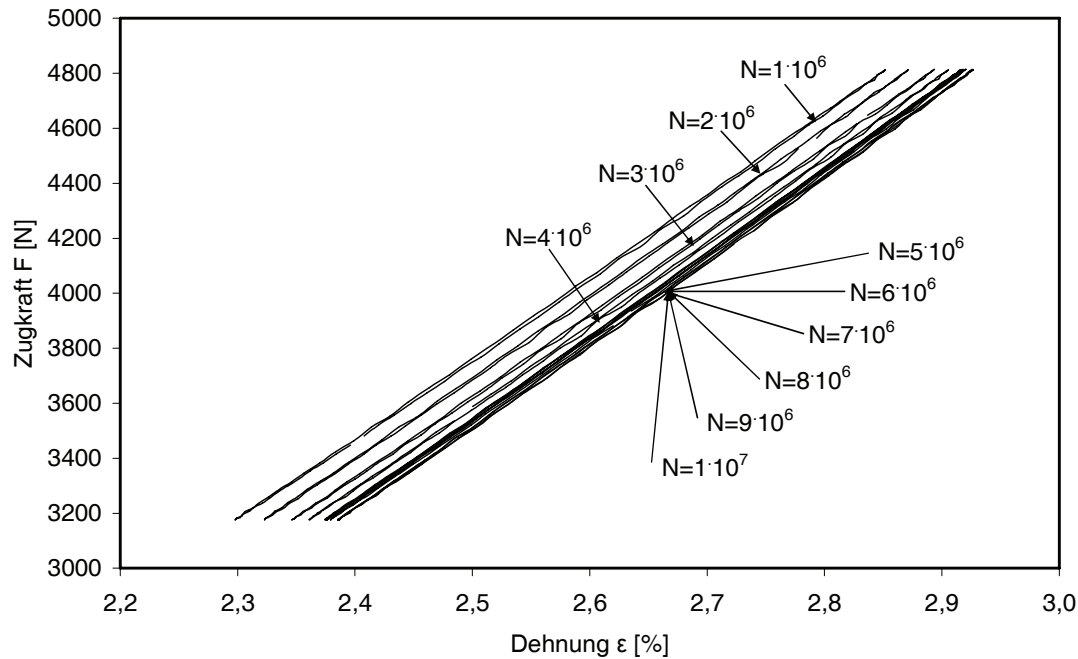


**Abbildung 50** Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung von GG1-PET

Der Versatz mit dem die Kurven auf der Abszisse beginnen, ist auf Kriechvorgänge und so genannte Trainingseffekte der zyklischen Beanspruchungen auf das Material zurückzuführen. Nach [VOSKAMP-01] werden durch Kriechvorgänge irreversible Dehnungen in das Material eingetragen, die in Zugversuchen durch die Differenz in den Dehnungen ermittelt werden können. Das trifft auch auf diese Versuche zu. Für das hier untersuchte Material und die gewählten Randbedingungen der Versuche machen sich sowohl Kriechvorgänge als auch Trainingseffekte bemerkbar. Die Kriechvorgänge könnten für PET theoretisch über den Versatz der Zugkraft-Dehnungslinien in Abbildung 50 quantifiziert werden. Dazu ist es allerdings erforderlich, dass sich das Material hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften

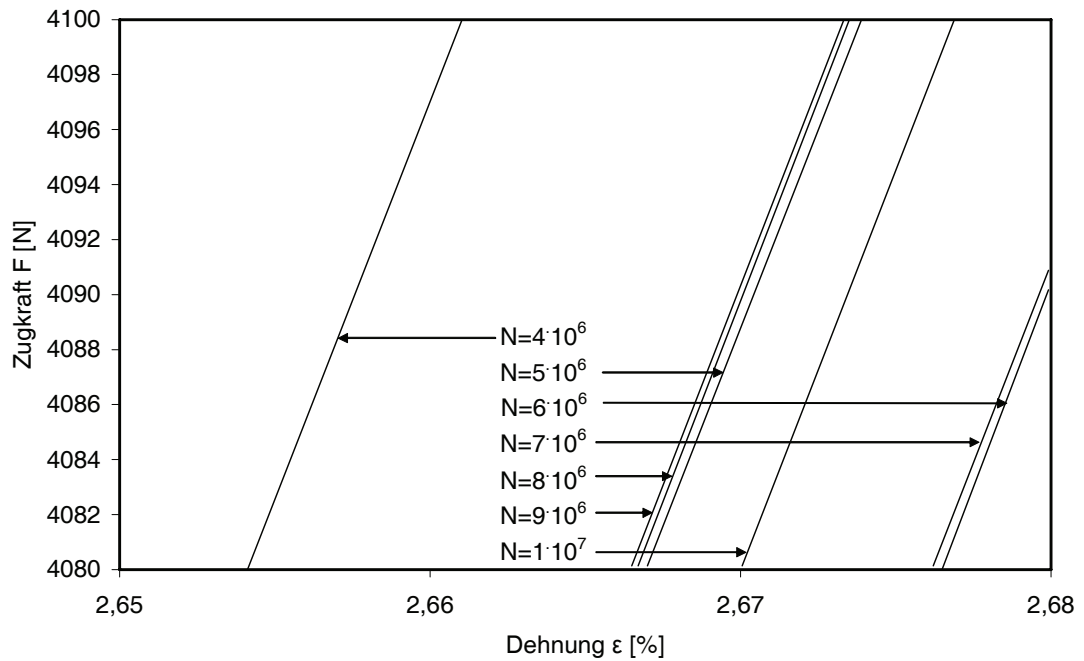
unter zyklischen Einwirkungen in einem Gleichgewichtszustand befindet, der jedoch in den durchgeführten Untersuchungen nicht eingetreten ist.

Das ist auch die Ursache dafür, dass die Zugkraft-Dehnungslinie für  $N = 10^4$  Lastwechsel zwischen der von  $N = 10^5$  und  $N = 10^7$  Lastwechseln liegt. Aus den Messungen ließe sich schlussfolgern, dass das Material bereits eine gewisse Steifigkeit hatte, dann aber mit zunehmender Anzahl der Lastwechsel zunächst flexibler wird um dann wieder steifer zu werden. Wie in 3.3.4.2 erläutert, sind die hier untersuchten PET-Materialien sehr stark vorgestreckt. Bei der Herstellung wird das Polymer im noch warmen Zustand aus dem Extruder kommend sofort verstreckt. Dadurch werden die Zugkrafteigenschaften in Längsrichtung der Elemente optimiert. Dieser neue Spannungszustand wird mit dem Abkühlen der Materialien eingefroren. Allerdings gibt es bei derart vorbehandelten Materialien einen Memory-Effekt. Dieser drückt sich in dem Bestreben aus, die ursprünglichen Spannungsverhältnisse innerhalb des Polymers wieder herzustellen. Erhöhte Temperaturen während des Versuches begünstigen diese Rückbildung, da sie zu einer erhöhten Mobilität der Moleküle führen. Gleiches ist auch für die Anwendung von zyklischen Einwirkungen vorstellbar. Durch die innere Reibung der Moleküle während der Beanspruchungen entsteht Wärme bzw. die Moleküle selbst werden durch die Anregung gegeneinander verschoben, so dass sich die Struktur des Materials verändert. Es schrumpft, um den ursprünglichen Spannungszustand wieder herzustellen. Das hat zur Folge, dass dann größere Dehnungen erforderlich sind, damit eine vergleichbare Zugkraftaufnahme erreicht werden kann. Dieses Verhalten wird durch das Ansteigen der Gesamtdehnungen für die Zugkraftdehnungslinie von  $N = 10^5$  Lastwechseln im Vergleich zu  $N = 10^4$  Lastwechseln deutlich. Nach den vorliegenden Messungen (vgl. Abbildung 50) ist dieser Prozess nach etwa  $N = 10^5$  Lastwechseln abgeschlossen. Dann ist die Veränderung des Zugkraft-Dehnungsverhalten erwartungsgemäß allein von Kriechvorgängen und Trainingseffekten bestimmt.



**Abbildung 51 Hystereseschleifen für GG1-PET**

Grundsätzlich wird dies durch die Hystereseschleifen in Abbildung 51 bestätigt. Der Abstand zwischen den Hystereseschleifen hin zu mehr Dehnung verringert sich mit zunehmender Anzahl der Lastwechsel  $N$ , bis sie bei etwa  $N = 5 \cdot 10^6$  bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes stagnieren. Noch deutlicher geht das aus Abbildung 52 hervor. Dort wurden die jeweiligen Sekanten der Hystereseschleifen aufgetragen, um deren Reihenfolge darzustellen. Durch die veränderte Skalierung wird sichtbar gemacht, um welche Größenordnungen es sich dabei handelt. Die ermittelten Dehnungsunterschiede sind so klein, dass sie innerhalb des Messfehlers der Versuchsanlage und der Wegaufnehmer schwanken. Wobei davon ausgegangen werden kann, dass die Ergebnisse nicht durch ein mögliches Driften der Kraftmessdose beeinflusst wurden, da die Umgebungstemperaturen relativ konstant und die Versuchsdauer zu kurz dafür waren.



**Abbildung 52 Detail Hysteresesekanten für GG1-PET**

#### 4.1.2.2 Zugkraft-Dehnungsverhalten von GG2-PET

Ursprünglich war geplant, die jeweiligen Produkte als Repräsentanten eines Polymers gemeinsam auszuwerten. Die Mechanismen sind zwar grundsätzlich vergleichbar, aber die Einflüsse aus der Materialherstellung, z.B. durch die thermische Behandlung während der Produktion, sind bei den untersuchten Geokunststoffen aus PET signifikant. Es soll deshalb an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass Verallgemeinerungen enge Grenzen gesetzt sind.

Für das untersuchte Material GG2-PET ist der ausgeprägte Trainingseffekt während der ersten Lastwechsel ebenso erkennbar wie bei GG1-PET. Allerdings ist der Effekt relativ gesehen bei GG2-PET etwas geringer, da die beiden Zugkraft-Dehnungslinien für  $N = 10^4$  und  $N = 10^5$  Lastwechsel in Abbildung 53 näher an der Referenzkurve liegen als jene für GG1-PET in Abbildung 50.

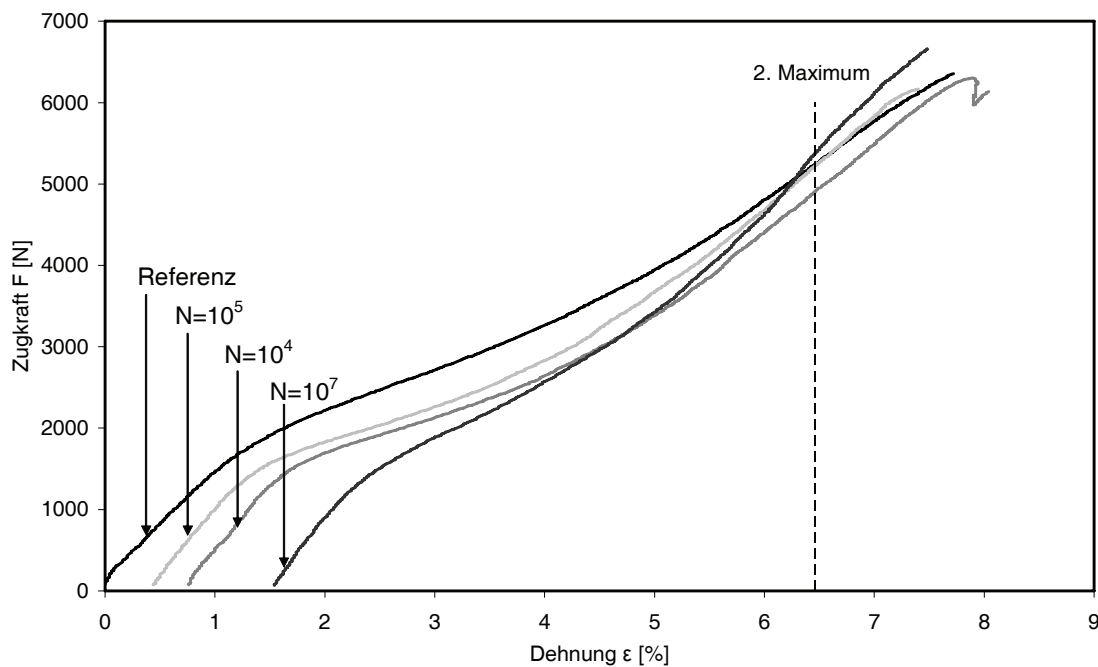
Die Zugkräfte am 2. Maximum für die verschiedenen Lastwechselzahlen  $N$  sind vergleichbar und haben einen Variationskoeffizienten in der Größenordnung wie die Höchstzugkräfte (Tabelle 13). Für den abweichenden Verlauf der Kurve für  $N = 10^4$  Lastwechsel in Abbildung 53 können Unregelmäßigkeiten im Versuchablauf die

Ursache sein. Das Gesamtbild bestätigt aber grundsätzlich das Modell über den Modulverlauf und die Bedeutung seiner charakteristischen Maxima.

**Tabelle 13 Messergebnisse für das Material GG2-PET**

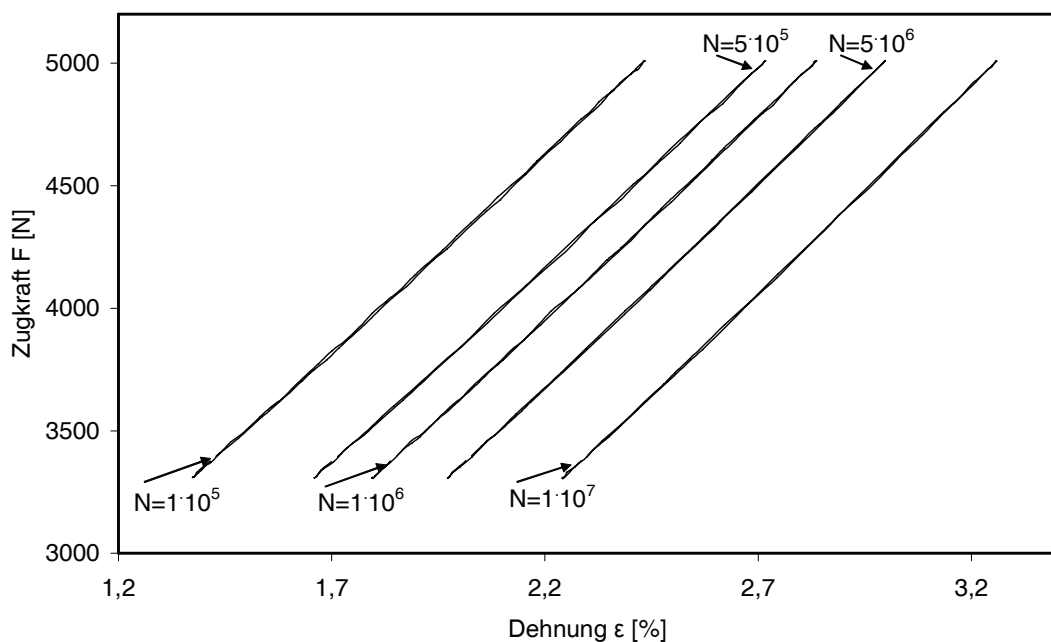
Lastwechsel N	2. Maximum			Bruch		
	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	F	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	F
[-]	[%]	[%]	[N]	[%]	[%]	[N]
1 (Referenz)	6,46	0,00	5236	7,72	0,00	6356
$10^4$	5,70	-0,76	4903	7,14	-0,58	6299
$10^5$	6,02	-0,44	5217	6,96	-0,76	6167
$10^7$	4,92	-1,54	5368	5,94	-1,78	6665
Mittelwert			5181	6371		
Standardabweichung			197	211		
Variationskoeffizient			3,80	3,31		

Für das Material GG2-PET lässt sich aus den in Tabelle 13 aufgelisteten Dehnungen  $\varepsilon$  nach den unterschiedlichen Anzahlen von Lastwechseln N und dem Verlauf der entsprechenden Zugkraft-Dehnungskurven in Abbildung 53 eine zunehmende Verfestigung bzw. Erhöhung der Steifigkeit ablesen.



**Abbildung 53 Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung von GG2-PET**

Das individuelle Verhalten der beiden Materialien aus PET drückt sich in den Dehnungen  $\varepsilon$  und deren Verlauf mit den zunehmenden Lastwechselzahlen  $N$  aus. Während sich beim Material GG1-PET die Hystereseschleifen bereits nach  $N = 10^5$  Lastwechseln beginnen zu überlagern (Abbildung 51), nehmen die Dehnungen der einzelnen Hystereseschleifen von GG2-PET bis  $N = 10^7$  Lastwechsel in Abbildung 54 kontinuierlich zu. Das lässt keine abschließende Schlussfolgerung zu, da sich die Dehnungen auf unterschiedlichen Niveaus bewegen. Die Überlagerung von Hystereseschleifen könnte ein Indiz für den beginnenden Bereich der Dauerfestigkeit sein. Sollte sich der Verlauf der Hystereseschleifen grundsätzlich mit der Dehnung verändern, könnte dies daran liegen, dass sich Trainingseffekte in Abhängigkeit vom Material nur bis zu einem gewissen Grad oder einer bestimmten Anzahl Lastwechseln bemerkbar machen. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass es Ungenauigkeiten bei der Ermittlung des Ausnutzungsgrades nach Gleichung 15 gab und deshalb kein direkter Vergleich möglich ist.



**Abbildung 54** Hystereseschleifen GG2-PET

#### 4.1.2.3 Zugkraft-Dehnungsverhalten von GG3-PP und GG4-PP

Da für PP Modellvorstellungen, wie sie in dieser Arbeit für PET verwendet wurden, nicht bekannt sind, soll anhand der Daten in diesem Abschnitt lediglich auf einige in den Versuchen ermittelte Besonderheiten hingewiesen werden, die für die untersuchten Geokunststoffe charakteristisch sind.

**Tabelle 14 Messergebnisse für GG3-PP**

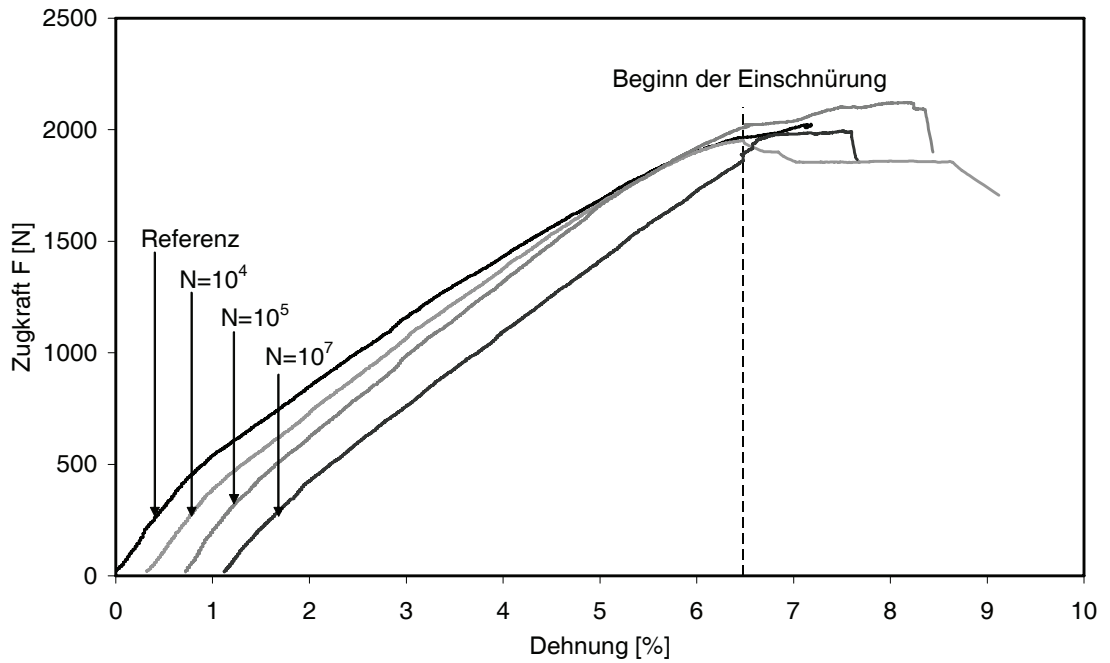
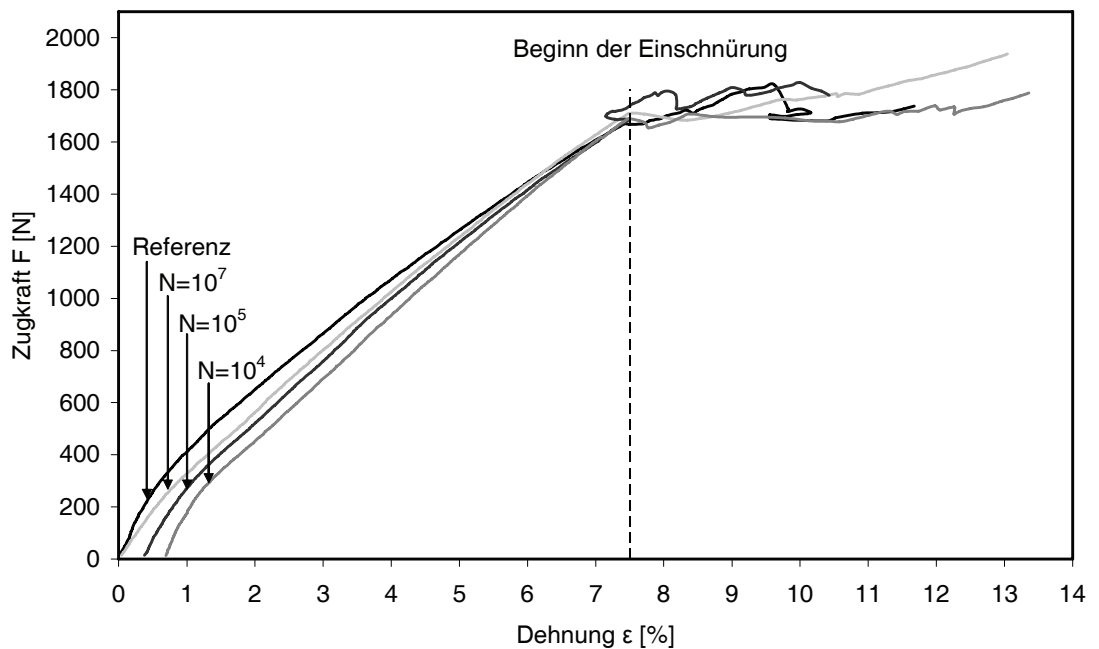
Lastwechsel	Beginn der Einschnürung			Bruch		
	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	F	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	F
[-]	[%]	[%]	[N]	[%]	[%]	[N]
1 (Referenz)	6,48	0,00	1966	7,18	0,00	2025
$10^4$	6,16	-0,32	1952	6,16	-1,02	1952
$10^5$	5,76	-0,72	2007	7,48	0,30	2123
$10^7$	5,36	-1,12	1889	6,4	-0,78	1994,6
Mittelwert			1954			2024
Standardabweichung			49			73
Variationskoeffizient			2,51			3,61

**Tabelle 15 Messergebnisse für GG4-PP**

Lastwechsel	Beginn der Einschnürung			Bruch		
	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	F	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	F
[-]	[%]	[%]	[N]	[%]	[%]	[N]
1 (Referenz)	7,50	0,00	1668	9,63	0,00	1819
$10^4$	6,80	-0,70	1690	12,67	3,04	1788
$10^5$	7,11	-0,39	1687	9,61	-0,02	1828
$10^7$	7,46	-0,04	1709	13,00	3,37	1938
Mittelwert			1689			1843
Standardabweichung			17			65
Variationskoeffizient			1,01			3,53

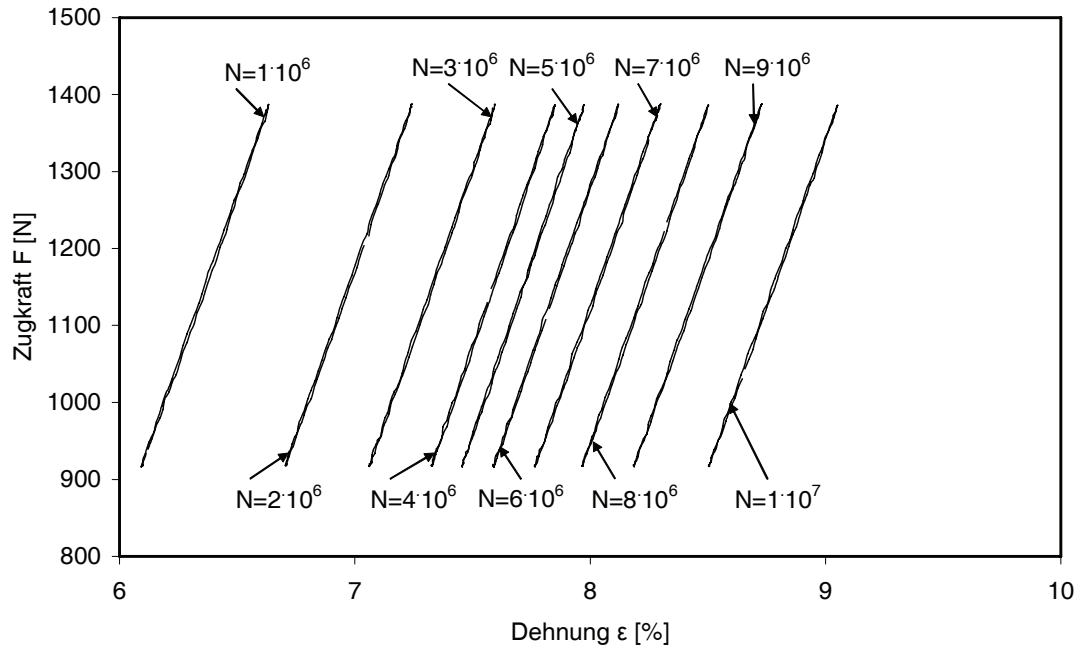
Wie in 3.3.4.3 erläutert ist es für Polypropylen typisch, dass sich vor dem Bruch eine Einschnürung des Materials mit einer Änderung des Verlaufs der Zugkraft-Dehnungskurve ankündigt. Der direkte Vergleich der Referenzzugfestigkeiten und der ermittelten Restzugfestigkeiten nach den zyklischen Versuchen führt zu keinen eindeutigen Hinweisen auf eine Abminderung der Zugfestigkeiten für die untersuchten Materialien GG3-PP und GG4-PP. Eine Gegenüberstellung der Variationskoeffizienten weist jedoch darauf hin, dass die beginnende Einschnürung in der Zugkraft-Dehnungskurve (Abbildung 55 und Abbildung 56) der beiden Materialien mit einer beginnenden Veränderung der Morphologie der Polymere einhergeht.



**Abbildung 55** Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung von GG3-PP**Abbildung 56** Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung von GG4-PP

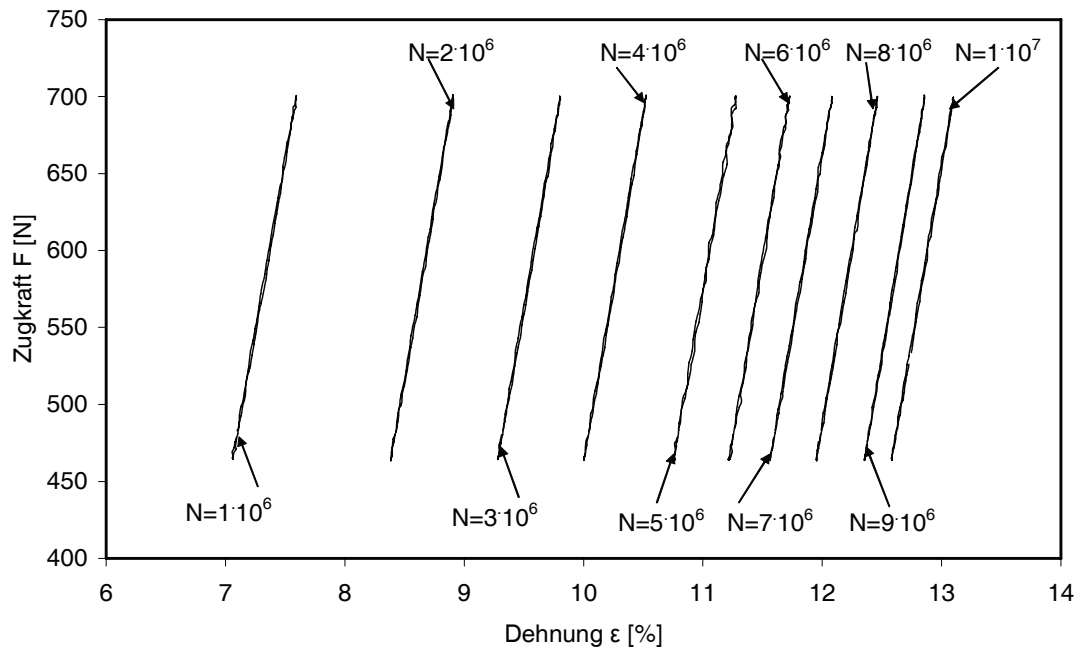
Mit den Einschnürungen des Materialquerschnittes verändern sich die Spannungsverhältnisse innerhalb der Strukturelemente der Geokunststoffe. Diese Veränderungen traten für beide PP-Materialien bei den Zugprüfungen sowohl bei den Referenzproben als auch bei den der zyklischen Beanspruchung ausgesetzten Proben gleichermaßen auf. Nach dieser Übergangsphase nahm zwar die Zugfestigkeit der Materialien noch weiter zu, doch war der Verlauf der Zugkraft-Dehnungslinie ab diesem Punkt nicht mehr vorhersehbar. Das wird besonders bei den zu den Höchstzugkräften gehörenden Dehnungen deutlich. Diese Dehnungen variieren stark und zeigen keine Tendenz auf, so dass auf dieser Basis keine Schlussfolgerungen gezogen werden können. Dafür ist der Verlauf der Hystereseschleifen in Abbildung 57 und Abbildung 58 besser geeignet. In diesen Abbildungen lässt sich aus dem Anstieg der Hystereseschleifen grundsätzlich eine leichte Erhöhung der Steifigkeit erkennen, die in 4.1.3.1 näher erläutert wird.

Die Zugkraft-Dehnungslinien in Abbildung 55 und Abbildung 56 wurden in Richtung der Abszissen auf den Beginn der erwähnten Übergangsbereiche verschoben. Ähnlich wie beim 2. Maximum der PET-Materialien zeigt sich hier eine sehr gute Übereinstimmung der absoluten Zugkräfte. Obwohl auch die einzelnen Elemente der hier untersuchten Geokunststoffe aus PP nach dem Extrudieren verstreckt wurden, wirkt sich das Schrumpfen nicht so stark aus wie bei GG1-PET und GG2-PET. Das liegt daran, dass der Kristallinitätsgrad von PP deutlich über dem von PET liegt (Tabelle 9). Der amorphe Anteil, der durch das zusätzliche Verstrecken optimiert werden kann, ist kleiner. Allein dieser Bereich kann schrumpfen, um in den Ursprungszustand nach dem Extrudieren zurückzukehren. Die Zugkräfte im Material, die durch das Schrumpfen auftreten, reichten aber nicht aus, das Zugkraft-Dehnungsverhalten derart zu beeinflussen, dass es mit den durchgeführten statischen und zyklischen Messungen nachweisbar gewesen wäre. Von daher nimmt die Dehnung  $\varepsilon$  mit zunehmender Anzahl der Lastwechsel  $N$  kontinuierlich ab. Da der Trainingseffekt bei den PP-Materialien wesentlich geringer ist als bei PET, dürfte die Dehnungsabnahme in den statischen Zugversuchen nach den zyklischen Prüfungen zu einem größeren Anteil auf die Kriechverformungen während des Versuches zurückzuführen sein. Eine Quantifizierung der einzelnen Anteile, also Kriechen und Training, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht eindeutig möglich.



**Abbildung 57 Hystereseschleifen für GG3-PP**

Aus den Hystereseschleifen für die beiden untersuchten PP-Materialien ist erkennbar, dass hier materialspezifische Unterschiede im lastwechselabhängigen Verhalten und insbesondere den dabei hervorgerufenen Dehnungen  $\epsilon$  existieren. Während sich für GG4-PP eine kontinuierliche Abnahme der Kriechdehnungen zwischen den jeweiligen Hystereseschleifen zeigt (Abbildung 58), ist dies bei GG3-PP nicht in gleichem Umfang erkennbar (Abbildung 57). Die Dehnungen  $\epsilon$  bewegen sich während der zyklischen Beanspruchung auf einem etwas niedrigeren Niveau. Die Ursache wird eher nicht als polymertypisch gesehen, da sich auch in Bereichen, in denen sich die Dehnungen  $\epsilon$  der beiden Materialien überlappen, kein gemeinsamer und charakteristischer Verlauf der Verformungen erkennen lässt.



**Abbildung 58 Hystereseschleifen für GG4-PP**

Sollte eine Überlagerung von Hystereseschleifen bei unterschiedlichen Lastwechselzahlen ein Hinweis für eine beginnende Dauerstandfestigkeit von Polymeren sein, dann wird dies für Kunststoffe aus PP erst bei wesentlich höheren Lastwechselzahlen als bei PET erwartet, da der Trainingseffekt durch die zyklische Beanspruchung wesentlich kleiner ist und sich dadurch das Kriechen, das linear bis nahe zum Bruch auftritt, stärker bemerkbar macht.

#### 4.1.2.4 Zugkraft-Dehnungsverhalten von GG5-PE

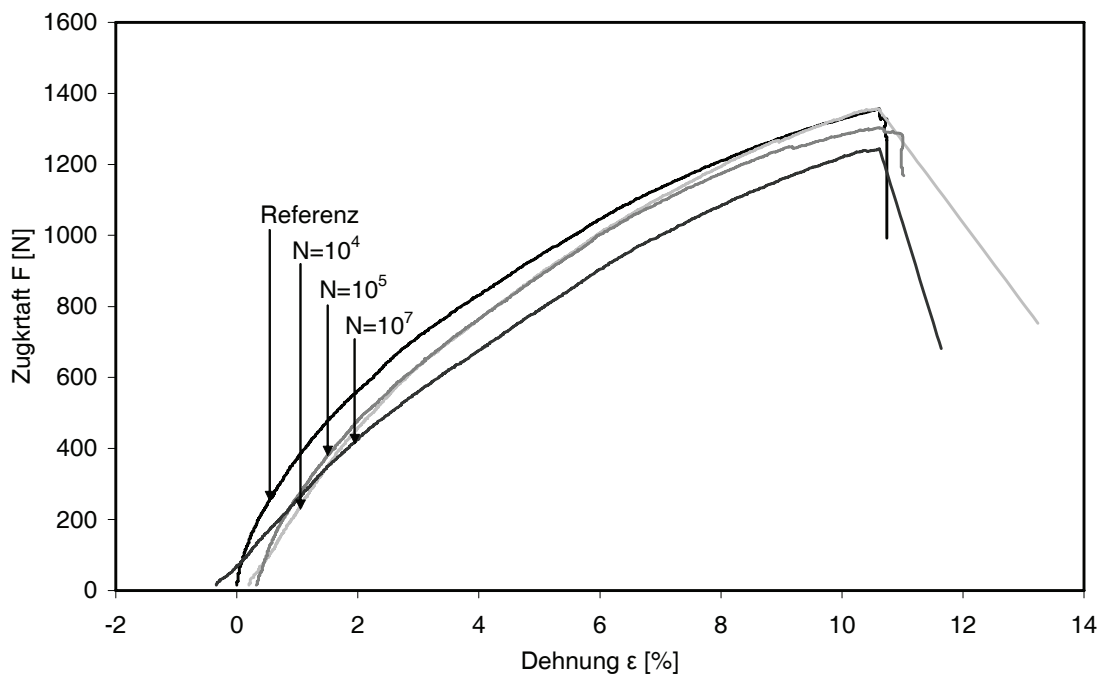
Der untersuchte Geokunststoff aus PEHD nimmt unter den hier geprüften 5 Materialien eine Sonderstellung ein. Er wird in einem anderen Herstellungsverfahren produziert und hat sowohl hochverstreckte Bereiche mit stark orientierter Struktur in den Stegen als auch weniger orientierte Übergangsbereiche in den Knoten.

Die Zugkraft-Dehnungslinien in Abbildung 59 haben einen kontinuierlichen Verlauf bis zum Erreichen der Höchstzugkraft der jeweiligen Proben. Die Form und damit der charakteristische Verlauf der Kurven vor und nach den dynamischen Versuchen bleiben erhalten. Als Basis für die Auswertung der Kurven in Abbildung 59 wurde in Tabelle 16 die Dehnung bei Höchstzugkraft der Referenzprobe verwendet.

**Tabelle 16 Messergebnisse für GG5-PE**

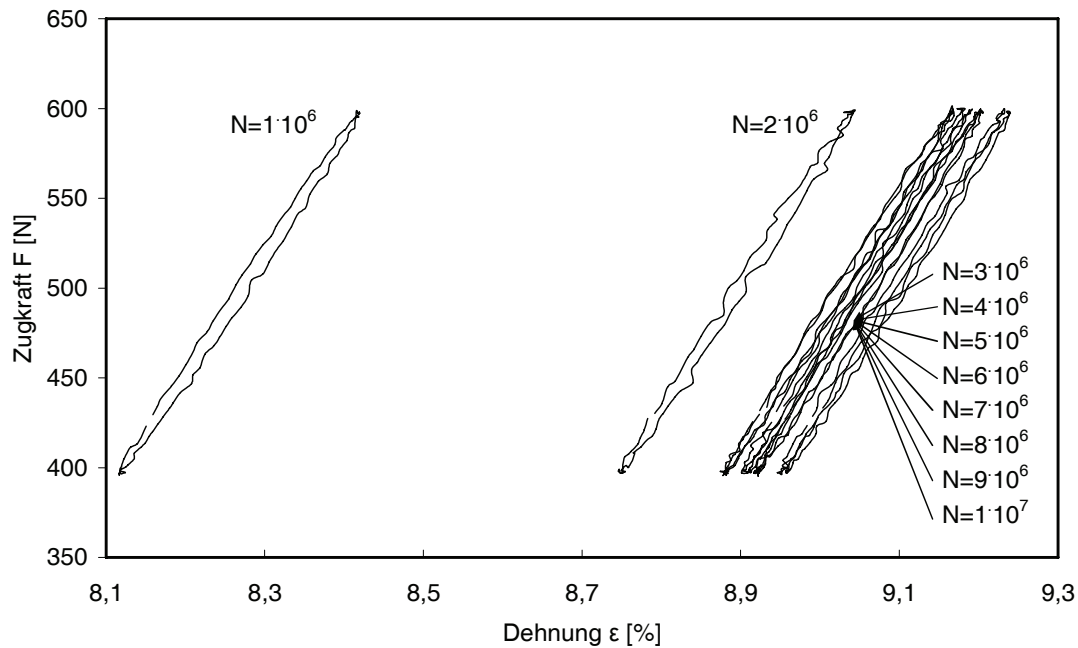
Lastwechsel N	Bruch		
	$\varepsilon$	$\Delta\varepsilon$	F
[-]	[%]	[%]	[N]
1 (Referenz)	10,62	0,00	1355
$10^4$	10,42	-0,20	1356
$10^5$	10,30	-0,32	1303
$10^7$	10,96	0,34	1243

Die Zahlenwerte der Messungen für die Restzugfestigkeiten nach den zyklischen Versuchen weisen auf eine leichte Abnahme der Restzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel N hin. Die Dehnungen bis zum Erreichen der Höchstzugkraft F bleiben etwa gleich, das deutet auf ein ausgeprägtes elastisches Verhalten des Materials GG5-PE im Vergleich zu den anderen untersuchten Geokunststoffen hin.

**Abbildung 59 Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung von GG5-PE**

Welche Rolle die kristallinen und die amorphen Bereiche dabei spielen, lässt sich aus den durchgeführten Versuchen nicht schlussfolgern. Auffällig waren jedoch

Veränderungen im Bruchmechanismus der Proben während der Zugversuche vor und nach der zyklischen Beanspruchung. Die Referenzproben haben regelmäßig direkt im Übergangsbereich zwischen Steg und Knoten versagt. Die Proben nach der zyklischen Beanspruchung hingegen brachen auch in der Mitte der Stege, also in dem Bereich, in dem die Moleküle vermutlich am stärksten orientiert waren.



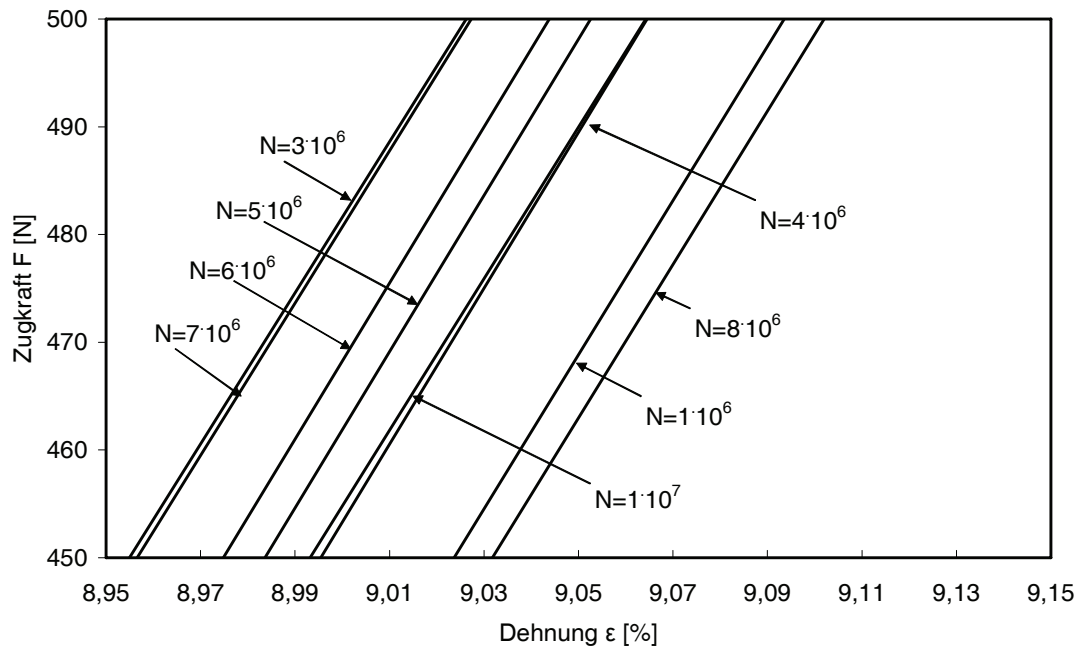
**Abbildung 60** Hystereseschleifen für GG5-PE

Für die GG5-PE-Proben haben sich die größten Ausbauchungen der Hystereseschleifen gezeigt. Der unruhige Verlauf der Schleifen deutet darauf hin, dass der Verlauf der sinusförmig aufgetragenen Kraft von der Regelung ständig korrigiert werden musste, da das Material unmittelbar auf die eingetragenen Beanspruchungen mit Relaxation oder einer Steifigkeitsänderung reagiert hat. Es waren aber außer einem moderaten Festigkeitsabfall und dem veränderten Bruchmechanismus keine signifikanten Veränderungen im Zugkraft-Dehnungsverhalten des Materials festzustellen.

Ab etwa  $N = 3 \cdot 10^6$  Lastwechseln liegen die Hystereseschleifen in Abbildung 60 sehr dicht zusammen. Das spricht dafür, dass sich ab diesem Punkt ein relatives Gleichgewicht zwischen der zyklischen Beanspruchung der Versuche und dem Zugkraft-Dehnungsverhalten des Materials GG5-PE eingestellt hat. Damit ist der

größte Teil des Festigkeitsabfalls bis zu einer Anzahl der Lastwechsel  $N = 3 \cdot 10^6$  vollzogen.

Wie Abbildung 61 zeigt, gibt es eine Tendenz, die dafür spricht, dass mit weiteren Lastwechseln zusätzliche Dehnungen erzeugt werden.



**Abbildung 61** Detail Hysteresesekanten für GG5-PE

Die Steifigkeitseigenschaften und das Verformungsverhalten von Referenz- und Versuchsmaterial bleiben nahezu gleich. Für den Fall numerischer Betrachtungen und die Entwicklung von Materialgesetzen zum Verhalten von Geokunststoffen im Boden sind deshalb für das Material GG5-PE weniger Randbedingungen in die Betrachtungen einzubeziehen, als bei den übrigen 4 untersuchten Geokunststoffen.

### **4.1.3 Veränderungen des Zugkraft-Dehnungsverhalten während der zyklischen Beanspruchungen**

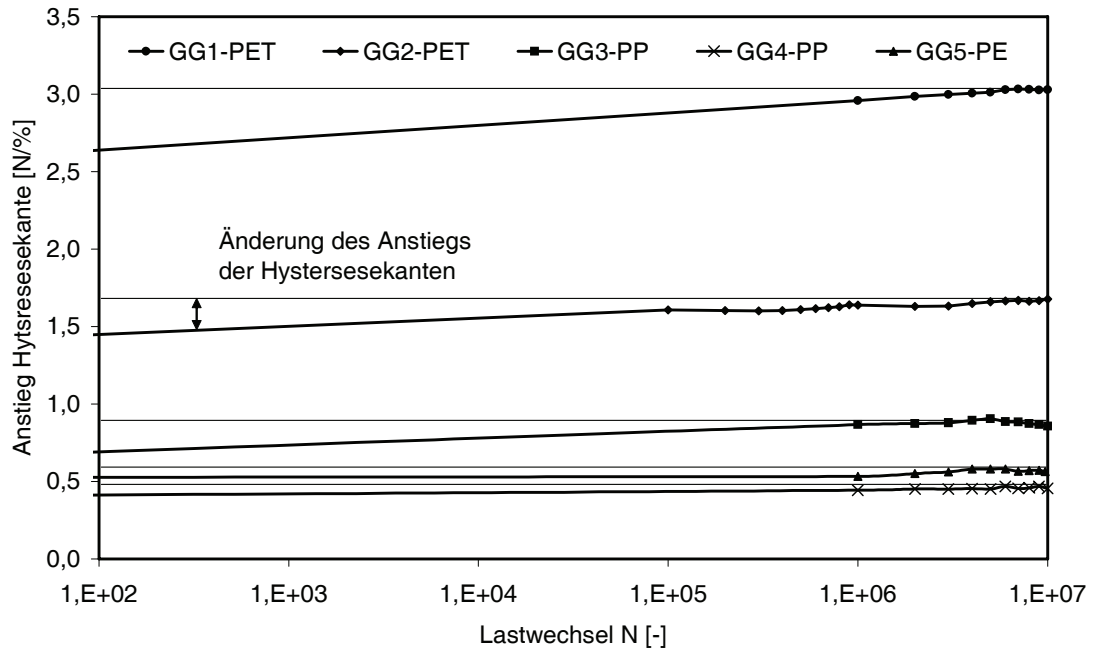
#### **4.1.3.1 Steifigkeitsentwicklung**

Die Hystereseschleifen entstehen durch das visko-elastische Verhalten der Rohstoffe, aus denen die Geokunststoffe hergestellt sind. Die einwirkenden Spannungsänderungen spiegeln sich mit einer zeitlichen Verzögerung in den Dehnungen der Materialien wider. Dieses Verhalten ist je nach Polymer unterschiedlich stark ausgeprägt und lässt Rückschlüsse auf energieelastische Verformungen zu. Somit lässt sich die durch die Versuchsanlage verrichtete Arbeit in einen „dämpfenden“ Anteil des Polymers durch innere Reibung und andere Phänomene aufteilen. [RIECHLE-00]

Bei den anderen Energieformen kann es sich z.B. um Wärmeenergie handeln. Der „dämpfende“ Anteil der jeweiligen Polymere lässt sich kaum direkt bestimmen. Je stärker die Materialdämpfung ist, desto steiler verlaufen die Hystereseschleifen. Um dafür ein Maß zu finden, wurden Sekanten mit Schnittpunkten der Hystereseschleifen im Maximum und Minimum der Kurven verwendet. Der Anstieg der Hysteresesekanten wurde dann als Anhaltspunkt für die Veränderung der Steilheit der Kurven herangezogen. Dabei blieb eine Veränderung der von den Hystereseschleifen eingeschlossenen Flächen unberücksichtigt. Deren Betrachtung wäre wegen der schlanken Kurven wenig aussagekräftig.

Der halblogarithmische Auftrag der Anstiege der Hysteresesekanten in Abhängigkeit von den absolvierten Lastwechseln in Abbildung 62 zeigt eine Zunahme der Steifigkeit bei allen getesteten Geokunststoffen. Es wird aber sehr gut sichtbar, wie unterschiedlich die Niveaus des dynamischen Steifigkeitszuwachses sind (Abbildung 63). Ein Vergleich der Hystereseschleifen der einzelnen Produkte zeigt Unterschiede. Eine steil ansteigende Hysteresesekante bedeutet geringere Dehnungen, als bei Materialien mit einem kleineren Anstieg. Deshalb weist ein steilerer Anstieg der Hysteresesekante auf ein steiferes Material hin.





**Abbildung 62** Tatsächlicher Anstieg der Hysteresekurven

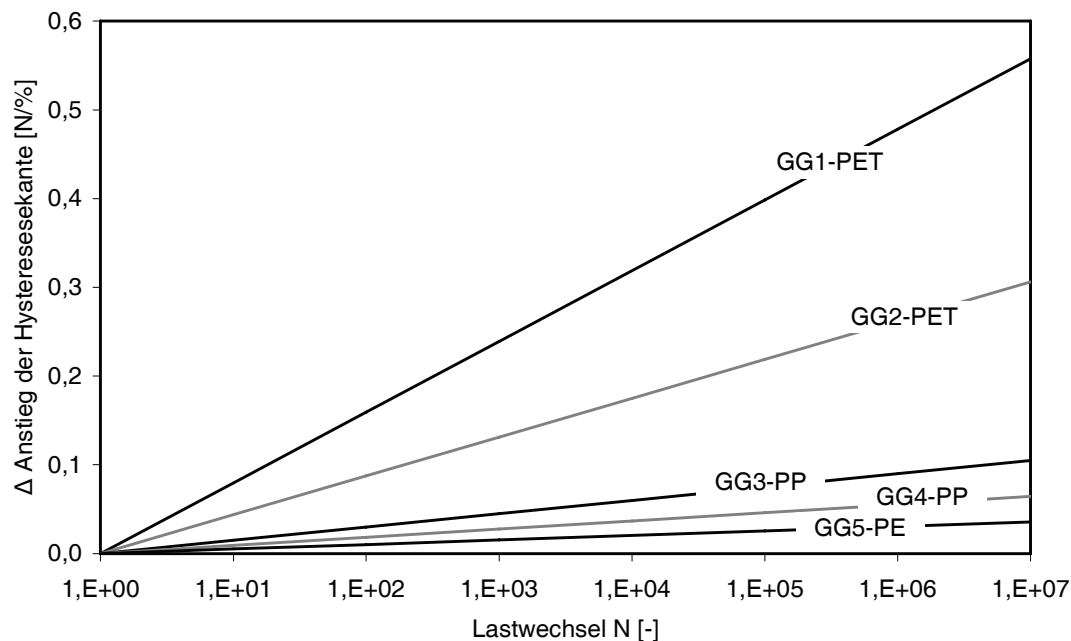
Da mit der Zunahme der Steifigkeit der Energieverlust abnimmt, verändert sich der Verlauf der Hystereseschleifen. Die Steifigkeit wird durch den so genannten Trainingseffekt erhöht. Einen ersten Eindruck bei welchen Rohstoffen mit einer Veränderung des Zugkraft-Dehnungsverhaltens unter zyklischer Beanspruchung zu rechnen ist, zeigt Abbildung 63. Trainingseffekte sind bei den PET-Materialien am stärksten ausgeprägt gewesen.

#### 4.1.3.2 Trainingseffekte

Von Trainingseffekten wird in diesem Zusammenhang gesprochen wenn sich durch äußere Einwirkungen das Zugkraft-Dehnungsverhalten hin zu höhere Zugkräften bei geringeren Dehnungen ändert. Bei der Betrachtung der Trainingseffekte sind verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen. Zum einen sind es wie in Abbildung 63 die unterschiedlichen Polymere und zum anderen die Situation, ob das Material gerade zyklisch beansprucht wird oder ob es sich in einer Ruhephase nach einer zyklischen Einwirkung befindet.

Auffällig für die hier untersuchten Materialien ist, dass die Polymere bei denen die Versuchstemperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur  $T_g$  lag (Tabelle 9) die

geringsten Trainingseffekte aufwiesen. Das waren GG3 bis GG5, also die Polyolefine. Auch innerhalb dieser Gruppe ergibt sich dafür ein schlüssiges Bild. GG5-PE hat die niedrigste Glasübergangstemperatur  $T_g$  und weist auch den kleinsten Trainingseffekt auf. Wie in 2.5.3.2 beschrieben, befinden sich *teilkristalline* Polymere bei Temperaturen oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur in einem kautschukelastischen Zustand. Dieser sorgt für eine höhere Flexibilität der Elemente. Durch die kooperative Beweglichkeit der Moleküle gab es weniger gegenseitige Verschiebungswege und deshalb auch weniger Veränderungen in der Morphologie der Polymere. Basis eines solchen Vergleichs sind die Verformungen und in diesem Fall die Dehnungen der Geokunststoffe.



**Abbildung 63** Relative Änderung des Anstiegs der Hysteresekanten

Im umgekehrten Fall war der Trainingseffekt bei den PET-Materialien wesentlich stärker ausgeprägt. Sie hatten Glasübergangstemperaturen  $T_g$  die oberhalb der Versuchstemperaturen lagen. Deshalb war die Bewegungsfreiheit der Molekülketten sehr eingeschränkt. Als Grenze der möglichen Bewegungsfreiheit der Molekülketten kann für PET das 1. Maximum des in 2.3.1 erörterten und in Abbildung 10 dargestellten Modells angesehen werden. Da dieses 1. Maximum bei den hier untersuchten Geokunststoffen aber bereits bei der Herstellung der Geokunststoffe

überdehnt wurde, wirkten sich die zyklischen Beanspruchungen unmittelbar auf die innere Struktur des PET's aus. Dies schlug sich in einer Zunahme der Steifigkeit der Materialien GG1-PET und GG2-PET nieder.

Der Trainingseffekt ist kein stabiler Zustand, der sich einstellt und dann bestehen bleibt. Die zyklischen Beanspruchungen erzeugen im Polymer einen Spannungszustand, der mit der Zeit wieder abgebaut wird. Dieser Vorgang ist vergleichbar mit der Relaxation nach einer Dauerbeanspruchung. Die in Tabelle 17 beispielhaft zusammengefassten Messwerte des Materials GG2-PET belegen, dass der Trainingseffekt unter laufend anhaltenden zeitlich veränderlichen Einwirkungen am größten ist. Nach einer Ruhephase von mindestens 24 Stunden hat sich das Material wieder etwas entspannt. Für einen Vergleich wurden dazu die Dehnungen  $\varepsilon_{\text{dyn}}$  der Hystereseschleifen bei Unter-, Mittel- und Oberspannung herangezogen. Nach frühestens 24 Stunden wurde dann ein weiterer Zyklus in einem Zugversuch gefahren und die Dehnung  $\varepsilon_i$  bei den charakteristischen dynamischen Spannungen aufgezeichnet.

**Tabelle 17 Vergleich der Dehnungen aus den statischen Zugversuchen mit denen der Hystereseschleifen für GG2-PET**

	Niveau Unterspannung		Niveau Mittelspannung		Niveau Oberspannung	
	Zug- versuche	Hysterese	Zug- versuche	Hysterese	Zug- versuche	Hysterese
$F_i$ in [N]	3309	3390	4158	4158	5008	5008
$\varepsilon$ nach $N = 10^9$ [%]	4,24	1,37	5,06	1,90	5,84	2,43
$\varepsilon$ nach $N = 10^7$ [%]	3,42	2,24	4,08	2,74	4,7	3,26
$\Delta\varepsilon$ [%]	0,82	0,87	0,98	0,84	1,14	0,83
$\Delta\varepsilon^*$ [%]		+ 6		- 17		- 37

Mit zunehmendem Lastniveau nimmt der Trainingseffekt zu. Das weist bereits darauf hin, dass der Trainingseffekt einen reversiblen Anteil hat. Die Größenordnung entspricht in etwa dem Verhältnis der Zugkräfte, wenn sie sich innerhalb eines nahezu linearen Bereiches auf der Zugkraft-Dehnungskurve des jeweiligen PET-Materials befinden. Die in Tabelle 17 angegebenen Zahlenwerte sind nicht als absolut anzusehen, da es Unterschiede in der Prüfgeschwindigkeit zwischen den zyklischen Versuchen und dem Zugversuch danach gab.

#### 4.1.3.3 Einfluss der Lastwechsel auf die Steifigkeitsentwicklung

Die folgenden Abbildungen zeigen, dass sich die Steifigkeit der Geokunststoffe nicht linear entwickelt. Bei den Materialien aus PET lässt sich die Veränderung im Zugkraft-Dehnungsverhalten in Form der Steifigkeitsänderung relativ gut mit einer logarithmischen Funktion beschreiben. Die Steifigkeitszunahme wird auch hier über den Anstieg der Hysteresesekante definiert. Das trifft für beide in Abbildung 64 dargestellten Geokunststoffe GG1-PET und GG2-PET zu. Ab einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln  $N$  weichen die ermittelten Anstiege der Hysteresesekanten periodisch von der Regressionskurve ab. Für die Betrachtungen bis  $N = 10^7$  ist der Trend eindeutig entlang dieser Funktion.

Dass der Trainingseffekt der zyklischen Beanspruchungen bei PET einem logarithmischen Zusammenhang folgt, macht dieses Phänomen bei isolierter Betrachtung prognostizierbar.

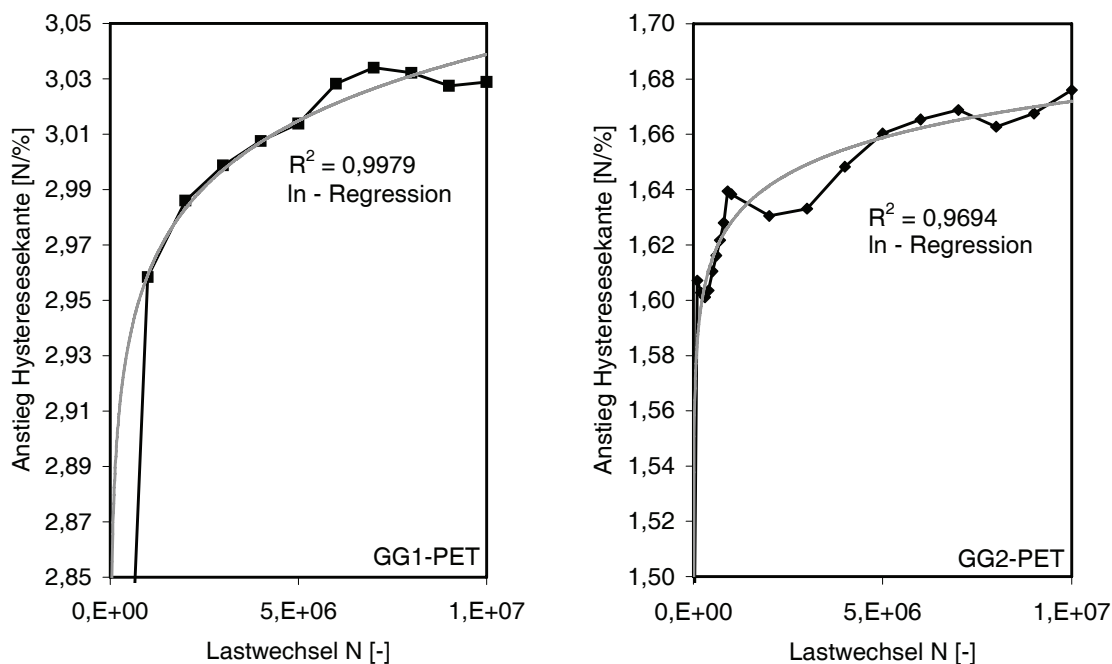
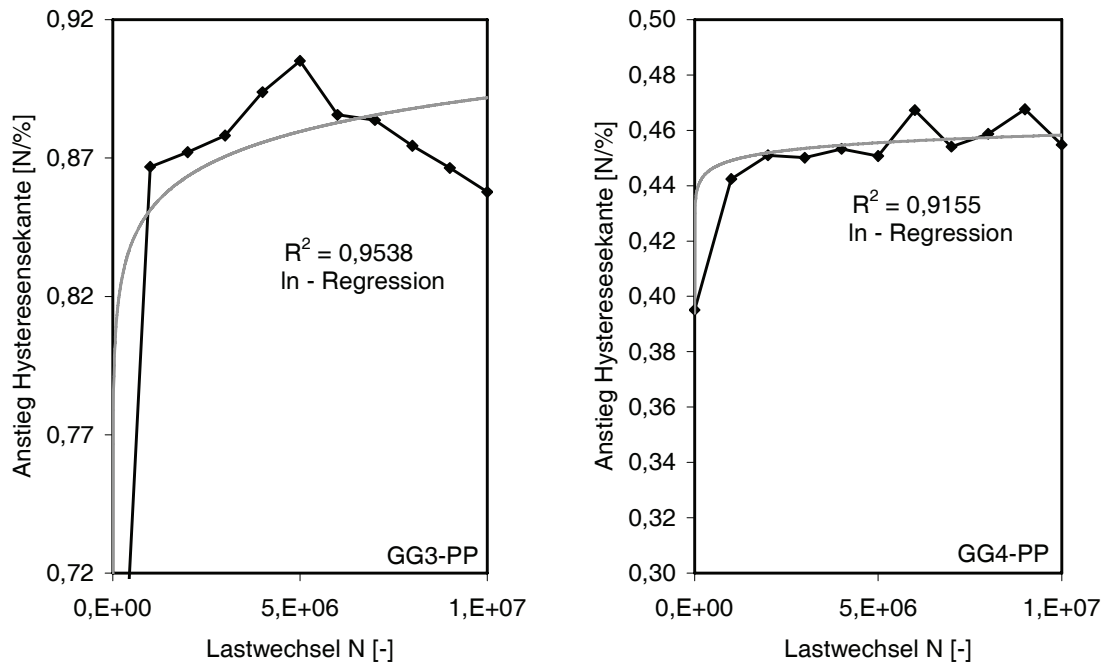


Abbildung 64 Anstieg der Hysteresesekanten für PET

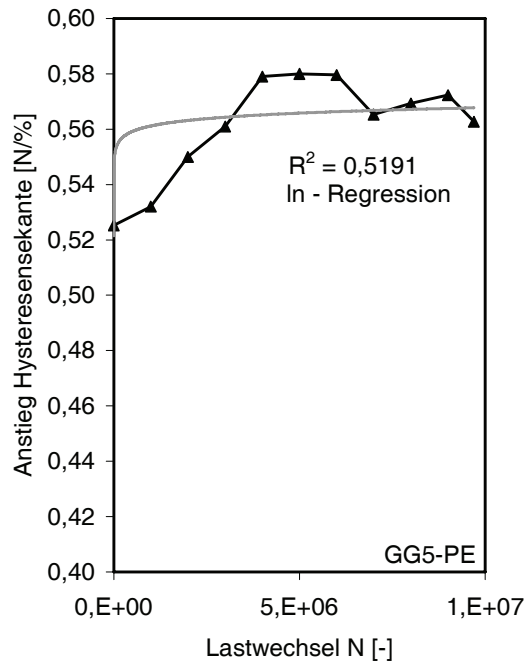
Bei der detaillierten Untersuchung der Anstiege der Hysteresesekanten von GG3-PP und GG4-PP stellt sich bereits innerhalb des Versuchszeitraumes ein stabiles Niveau hinsichtlich der Steifigkeit ein. Je nach Material geschieht dies zwischen  $N = 10^4$  bzw.  $N = 10^6$  Lastwechseln (Abbildung 65). Ab diesem Punkt würde auch eine lineare

Betrachtung der dynamischen Steifigkeit zu ausreichend genauen Ergebnissen führen.



**Abbildung 65 Anstieg der Hysteresesekanten für PP**

Wie bereits der Regressionskoeffizient in Abbildung 66 zeigt, kann für das Material GG5-PE keine Idealisierung auf logarithmischer Basis gefunden werden. Auch andere Annäherungen führten zu keiner besseren Genauigkeit. Das kann zu einem Großteil daran liegen, dass das Material herstellungsbedingt sowohl ausgeprägt kristalline als auch *amorphe Bereiche* enthält, die sich zudem in unterschiedlichen Gebieten des Geokunststoffes konzentrieren. Somit liegt die Vermutung nahe, dass es mit zunehmenden zeitlich veränderlichen Einwirkungen zu unterschiedlichen Reaktionen in den verschiedenen Bereichen des Materials GG5-PE kommt, die sich teilweise überlagern oder die abwechselnd dominieren. Das besondere an diesem Material ist, dass sich der Anstieg der Hysteresesekanten allmählich entwickelt und sich nicht unmittelbar nach wenigen Lastwechseln sprunghaft erhöht.



**Abbildung 66 Anstieg der Hysteresekanten für PE**

Die hier durchgeführten Versuche geben nur einen kleinen Ausschnitt des Materialverhaltens unter zyklischer Beanspruchung wider. Da die Geokunststoffe in der Regel nicht dauerhaft auf so einem hohen Niveau beansprucht werden, spielen diese detaillierten Betrachtungen für die Praxis nur eine untergeordnete Rolle. Die Versuchsergebnisse liefern jedoch wichtige Informationen für die Entwicklung von Algorithmen für die Modellierung des Verbundverhaltens von Geokunststoffen und Boden unter zyklischen Beanspruchungen.

#### 4.1.4 Untersuchungen zum Temperatureinfluss auf die Versuche

##### 4.1.4.1 Vorbemerkungen

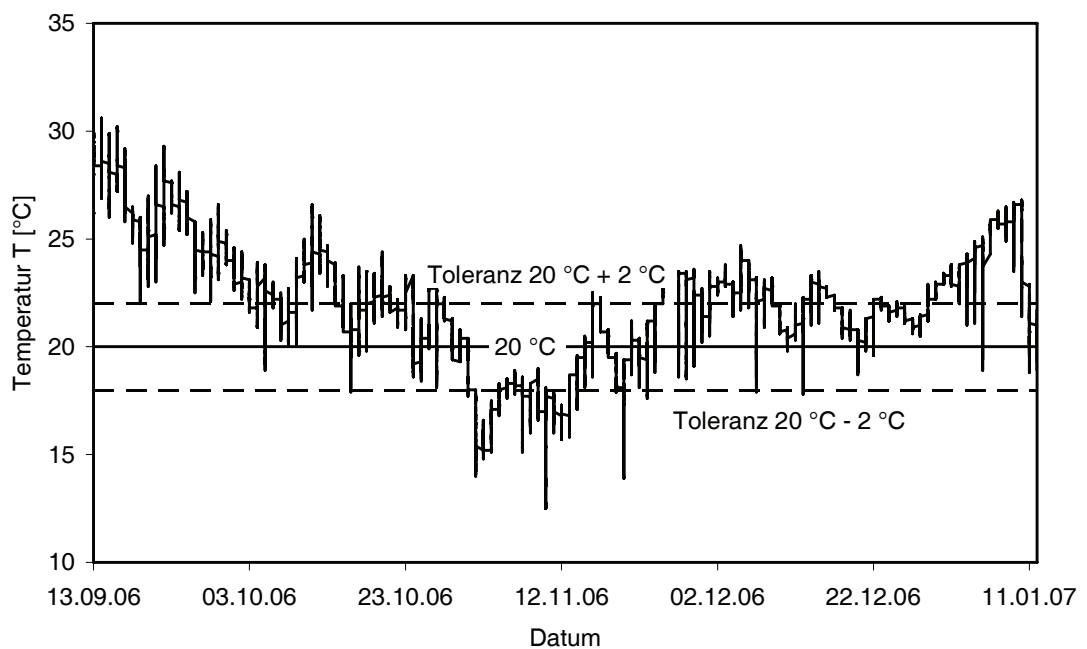
Aus den Vorüberlegungen zu den Versuchen leitete sich die Notwendigkeit ab, die Temperatur während der Versuche eingehend zu beobachten. Neben den Erfahrungen bei anderen Untersuchungen und den Besonderheiten des temperaturabhängigen Verhaltens von Thermoplasten spielte dabei die Tatsache, dass für den Versuchsaufbau kein Normklima nach [ISO 554], wie es z.B. bei Zugversuchen am breiten Streifen nach [DIN EN ISO 10319] der Fall ist, gewährleistet werden konnte, die entscheidende Rolle. Für Zugversuche nach [DIN

EN ISO 10319] ist die Kombination aus einer Temperatur von  $T = 20 \text{ °C} (\pm 2 \text{ °C})$  und einer Luftfeuchtigkeit von  $\Phi = 65 \% (\pm 5 \%)$  üblich.

Gemessen wurden die Parameter Temperatur  $T$  und relative Luftfeuchtigkeit  $\Phi$  für das Raumklima, die Lufttemperatur im Bereich der Prüfraumen in der unmittelbaren Umgebung zu den Geokunststoffproben sowie die Temperatur der beanspruchten Probe und einer nicht beanspruchten Referenzprobe.

#### 4.1.4.2 Raumklima

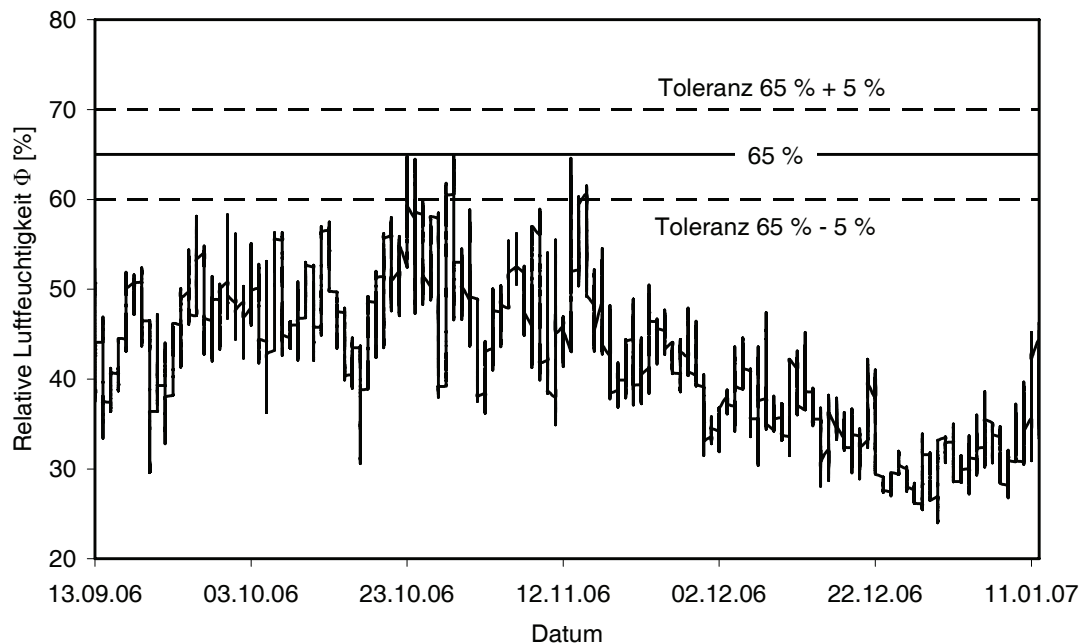
Die aufgezeichneten Messwerte für das Raumklima zeigen deutlich die jahreszeitlichen Schwankungen einer beheizten aber nicht kühlbaren Versuchshalle. Die eigentlichen Versuche wurden deshalb auch in den Herbst gelegt um den hohen Temperaturen des Sommers auszuweichen.



**Abbildung 67 Temperatur T im Bereich der Versuchseinrichtungen (Raumklima)**

Abbildung 67 und Abbildung 68 stellen jeweils die tatsächlichen Temperaturen und die korrespondierende relative Luftfeuchtigkeit  $\Phi$  dar. Die dokumentierten Werte des Raumklimas und die Messungen im unmittelbaren Bereich des Prüfraumens zeigen deutlich, dass die Temperaturen des Raumklimas im Untersuchungszeitraum so

niedrig waren, dass sie eine untergeordnete Rolle spielten, da durch die Hydraulik der Anlage, insbesondere die Schläuche und die Hydraulikzylinder, Wärme in die direkte Umgebung der Messproben abgegeben wurde, die zu höheren Temperaturen als dem Raumklima führten. Von daher liegt die Temperatur, die in den folgenden Diagrammen Umgebung genannt wurde, in der Regel über den Messwerten der zum Raumklima gehörenden Temperatur.

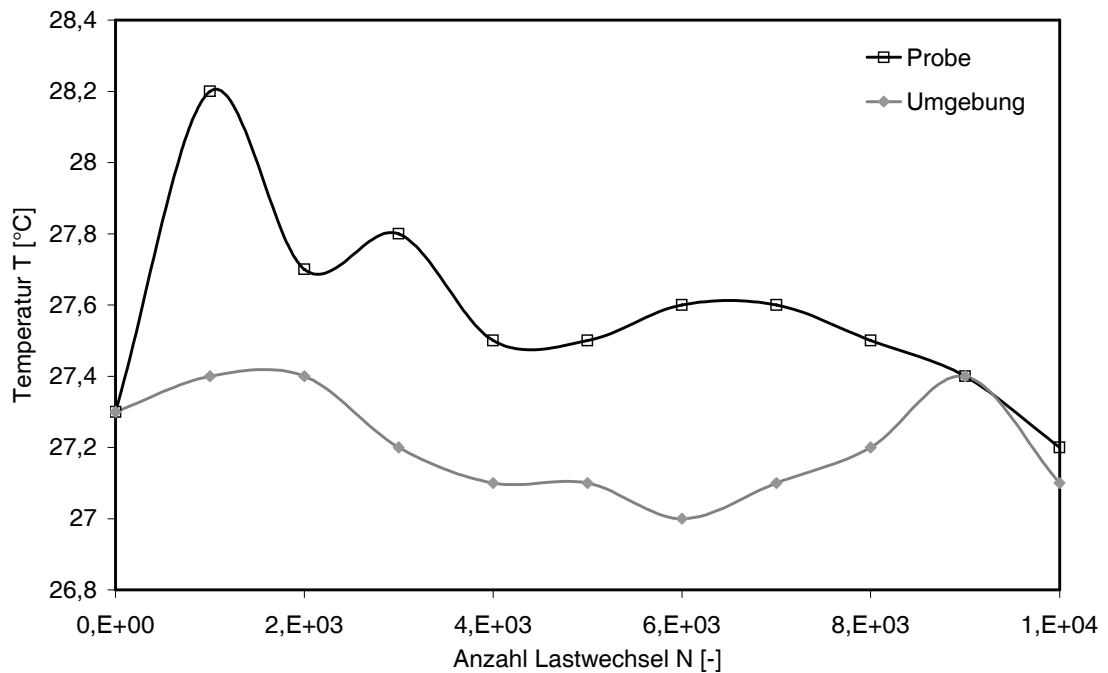


**Abbildung 68** Relative Feuchte  $\Phi$  der Luft im Bereich der Versuchseinrichtung (Raumklima)

#### 4.1.4.3 Proben temperatur

Bei den Temperaturmessungen der beanspruchten Proben ist aufgefallen, dass in Abhängigkeit vom Polymer zwischen  $N = 1 \cdot 10^3$  und  $N = 5 \cdot 10^3$  Lastwechseln ein Temperaturpeak erreicht wurde. So haben sich alle zyklisch beanspruchten Geokunststoffe unmittelbar nach dem Beginn des Versuches zügig erwärmt (Abbildung 69) um sich dann auf einem höheren Niveau parallel zur Umgebungstemperatur, die unmittelbar in den Rahmenbereichen über den Hydraulikzylindern gemessen wurde, zu entwickeln. Selbst die als kritisch angesehenen Proben aus PP und PEHD zeigten außer den in Abbildung 69 bis Abbildung 71 dargestellten Schwankungen keine kritische Erwärmung.





**Abbildung 69** Entwicklung der Proben­temperatur am Beispiel von GG5-PE

Um die Temperaturerhöhung aus den zyklischen Beanspruchungen isolieren zu können, wurde neben die unter Last stehende Probe eine unbeanspruchte Probe für Referenzmessungen gehängt.

Die einzelnen Temperaturdiagramme der verschiedenen Materialien zeigen jeweils einen parallelen Verlauf aller Kurven. Danach wurden sowohl die Referenzprobe als auch das im Rahmen beanspruchte Material durch die Wärmeabstrahlung des Zylinders und die Schwankungen des Raumklimas beeinflusst.

Da die Temperaturen mit allen Einwirkungen aber oberhalb des Normklimas liegen und das die Zugkraft-Dehnungseigenschaften von Thermoplasten negativ beeinflusst, decken die Versuche den niedrigeren Bereich des Normklimas mit ab.

Ein Vergleich der optisch gemessenen Temperaturen der beanspruchten Proben und der Referenzproben weist ein  $\Delta T$  von maximal 2 K aus. Das ist eine äußerst geringe Temperaturerhöhung. Hinzu kommt, dass es Schwankungen bei der optischen Temperaturmessung gegeben haben kann. Die Fehlertoleranz von elektronischen Temperatursensoren beträgt zudem etwa 0,2 K.

Letztendlich konnte auf zusätzliche Maßnahmen zur Probenkühlung verzichtet werden.

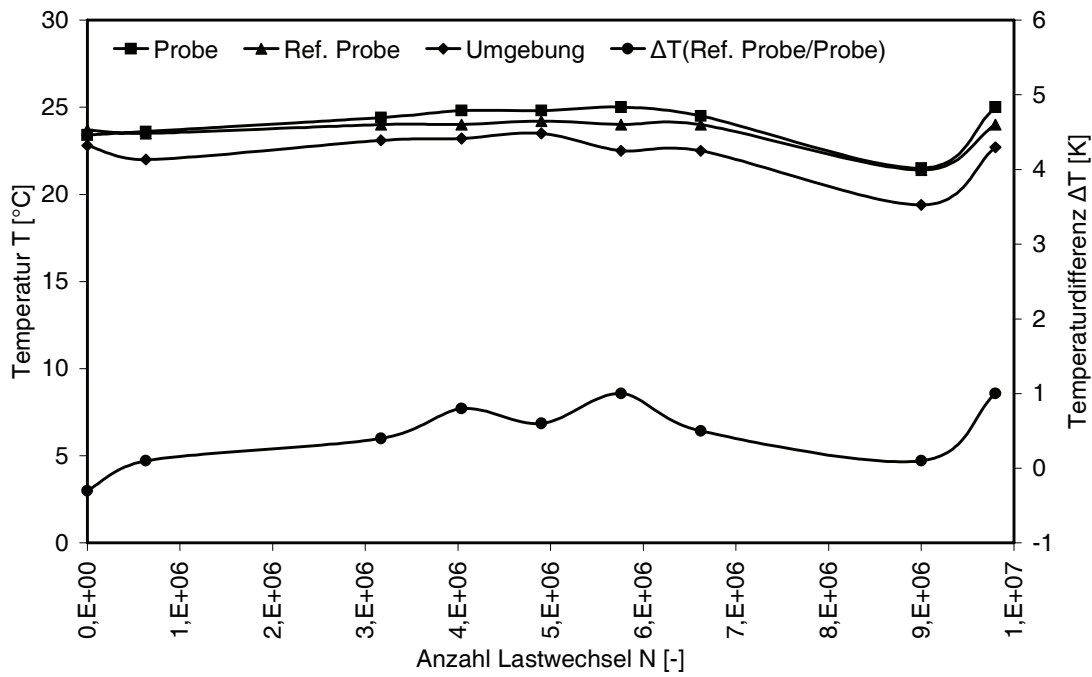


Abbildung 70 Temperaturverlauf am Beispiel von GG4-PP

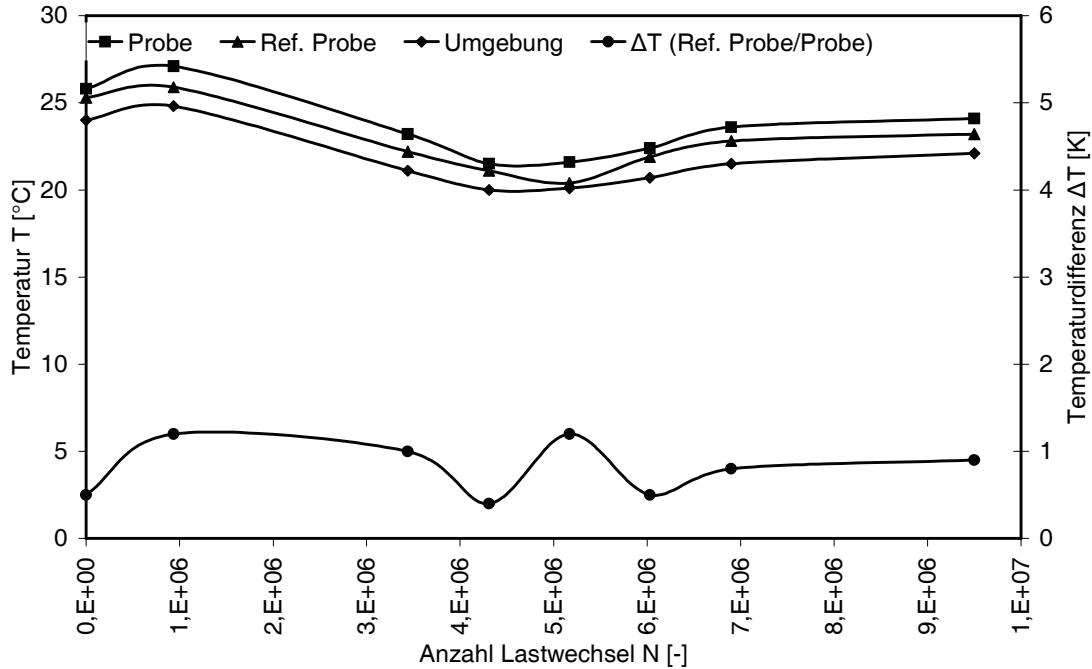


Abbildung 71 Temperaturverlauf am Beispiel von GG5-PE

#### 4.1.4.4 Temperaturverteilung an der Probenoberfläche

Mit den vorgenommenen Infrarotaufnahmen war es möglich, die Temperaturverteilung an der Oberfläche der verschiedenen Materialproben zu messen. Für die Messungen wurden gesonderte Kurzzeitversuche durchgeführt. Alle Proben wurden mit dem gleichen Lastbild beaufschlagt wie im Versuchsprogramm beschrieben. Die in Abbildung 72 bis Abbildung 74 dargestellten Aufnahmen wurden nach jeweils 5000 Lastwechseln gemacht. Die Temperaturverläufe in den Diagrammen folgen von links (A) nach rechts (B) gelesen den in den Aufnahmen eingezeichneten schwarzen Linien von unten (A) nach oben (B).

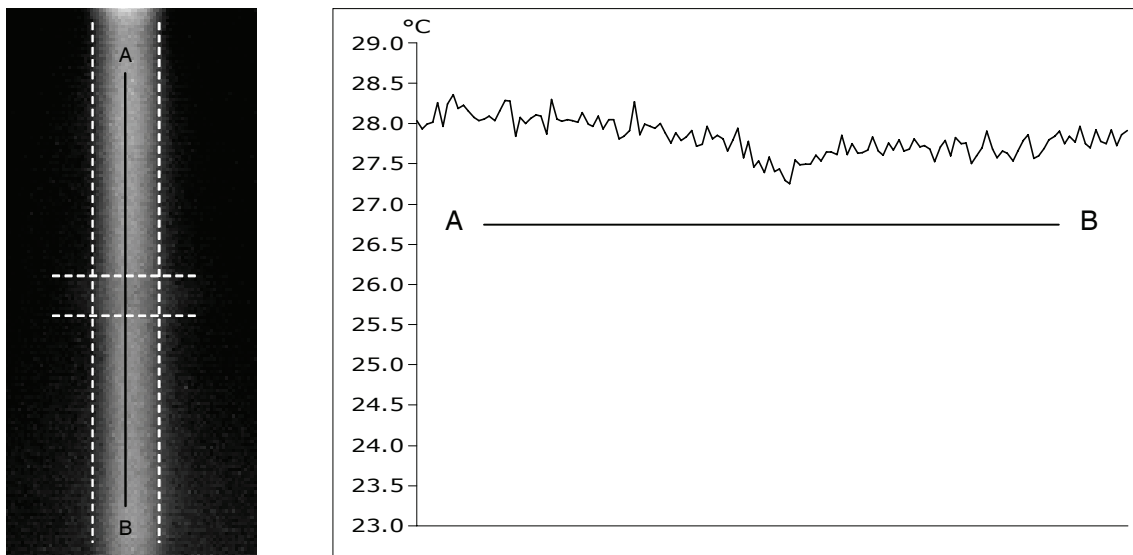
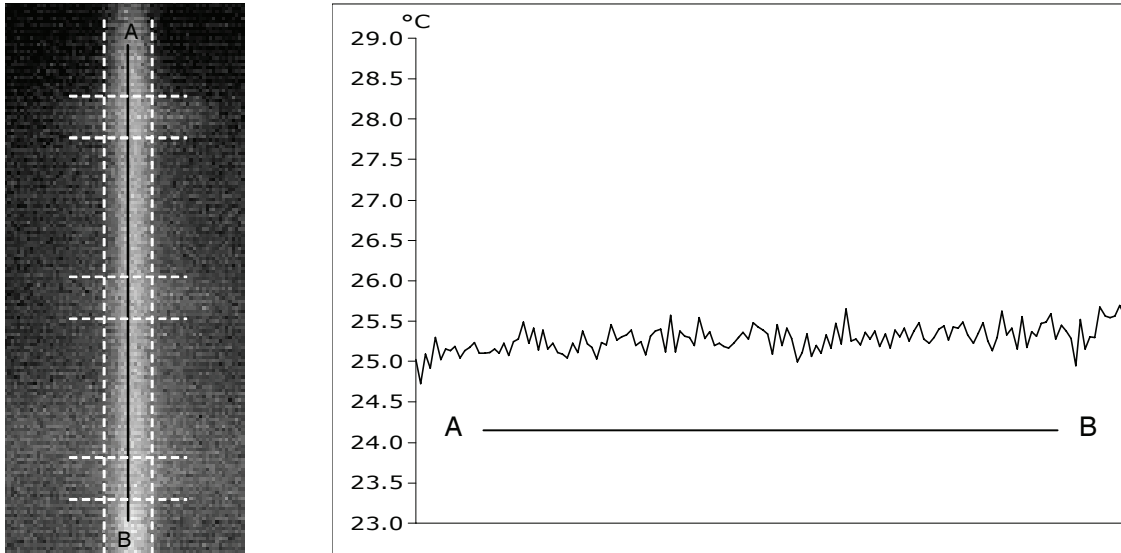
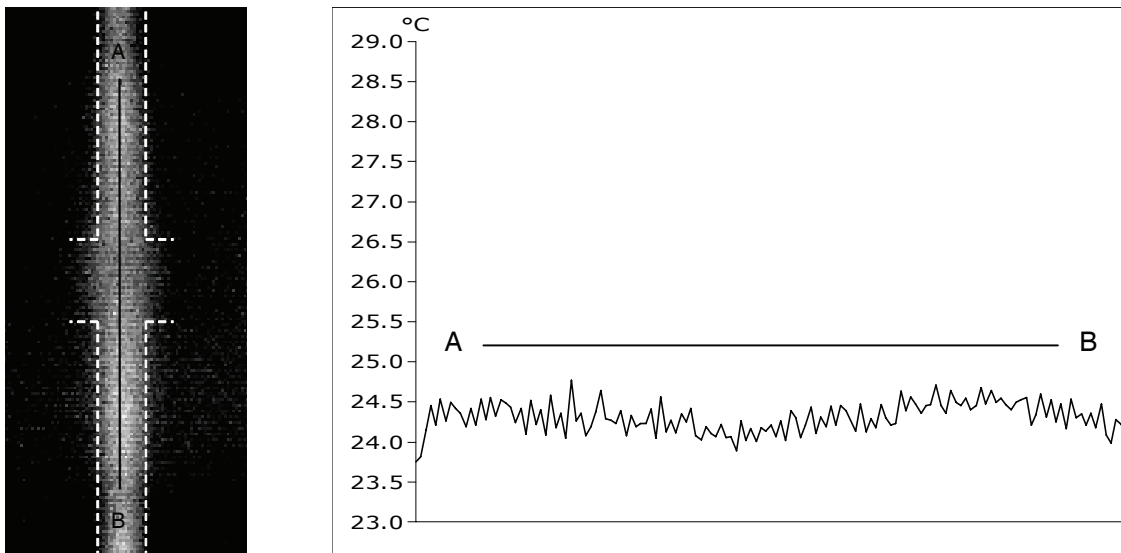


Abbildung 72 Temperaturverteilung GG2-PET

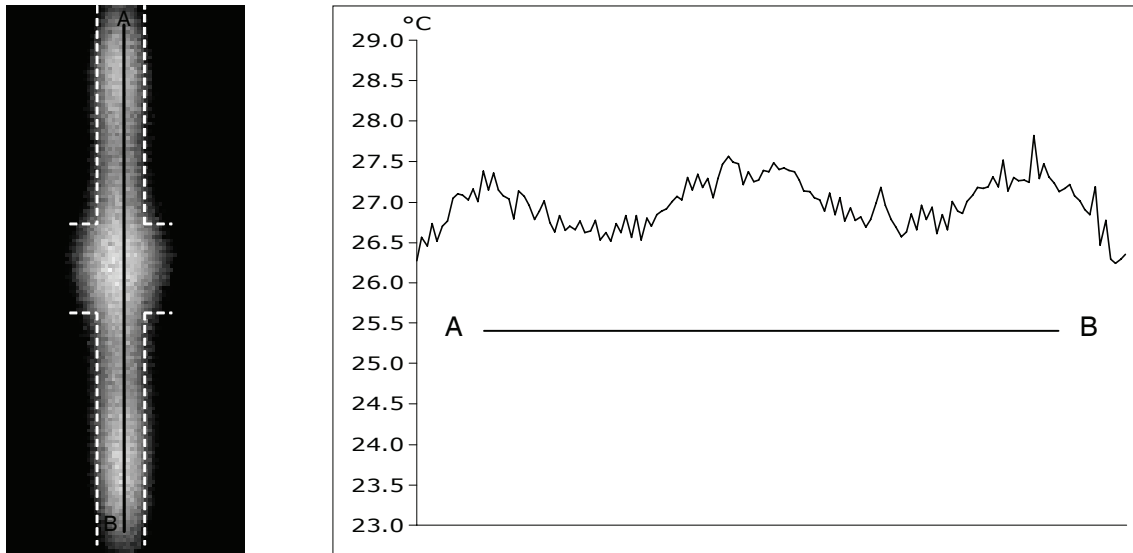


**Abbildung 73** Temperaturverteilung GG4-PP

Die Beträge der Temperaturen sind relativ gleichmäßig über die freie Einspannlänge der Proben verteilt. Die absoluten Beträge der Temperaturen können bei diesen Messungen nicht verglichen werden, da die Umgebungstemperatur zwischen 21,7 °C am Anfang der Versuche und etwa 24 °C am Ende der Versuche schwankte.



**Abbildung 74** Temperaturverteilung GG5-PE

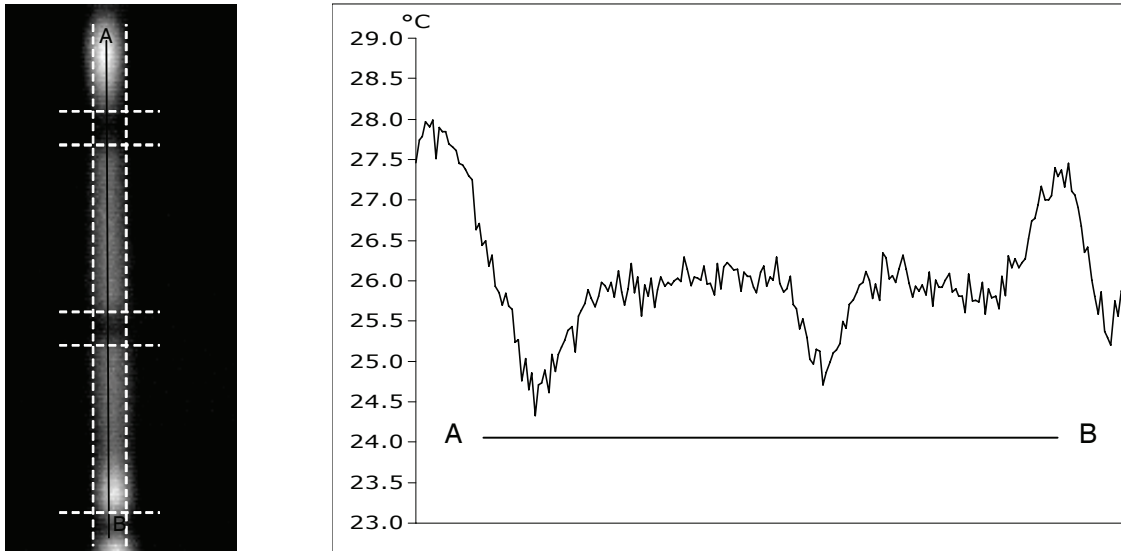


**Abbildung 75 GG5-PE mit doppelter Spannungsamplitude**

Um mit Hilfe der Temperaturverteilung herauszufinden, wo sich die Auswirkungen wesentlich höherer Beanspruchungen zeigen, wurden zusätzliche Temperaturmessungen bei deutlich höheren dynamischen Einwirkungen gefahren.

Wie in Abbildung 75 dargestellt wurde für das Material GG5-PE die Spannungsamplitude verdoppelt. Neben einem Anstieg der Temperatur waren nun auch Schwankungen zwischen dem aufgenommenen Knotenbereich und den daran anschließenden Stegen zu erkennen. Daraus kann auf Spannungsunterschiede im Material geschlossen werden.

Noch deutlicher wird dies, wenn das Material bis zum Bruch beansprucht wird und die Bilder kurz vor dem Versagen aufgenommen wurden. Abbildung 76 zeigt eine solche Situation. Die Temperaturspitzen befinden sich unmittelbar an den Rändern der Verschweißung. Es sind nicht die Flächen der Verschweißung die Bereiche mit den höchsten Temperaturen. Möglicherweise isolieren die Ränder der Schweißpunkte die Innenbereiche der Verschweißung, da an der Oberfläche im äußeren Bereich Molekülstränge während der Herstellung durchtrennt wurden und sie deshalb keine Kräfte mehr weiterleiten können. Das drückt sich dann auch im Schweißverlust der Zugfestigkeiten von den Elementen zwischen den Kreuzungspunkten und den Bereichen, die Kreuzungspunkte mit einschließen, aus.



**Abbildung 76 GG1-PET kurz vor dem Bruch**

Versagt hat das GG1-PET unmittelbar über dem obersten Kreuzungspunkt der in Abbildung 76 dargestellten Probe. Ein Bereich, der in den Infrarotaufnahmen einen Maximalwert der Oberflächentemperatur aufgewiesen hat.

## 4.2 Chemische Analyse der Geokunststoffe

### 4.2.1 IR - Spektroskopie

#### 4.2.1.1 Vorbemerkungen

An dieser Stelle sei noch einmal explizit darauf hingewiesen, dass die erarbeiteten IR-Spektren nur den äußersten Bereich der untersuchten Materialien abdecken. Es handelt sich dabei um den Bereich, der auch den Umwelteinflüssen am stärksten ausgesetzt ist. Dadurch sind die Ergebnisse der IR-Spektroskopie nicht zwingend für den gesamten Querschnitt der Proben repräsentativ. Die hierbei erhaltenen Aussagen sind Indizien, die in Kombination mit den DSC-Messungen zu weiteren Schlussfolgerungen berechtigen.

IR-Spektren wurden von den Materialien GG2-PET, GG3-PP und GG5-PE erstellt.

#### 4.2.1.2 IR-Spektren von GG2-PET

Die Probe von GG2-PET führte auf Grund ihrer Oberflächenbeschaffenheit zu ausgeprägten Spektren sowohl für das unbeanspruchte Material als auch für jenes nach der zyklischen Beanspruchung mit  $N = 10^7$  Lastwechseln. Abbildung 77 enthält die typischen Peaks für PET. Diese liegen bei den Wellenzahlen  $\nu = 1714 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu = 1241 \text{ cm}^{-1}$  und  $\nu = 1094 \text{ cm}^{-1}$ . Das Band bei  $\nu = 1714 \text{ cm}^{-1}$  ist auf die *Ester*-Gruppe des PET's zurückzuführen (Abbildung 38), die wie alle Carbonylverbindungen mit der entsprechenden Endgruppe aus Abbildung 79 durch Peaks in diesem Bereich des Spektrums zu finden sind. Durch die *aromatischen* und *aliphatischen* Anteile des Polyesters gibt es weit mehr Peaks als bei den Polyolefinen. Der „finger print“ Bereich ist hier besonders ausgeprägt. Ein besonderes Merkmal für die räumliche Struktur von PET ist der Peak bei  $\nu = 722 \text{ cm}^{-1}$ . [SOCRATES-01]

Die Spektren für das untersuchte GG2-PET vor und nach der zyklischen Beanspruchung sind nahezu deckungsgleich. Es sind mittels IR-Spektroskopie keine Anomalien oder nennenswerten Veränderungen des Polymers zu erkennen.

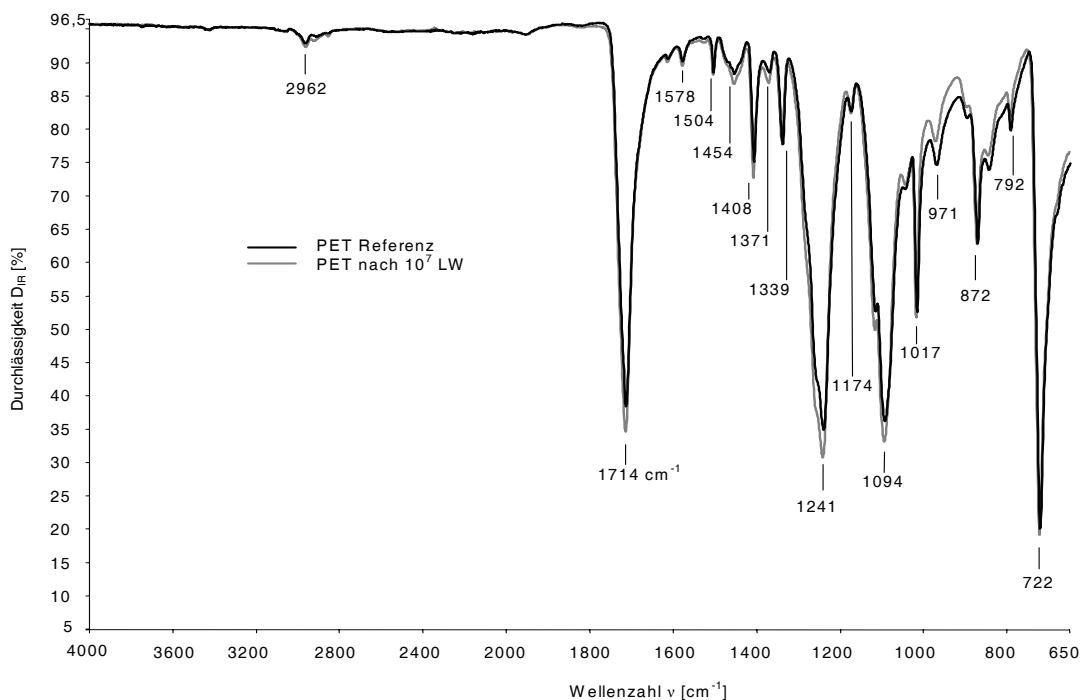


Abbildung 77 IR-Spektren von GG2-PET

Da die Aussagekraft von IR-Spektren auf angeregten Gitterschwingungen beruht und mit dieser Methode keine Aussagen zu morphologischen Veränderungen wie der

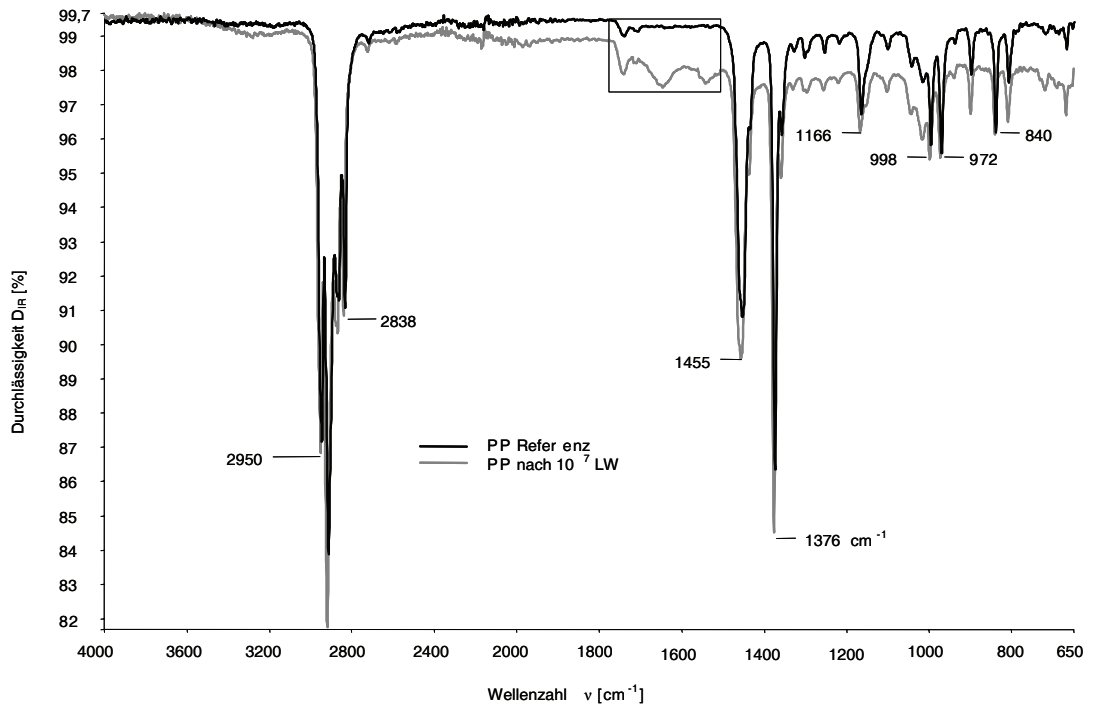
*Kristallinität* oder der Wechselwirkung zwischen den Molekülen u.a. gemacht werden können, wurde auch dieses Material zur weiteren Einschätzung der Auswirkungen der zyklischen Beanspruchung der thermischen Analyse mittels DSC unterzogen (4.2.2.2).

#### 4.2.1.3 IR-Spektren von GG3-PP

Für das Material GG3-PP wurden IR-Spektren für eine unbeanspruchte Probe als Referenz und eine nach  $N = 10^7$  Lastwechseln angefertigt. Beide Spektren zeigen die nach [SOCRATES-01] für PP typischen Peaks bei Wellenzahlen von  $\nu = 2950 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\nu = 1455 \text{ cm}^{-1}$  und  $\nu = 1376 \text{ cm}^{-1}$  (vgl. Abbildung 78). Die strukturierte Oberfläche der Probe erwies sich als nachteilig für die IR-Spektroskopie. Dadurch konnte nicht in jedem Fall das plane Aufliegen des zu analysierenden Materials auf der Austrittsöffnung des Spektrophotometers gewährleistet werden. Das schlägt sich im unterschiedlichen Verlauf der Basislinien der beiden Spektren nieder. Deshalb ist der Anteil der Strahlung der bei dem PP-Auflichtspektrum absorbiert wurde wesentlich geringer als beim PET-Spektrum (Abbildung 77) und beim Spektrum für das PEHD-Material (Abbildung 83). Die Darstellung in Abbildung 78 erfolgt deshalb mit einer anderen Skalierung. Das führt dazu, dass bereits kleinste Veränderungen auffallen und der gesamte Verlauf der Spektren ungenauer erscheint.

Deshalb soll hier die unterschiedliche Durchlässigkeit  $D_{\text{IR}}$ , die die Messungen für PP suggerieren, außer Acht gelassen und nur eine qualitative Auswertung der einzelnen Peaks vorgenommen werden.





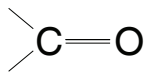
**Abbildung 78** IR-Spektren von GG3-PP

Zu beachten ist der eingerahmte Bereich in Abbildung 78. Es ist der typische Bereich der Carbonylbanden zwischen Wellenzahlen von  $\nu = 1850 \text{ cm}^{-1}$  und  $\nu = 1550 \text{ cm}^{-1}$ . Hier treten für die Probe nach der zyklischen Beanspruchung neue Peaks auf.

Carbonylverbindungen sind organische Verbindungen, die eine Carbonylgruppe (Abbildung 79) im Molekül enthalten. Sie sind sehr reaktiv. Durch die unterschiedliche Elektronegativität von Kohlenstoff C und Sauerstoff O hat die Doppelbindung einen polaren Charakter, was sie sehr interessant für die Analyse im elektromagnetischen Spektrum macht. [JAKUBKE-87] Zu den Carbonylverbindungen, die mittels IR-Spektroskopie analysiert werden können gehören:

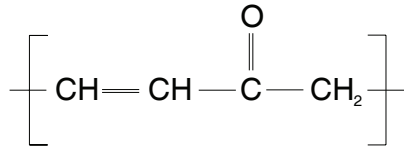
- *Ketone*
- *Aldehyde*
- Carbonsäuren
- Säurechloride
- *Ester*
- Anhydride
- Amide
- Kohlensäurederivate

Bis auf die *Ketone* haben alle anderen Carbonylverbindungen weitere Merkmale im Spektrum, die für die genaue Identifizierung heranzuziehen sind [GÜNZLER-03]. Deshalb werden *Ketone* im Ausschlussverfahren festgestellt, obwohl sie zu den am häufigsten vorkommenden Carbonylverbindungen gehören.



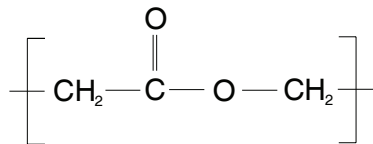
**Abbildung 79 Carbonylgruppe der Carbonylverbindungen**

Für die Bestimmung der einzelnen Carbonylverbindungen der untersuchten PP - Probe ist die Abbildung 39 für PP mit heranzuziehen. Die Peaks im grau hinterlegten Bereich der Abbildung 78 zeigen eine Veränderung des Spektrums von PP an. Bei der Qualität der Spektren für PP ist es grundsätzlich schwer eine Interpretation vorzunehmen. Die eigentlichen Peaks sind nicht in jedem Fall von der zu erwartenden Intensität. Das gleiche gilt auch für die in der Regel noch schwächeren Kontrollbanden. In dieser Arbeit geht es darum, die möglichen Veränderungen des Polymers einzugrenzen und auf Carbonylverbindungen zu beschränken, da sie ein Indiz für eine Sauerstoffeinlagerung und damit für eine *Oxidation* sind. Der Peak im Bereich  $\nu = 1695 \text{ cm}^{-1}$  bis  $\nu = 1660 \text{ cm}^{-1}$  lässt den Schluss zu, dass sich das in Abbildung 80 dargestellte *Keton* gebildet hat. Dafür spricht auch die Kontrollbande im Bereich der C=C-Doppelbindung bei etwa  $\nu = 1500 \text{ cm}^{-1}$ .

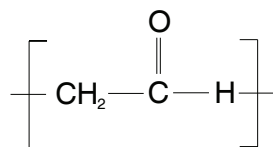


**Abbildung 80 Keton in Bereich  $\nu = 1695 \text{ cm}^{-1}$  bis  $1660 \text{ cm}^{-1}$**

Der Peak bei  $\nu = 1750 \text{ cm}^{-1}$  könnte für ein *Ester* stehen, dessen Kontrollband im 1200er Bereich zur Verifizierung heranzuziehen ist. Da der Peak bei  $\nu = 1166 \text{ cm}^{-1}$  liegt und auch die erforderlichen C=O- und Acryl-Banden daneben durch die zuvor erwähnten die Messungenauigkeiten nicht charakteristisch ausgeprägt sind, kann es sich auch um die Schwingungen des *Aldehyds* in Abbildung 82 handeln. Hier kann ein Bandendoppel bei  $\nu = 2850 \text{ cm}^{-1}$  und  $\nu = 2750 \text{ cm}^{-1}$  zur Bestätigung herangezogen werden. Das Spektrum weist das Band bei  $\nu = 2838 \text{ cm}^{-1}$  aus. Für eine abschließende Beurteilung wäre auch ein Peak bei etwa  $\nu = 2750 \text{ cm}^{-1}$  erforderlich [GÜNZLER-03]. Dieser ist jedoch nicht aufgenommen worden. Wenn nicht der *Ester* die Ursache für den Peak bei  $\nu = 1750 \text{ cm}^{-1}$  ist, dann könnte er dem *Aldehyd* zuzuschreiben sein. Beides wäre mit Ungenauigkeiten verbunden. Durch die Oberflächenstruktur sind zwar Auswirkungen auf die Genauigkeit der Spektren vorstellbar. Es kann aber keine Aussage darüber gemacht werden, wie groß dieser Fehler ist. Andere Indikatoren sind in den Spektren von GG3-PP nicht ausgeprägt.



**Abbildung 81 Ester in Bereich  $\nu = 1750 \text{ cm}^{-1}$  bis  $1735 \text{ cm}^{-1}$**



**Abbildung 82 Aldehyd in Bereich  $\nu = 1740 \text{ cm}^{-1}$  bis  $1720 \text{ cm}^{-1}$**

Unabhängig davon, welche der Carbonylverbindungen vorliegen, deuten die Spektren auf eine Sauerstoffanlagerung hin. An der Oberfläche der PP-Probe sind, über die normale Alterung hinaus, Oxidationsprozesse abgelaufen, für die der durchgeführte Belastungsversuch ursächlich gewesen sein kann.

Der leicht veränderte Verlauf im Bereich  $\nu = 3200 \text{ cm}^{-1}$  ist nicht ohne weiteres auf eine zusätzliche Wasseraufnahme des beanspruchten Polymers zurückzuführen. Das würde eine Verschiebung der typischen symmetrischen Valenzschwingungen aus dem Bereich zwischen  $\nu = 3600 \text{ cm}^{-1}$  bis etwa  $\nu = 3800 \text{ cm}^{-1}$  bedeuten. [GÜNZLER-03]

Abschließend kann festgestellt werden, dass die zyklische Beanspruchung und die Art und Weise des Versuchsaufbaus nur sehr geringe Einflüsse auf die chemische Struktur des PP-Materials hatte. Ob das Entstehen der Carbonylverbindungen zu einem Abbau der *Molmasse* und zu einer Veränderung der *teilkristallinen* Struktur des untersuchten PP's geführt hat, so dass es bei der Beurteilung des Materials zu berücksichtigen ist, wurde in 4.2.2.3 mit DSC-Messungen noch weiter untersucht.

#### 4.2.1.4 IR – Spektren von GG5-PE

Für GG5-PE liegen die Spektren für die Referenzprobe und das Material nach einer Beanspruchung mit  $10^5$  Zyklen in Abbildung 83 vor. Die Spektren haben eine gute Auflösung. Die aufgezeichneten Peaks lassen sich nach [SOCRATES-01] PEHD zuordnen. Das wären die ausgeprägten Peaks bei Wellenzahlen von etwa  $\nu = 2950 \text{ cm}^{-1}$  und  $\nu = 1460 \text{ cm}^{-1}$  und die Bande im Bereich von  $\nu = 725 \text{ cm}^{-1}$  als Doppelpeak. Diese Banden entstehen durch die Verstreckung, Verformung und Oszillation der enthaltenen CH-Gruppen (Abbildung 39). Der kleine Peak bei etwa  $\nu = 1380 \text{ cm}^{-1}$  ist auf die Methylgruppen zur Verzweigung der PE – Ketten zurückzuführen. Auffällig ist allein der Peak bei  $\nu = 1741 \text{ cm}^{-1}$ .

Aufgrund der guten Auflösung der Spektren kann hieraus grundsätzlich abgeleitet werden, dass die Probe nach  $10^5$  Zyklen mehr Carbonylverbindungen aufweist als die Referenz.

Für die Bestimmung der Carbonylbande gibt es eine ausgeprägte Kontrollbande bei  $\nu = 2846 \text{ cm}^{-1}$  und einen sehr schwachen Peak bei etwa  $\nu = 2750 \text{ cm}^{-1}$ . Deshalb spricht vieles für ein *Aldehyd*, wie in Abbildung 82 dargestellt.

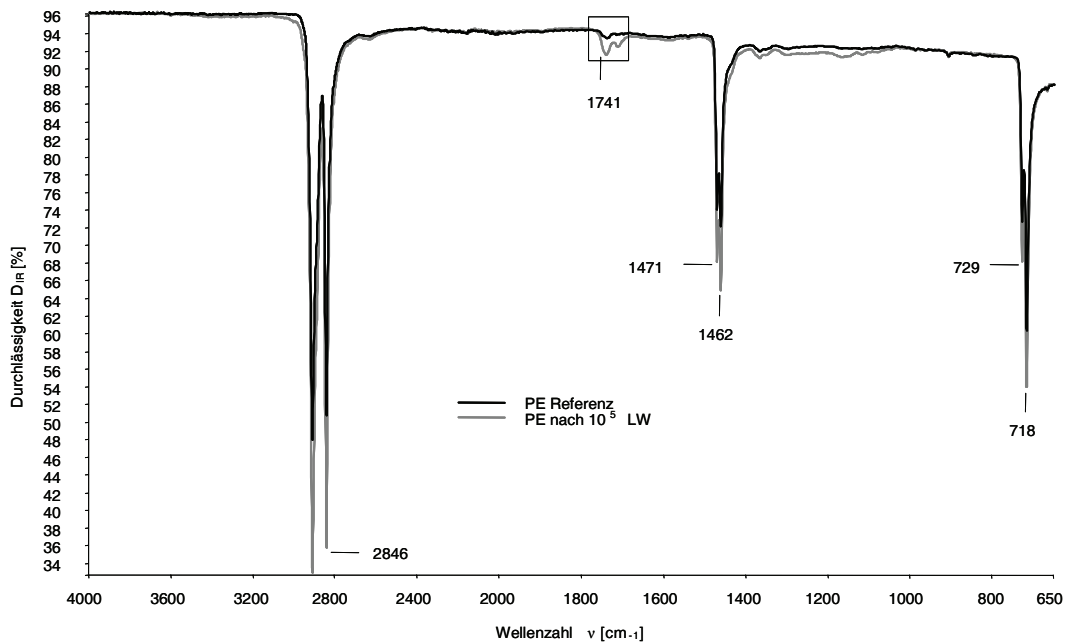


Abbildung 83 IR-Spektren von GG5-PE

Die zugehörigen DSC-Kurven befinden sich in 4.2.2.4.

## 4.2.2 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

### 4.2.2.1 Vorbemerkungen

Mit dem in 3.3.5.2 beschriebenen Temperaturprogramm wurden DSC-Kurven für die Materialien GG2-PET, GG3-PP und GG5-PE aufgezeichnet. Mit ihrer Hilfe konnten die Morphologie der Polymere vor und nach den zyklischen Beanspruchungen analysiert und die zuvor durchgeführte Auswertung der IR-Spektralanalysen präzisiert werden. Die DSC-Messungen stellen einen ersten Anhaltspunkt für eine quantitative Aussage zu den Veränderungen der einzelnen Polymere dar.

Der Einfachheit halber wurde bei der Auswertung der DSC-Kurven davon ausgegangen, dass es sich um nahezu homogene Polymere handelt. Es wurde lediglich eine Abgrenzung zu sonstigen Massenbestandteilen, die sich in der Massendifferenz widerspiegeln, vorgenommen. Die Massendifferenz gibt dabei den prozentualen Unterschied zwischen der Einwaage und der mit Hilfe der Enthalpieänderung  $\Delta H$  und dem Grad der *Kristallinität* errechneten Masse des jeweiligen *Homopolymers* an. Auf der Basis von Plausibilitätsbetrachtungen wurde davon ausgegangen, dass jedes untersuchte Polymer einen einheitlichen Anteil an Zusatzstoffen 5 % hat. Damit relativieren sich die ermittelten Absolutwerte für den

Grad der *Kristallinität* der verschiedenen Polymere etwas. Die Tendenz jedoch, die sich aus den Messungen mit der Referenzprobe gegenüber der jeweiligen Probe nach den zyklischen Beanspruchungen ergibt, hat Bestand. Der kristalline Anteil wurde aus Literaturwerten der Schmelzenthalpie  $\Delta H$ , der integrierten Schmelzenthalpie  $H$  aus der DSC-Kurve und der Einwaage  $m$  nach Gleichung 18 ermittelt.

$$K = \left( \frac{H}{m - m_D} \right) \cdot \frac{100\%}{\Delta H}$$

#### **Gleichung 18 Ermittlung der Kristallinität**

Dabei ist aber immer zu berücksichtigen, dass es sich um die Ergebnisse von Versuchen handelt, die die Eigenschaften der untersuchten Geokunststoffe beschreiben. Sie lassen sich nur mit großen Unsicherheiten auf andere Materialien aus dem gleichen Polymer übertragen, da herstellungsspezifische Eigenschaften zu berücksichtigen sind.

Bei der Auswertung der DSC-Kurven wird grundsätzlich der 2. Heizgang betrachtet, da durch das Aufschmelzen im 1. Heizgang der thermische Kontakt zwischen Probe und Tiegel während des 2. Heizganges besser ist und die Übergangsbereiche der DSC-Kurve deshalb besser ausgebildet sind. Da im vorliegenden Fall aber gerade die Änderung der Polymere nach der zyklischen Beanspruchung untersucht werden sollte, wurde auch der 1. Heizgang ausgewertet. Dadurch sollte einer Veränderung der Morphologie/*Kristallinität*, die beim Abkühlen nach dem 1. Heizgang entsteht vorgebeugt werden.

#### **4.2.2.2 Differential Scanning Calorimetry (DSC) von GG2-PET**

Der gewählte Temperaturbereich deckte für das untersuchte Material GG2-PET die Glasübergangstemperatur  $T_g$  und die Schmelzenthalpie  $\Delta H$  ab. Abbildung 84 und Abbildung 85 zeigen das jeweilige Verhalten vor und nach den Zugversuchen.

Was sich bereits bei den IR-Spektren dieses Materials angedeutet hat, setzt sich auch bei der Auswertung der DSC-Kurven fort. Der Grad der *Kristallinität*, der durch einen Vergleich mit charakteristischen Enthalpiewerten aus [KREVELEN-03] für die

Referenzprobe berechnet wurde, unterscheidet sich kaum von dem Wert des Probenmaterials nach  $N = 10^7$  Lastwechseln (Tabelle 18).

Die *Kristallinitäten* zwischen 38,08 % und 38,96 % liegen an der oberen Grenze der in [EHRENSTEIN-03] für PET angegebenen Bandbreite von 30 % bis 40 %. Hier gibt es auch keinen signifikanten Unterschied zwischen dem 1. und dem 2. Heizgang, so dass die Morphologie von PET der zyklischen Beanspruchung nicht messbar beeinflusst wurde.

Den einzigen Ansatz für eine Veränderung des PET wäre in der niedrigeren Glasübergangstemperatur  $T_g$  nach der zyklischen Beanspruchung zu sehen. Sie hat sich im 2. Heizgang von 82,88 °C vor auf 78,82 °C nach den Versuchen verringert. Wie in 2.5.3.2 beschrieben, kann dies mehrere Ursachen haben. Allerdings sprechen die ermittelten Schmelzenthalpien  $\Delta H$  gegen einen veränderten Grad der *Kristallinität*  $K$  und die Restzugfestigkeit des Geokunststoffes gegen eine beschleunigte Alterung. Natürlich kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich Trainingseffekte aus der zyklischen Beanspruchung mit denen der Alterung überlagert haben und deshalb keine messbaren Zugfestigkeitsverluste aufgetreten sind. Eine Alterung kann bei langkettigen Polymeren wie z. B. PET zu chemischen Veränderungen des Materials führen, die sich nicht unmittelbar auf dessen mechanische Eigenschaften auswirken. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn sich lange Molekülketten an mehreren Stellen überlagern, sozusagen umschlingen und verknoten und dadurch eine Art Netzstruktur bilden. Dadurch können Fehlstellen der Molekülketten bis zu einem gewissen Grad kompensiert werden. Deshalb spiegeln sich Veränderungen der Moleküle nicht unmittelbar in einer messbaren niedrigeren Zugfestigkeit wider. Sofern die veränderte Morphologie von PET mit der Einlagerung von Wasser verbunden ist, verändert sich das IR-Spektrum.

Bei der Betrachtung der DSC-Kurven fällt auf, dass der für den Glasübergangsbereich charakteristische Sprung der Basislinie (vgl. Abbildung 21) im 2. Heizgang nicht besonders stark ausgeprägt und im 1. Heizgang nicht auswertbar ist. Die Auswertung der Glasübergangsstufe des 2. Heizganges wurde unter Zuhilfenahme der Metteler Gerätesoftware METTELER STAR<sup>®</sup> nach der Methode der halben Breite durchgeführt um möglichst gut reproduzierbare Werte zu erhalten. Als problematisch hat sich aber die Festlegung der Wendepunkte am Eingang und Ausgang der Glasübergangsstufe erwiesen. Die Suchbereiche dafür waren manuell

festzulegen. Das kann eine mögliche Fehlerquelle sein, mit der die Abweichung der Glasübergangstemperatur  $T_g$  zu erklären ist.

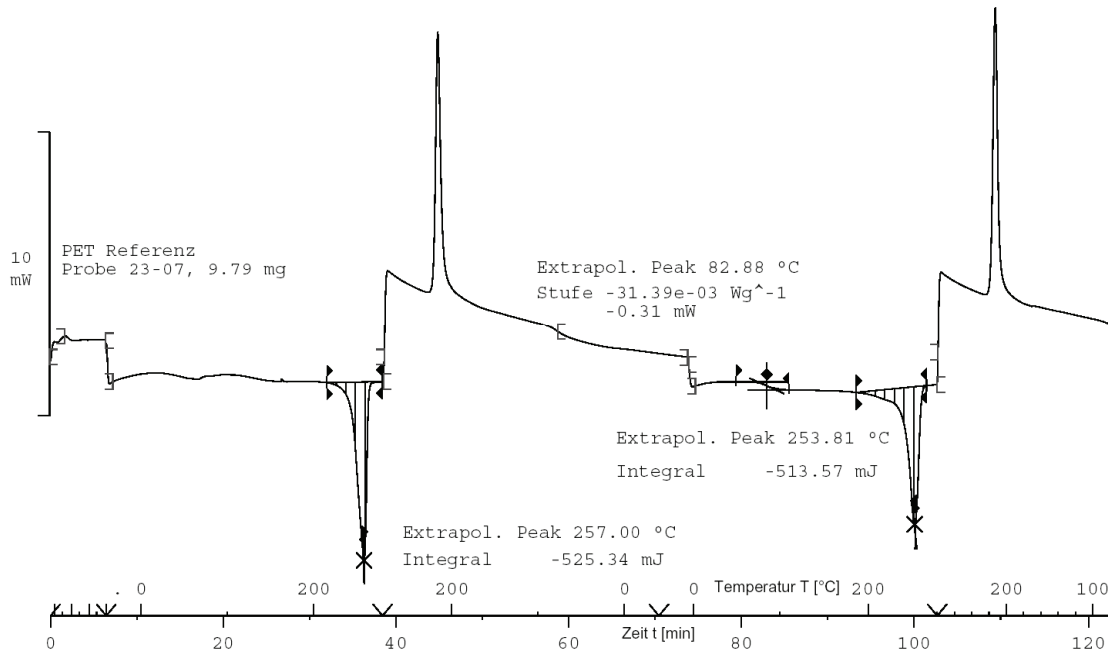


Abbildung 84 DSC-Referenzmessung für GG2-PET

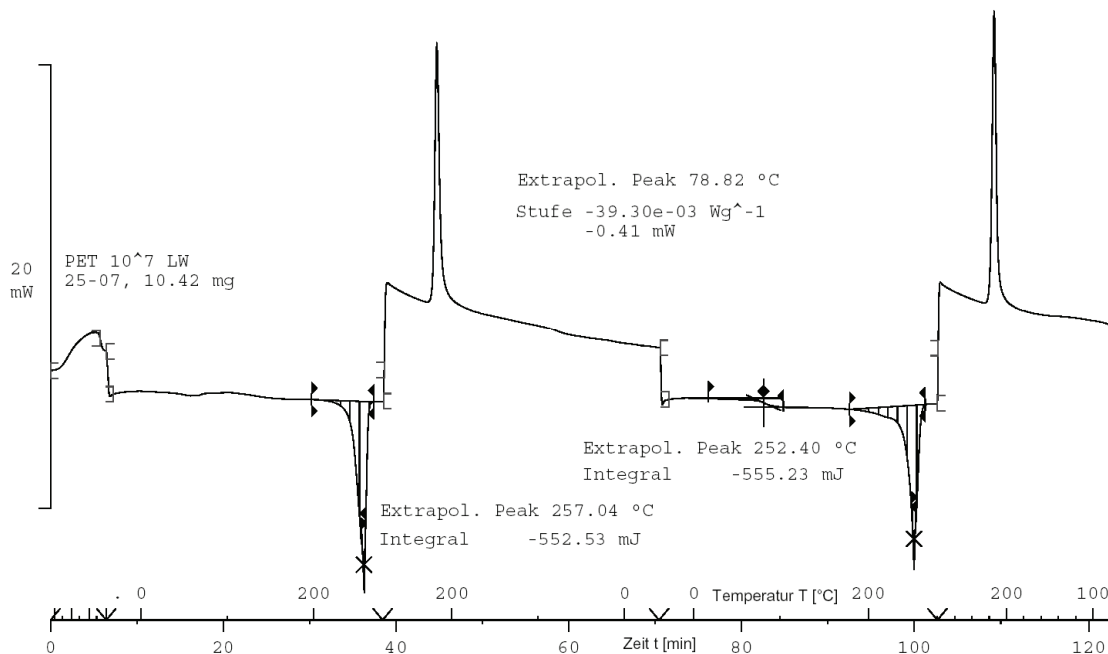


Abbildung 85 DSC-Messung nach  $N = 10^7$  Lastwechseln für GG2-PET

Letztendlich gibt das angewandte thermische Verfahren in Kombination mit den vorgenannten Untersuchungen keinen schlüssigen Hinweis darauf, dass sich die



Ausgangsmaterialien der Geokunststoffe aus PET durch die aufgebrachtten zyklischen Beanspruchungen in ihrer Morphologie messbar verändert hätten.

**Tabelle 18 Auswertung der Schmelzenthalpie  $\Delta H$  für GG2-PET**

Probenbezeichnung		1. Heizgang		2. Heizgang	
		Referenz	N=10 <sup>7</sup>	Referenz	N=10 <sup>7</sup>
Probennummer		23-07	25-07	23-07	25-07
Polymer		PET	PET	PET	PET
Schmelzenthalpie $\Delta H$ nach [KREVELEN-03]	[J/g]	145	145	145	145
kristalliner Anteil K	[%]	38,96	38,49	38,08	38,68
Einwaage m	[mg]	9,79	10,42	9,79	10,42
Messwert Enthalpie H	[mJ]	525,34	552,53	513,57	555,23
Massendifferenz $m_D$	[m-%]	5,00	5,00	5,00	5,00

#### 4.2.2.3 Differential Scanning Calorimetry (DSC) von GG3-PP

Die DSC-Kurven des untersuchten PP Materials weisen im 1. Heizgang jeweils 2 und im 2. Heizgang jeweils 3 erkennbare Übergangsbereiche auf. Das sind Sprünge in der Basislinie und Schmelzenthalpien  $\Delta H$ . Im 2. Heizgang überlagern sich zwei Schmelzenthalpien  $\Delta H$ .

Die Überlagerung der beiden Schmelzpeaks im 2. Heizgang spricht für die Verwendung eines Copolymers. Wie bereits bei der Auswertung der IR-Spektren erwähnt, könnte es sich dabei um eine PE-Zugabe handeln. Dies ist eine übliche Verfahrensweise für eine Kohlenstoffmodifikation, da PP sonst für bestimmte Anwendungen, unabhängig von der Geotechnik, zu spröde sein kann. Ein weiterer Grund könnte die Zugabe von Additiven über eine Masterbatch aus PE sein.

Ein Vergleich der durchgeführten DSC-Analysen vom Referenzmaterial (Abbildung 86) und der beanspruchten Probe nach den Versuchen zeigt, dass das Copolymer über den Kristallisationsprozess hinaus keinen messbaren Einfluss auf das Basispolymer PP hat. Dafür sprechen die Schmelztemperaturen  $T_{pm}$ , die gleich sind und bei 160,61 °C bzw. 159,97 °C liegen.

Da der Doppelpeak der Schmelzenthalpie  $\Delta H$  im 1. Heizgang nicht eindeutig nachweisbar war, kann der Einfluss des 1. Heizganges auf das Polymer nicht abgeschätzt werden.

Das Hingegen ließe sich aber für den Grad der *Kristallinität* K aus den Hauptpeaks der Schmelzenthalpien  $\Delta H$  des 1. und 2. Heizganges schlussfolgern.

Die über die Schmelzenthalpien  $\Delta H$  des 2. Heizganges in Tabelle 19 ermittelten kristallinen Anteile von 48,49 % bzw. 48,09 % im Gefüge sind im Zusammenhang zu möglichen Kristallisationsgraden von 60 % bis 70 % für *homopolymeres* PP zu sehen. Hier weist der 1. Heizgang mit Kristallisationsgraden  $K$  von 55,60 % bzw. 56,47 % höhere Werte auf, die der Größenordnung in der Literatur nahe kommen. Ursächlich kann das Temperaturprogramm der DSC-Messung sein, dass nicht den optimalen Prozessbedingungen wie bei der Herstellung des Ausgangsmaterials für den Geokunststoff aus PP entspricht und das Copolymer oder ein *Nukleierungsmittel* in der Kristallisationsphase nicht optimal in Erscheinung treten konnten. Es gäbe zwar Möglichkeiten die thermische Analyse durch die Wahl der Abkühlgeschwindigkeit nach der 1. Aufheizphase entsprechend anzupassen, doch ein Abweichen von üblichen Standards würde andere Literaturquellen als Daten- und Informationsgrundlagen ausschließen. Da es einen direkten Zusammenhang zwischen der Enthalpie  $\Delta H$  und dem Grad der Kristallisation gibt, hätten sich Veränderungen des kristallinen Gefüges auch dann bemerkbar gemacht, wenn der Kristallisationsprozess nicht vollständig abgeschlossen ist. Unterschiedliche Kristallisationsgeschwindigkeiten hätten dann zu verschiedenen Ergebnissen geführt.

Weiterhin wichtig ist die Auswertung der Glasübergangsbereiche. Die Sprünge der Basislinien des 1. und 2. Heizganges sind zwar nicht sehr deutlich ausgebildet und wie bei der Betrachtung des PET in 4.2.2.2 erläutert, kann dies zu Fehlern führen, dafür gibt es aber einen signifikanten Unterschied bei den Glasübergangstemperaturen  $T_g$  beider Messungen zwischen der Referenz und der beanspruchten Probe selbst aber auch zwischen beiden Heizgängen. Die in Abbildung 86 ermittelte Glasübergangstemperatur  $T_g$  für GG3-PP beträgt für das Referenzmaterial im 1. Heizgang 17,27 °C und im 2. Heizgang - 8,96 °C. Das bedeutet einen Unterschied zur beanspruchten Probe, wie in Abbildung 87 mit 29,78 °C für den 1. Heizgang bzw. mit 5,95 °C für den 2. Heizgang dargestellt, von  $\Delta T_g = 12,51$  K respektive  $\Delta T_g = 14,91$  K. Normalerweise liegt der Glasübergangsbereich von PP nach [EHRENSTEIN-03] zwischen 0 °C und 20 °C. Mit der Glasübergangstemperatur  $T_g$  der Referenzmessung kann in begrenztem Umfang das Copolymer charakterisiert werden. Wegen der Einflüsse aus der mechanischen Bearbeitung während der Herstellung des Geokunststoffes und der zyklischen Beanspruchung durch die Versuche, die die DSC-Kurve des 1. Heizgang beeinflussen und nicht isoliert werden können, ist für die Abschätzung des Einflusses des Copolymers der 1. Heizgang nicht geeignet. Da  $T_g$  im 2. Heizgang unterhalb der für das *Homopolymer* üblichen Bandbreite liegt, ist dies ein weiteres Indiz für die

Verwendung von PE als Copolymer. PE hat einen eigenen Glasübergangsbereich, der unter  $-100\text{ °C}$  [EHRENSTEIN-03] liegt. Bereits kleine Beigaben von PE verringern deshalb die Glasübergangstemperatur  $T_g$  des Endproduktes.

Aufgrund der niedrigeren Glasübergangstemperatur der Referenzprobe im Vergleich zu Literaturwerten, könnte auch ein Ethylen-Propylen-Dien-Copolymer (EPDM) in Betracht kommen. Als eine Art „Weichmacher“ durch Kohlenstoffmodifikation im PP verbessert es neben anderen Eigenschaften die Schlagzähigkeit bei niedrigen Temperaturen und erweitert somit den Einsatzbereich von PP auf Temperaturen die deutlich unter  $0\text{ °C}$  liegen [HELLERICH-01]. Gegen EPDM spricht die Schmelztemperatur der Referenzprobe des untersuchten PP, die mit ca.  $160\text{ °C}$  im polymertypischen Bereich liegt. Ein Nebeneffekt der Verwendung von EPDM ist eine niedrigere Schmelztemperatur [SAECHTLING-01] als bei der alleinigen Verwendung eines PP-Homopolymers.

Auch die Rückkoppelung mit den IR-Spektren für PP in Abbildung 78 und ein direkter Vergleich der grau hinterlegten Bereiche aus diesem und dem in Abbildung 83 für PE zeigt, dass die Carbonylbanden des hier untersuchten PP bei den für PE typischen Wellenzahlen auftreten. Damit ließe sich auch die etwas höhere Glasübergangstemperatur  $T_g$  der Probe nach der zyklischen Beanspruchung erklären. Das würde bedeuten, dass die *Oxidation* zu den erwähnten Carbonylbanden vornehmlich mit den Molekülen des PE erfolgt ist. Dadurch verringert sich der Einfluss der sehr niedrigen Glasübergangstemperatur  $T_g$  des PE, so dass es zu einer Erhöhung im Vergleich zur Referenzprobe kommen konnte.

Diese eingehende Betrachtung war erforderlich um das Copolymer möglichst genau zu bestimmen. Der geringste Einfluss auf das PP ist durch den Einsatz von PE als *Block-Copolymer* zu erwarten. Bis zu einem PE-Gehalt von 20 % bleiben die kristallinen Eigenschaften des PP erhalten [SAECHTLING-01]. Der Einsatz von PE bewirkt eine Senkung der Glasübergangstemperatur von durchschnittlich 5 K, bei einer statistischen Verteilung des PE ist der Effekt eher größer und bei PE-Blöcken etwas niedriger.

Somit ergeben die Ergebnisse der Diagramme und der Tabelle 19 sowie die Erläuterungen in [SAECHTLING-01] ein rundes Bild, das für den Einsatz von PE als Copolymer spricht. PP und PE haben ein vergleichbares Alterungsverhalten. Somit ist mit keinen weiteren Einflüssen, die wegen der kurzen Dauer der hier durchgeführten Versuche noch nicht wahrgenommen werden konnten, auf die Alterungsbeständigkeit des Copolymers PE auf das Basispolymer PP zu rechnen.

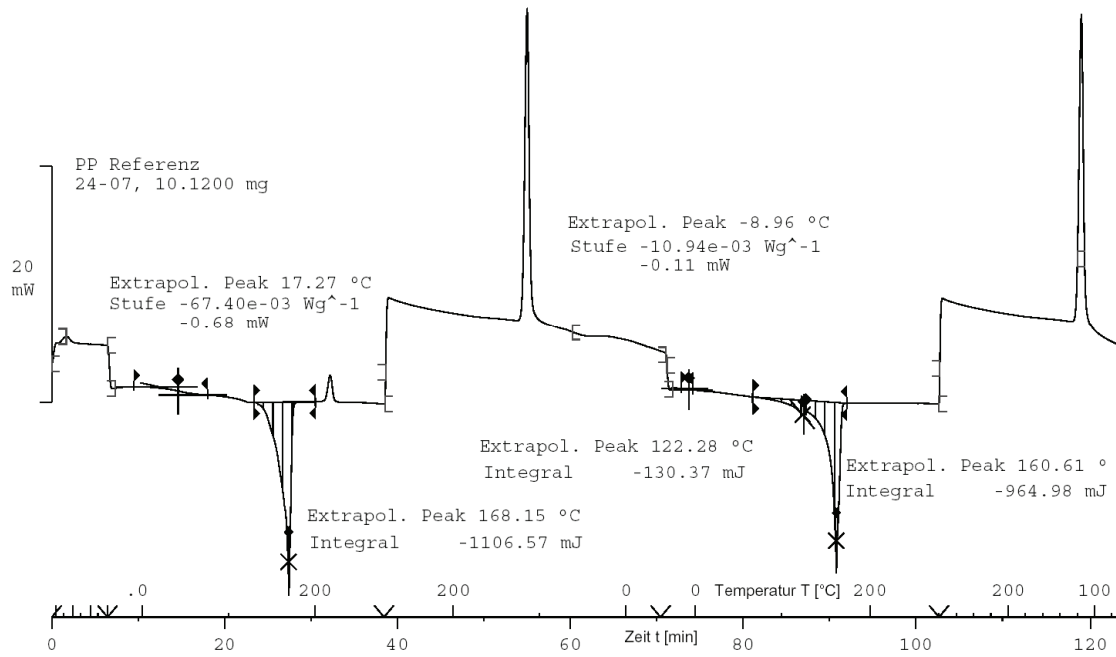
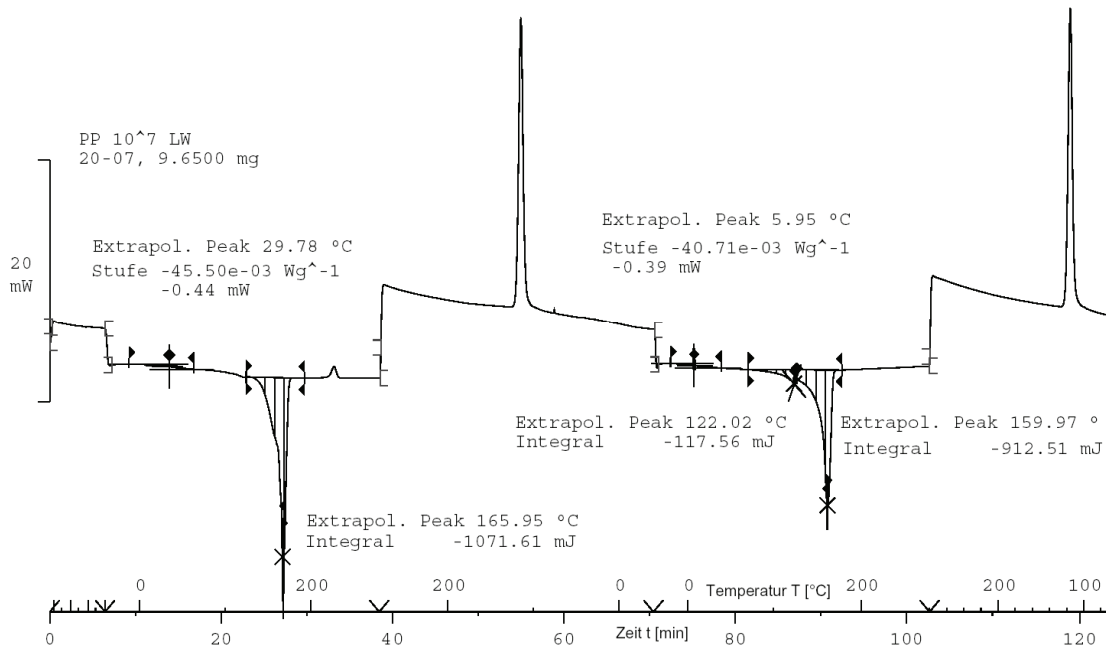


Abbildung 86 DSC-Referenzmessung von GG3-PP

Abbildung 87 DSC-Messung nach 10<sup>7</sup> Lastwechseln GG3-PP

**Tabelle 19 Auswertung der Schmelzenthalpien  $\Delta H$  für GG3-PP**

Probenbezeichnung		1. Heizgang		2. Heizgang	
		Referenz	N = 10'	Referenz	N = 10'
Probennummer		24-07	20-07	24-07	20-07
Polymer		PP	PP	PP	PP
Schmelzenthalpie $\Delta H$ nach [KREVELEN-03]	[J/g]	207	207	207	207
kristalliner Anteil K	[%]	55,60	56,47	48,49	48,09
Einwaage m	[mg]	10,12	9,65	10,12	9,65
Messwert Enthalpie H	[mJ]	1106,57	1071,61	964,98	912,61
Massendifferenz $m_D$	[m-%]	5,00	5,00	5,00	5,00

#### 4.2.2.4 Differential Scanning Calorimetry (DSC) von GG5-PE

Die Auswertung der DSC-Kurven für den untersuchten Geokunststoff GG5-PE aus PEHD kann auf Grund des gewählten Temperaturprogramms nur hinsichtlich der Schmelzenthalpien  $\Delta H$  und den dazugehörigen Peaks der Schmelztemperaturen  $T_{pm}$  erfolgen. Der Glasübergangsbereich für PE bei unter  $-100\text{ °C}$  war außerhalb des gewählten Temperaturbereiches, der sich mit vertretbarem Aufwand abdecken ließ.

Die Schmelztemperaturen  $T_{pm}$  liegen mit  $132,67\text{ °C}$  im 1. Heizgang und  $128,61\text{ °C}$  im 2. Heizgang für die Referenzprobe und  $129,84\text{ °C}$  bzw.  $129,22\text{ °C}$  für die belastete Probe im üblichen Bereich für PEHD, das nach [EHRENSTEIN-03] Schmelztemperaturen zwischen  $125\text{ °C}$  und  $135\text{ °C}$  aufweist. Hinweise auf Mischungen gibt es nicht.

Interessanterweise führt die Auswertung der Schmelzenthalpien  $\Delta H$  zu geringeren Kristallisationsgraden K von  $69,09\%$  und  $64,32\%$  der Probe nach den zyklischen Versuchen im Vergleich zu  $79,46\%$  bzw.  $70,79\%$  im 1. respektive 2. Heizgang für die Referenzprobe (Tabelle 20). Alle Rechenwerte liegen innerhalb des üblichen Bandes von  $60\%$  bis  $80\%$  für PEHD [EHRENSTEIN-03]. Auffällig ist, dass die *Kristallinität* des GG5-PE dem 1. Heizgang zufolge deutlich größer ist als im 2. Heizgang. Hier dürfte der in 4.2.2.1 erwähnte Effekt des zweimaligen Aufheizens voll zum Tragen gekommen sein.

Berücksichtigt man die Abnahme der Restzugfestigkeit für dieses Material um einen Prozentsatz von etwa  $10\%$  und vergleicht sie mit der Abnahme der *Kristallinität* des 1. Heizganges, dann ließe sich ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen beiden Kenngrößen herstellen, der es ermöglicht auf sehr einfache und schnelle Weise die Auswirkungen zyklischer Beanspruchungen auf den Geokunststoff GG5-PE zu ermitteln. Unter der Voraussetzung, dass es Rückstellproben gibt, könnte dies als Indikator für beanspruchte Proben aus realisierten Bauwerken genutzt werden.

Dass die Struktur des untersuchten Geokunststoffes aufgrund des Herstellungsverfahrens nicht homogen ist und die Verteilung der kristallinen und amorphen Bereiche zwischen den Kreuzungspunkten und Strängen des Geogitters unterschiedlich ist, wurde bei der Vorbereitung der Proben berücksichtigt. Da der Geokunststoff GG5-PE in den Zugversuchen nach der zyklischen Beanspruchung in der Mitte der Stränge versagt hat, wurden die Proben ebenfalls mittig aus nebeneinander liegenden Strängen entnommen.

Dadurch konnte eine Verbindung zwischen Ursache – Carbonylband – und Wirkung – geringere Restzugfestigkeit – über den Kristallisationsgrad für die Auswirkungen zyklischer Beanspruchungen auf den untersuchten Geokunststoff aus PEHD hergestellt werden.

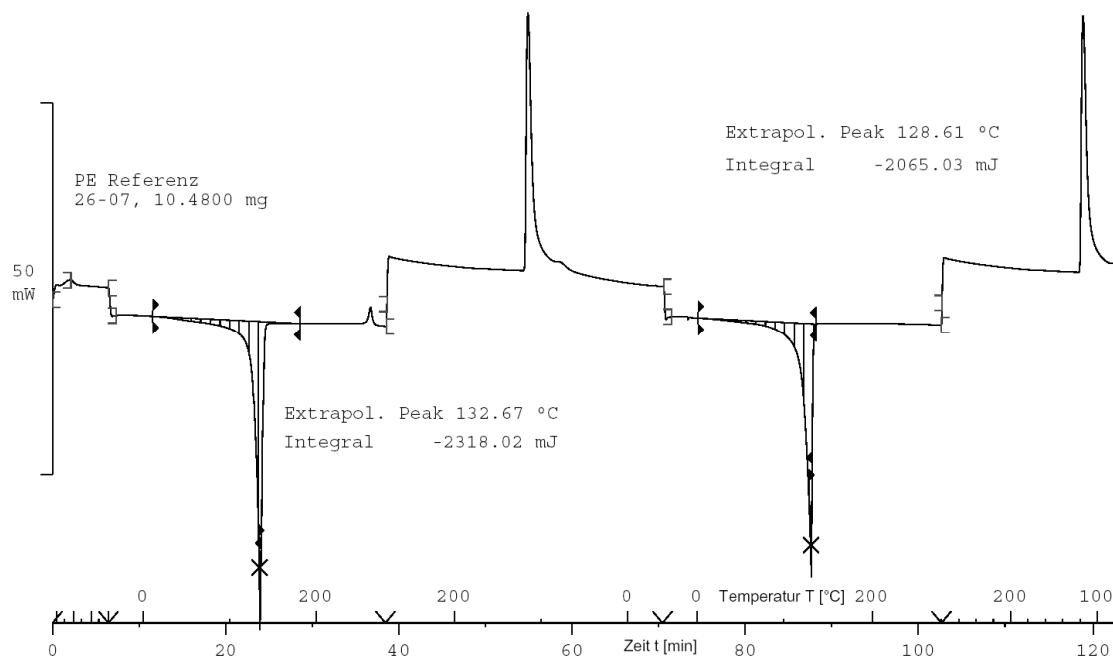
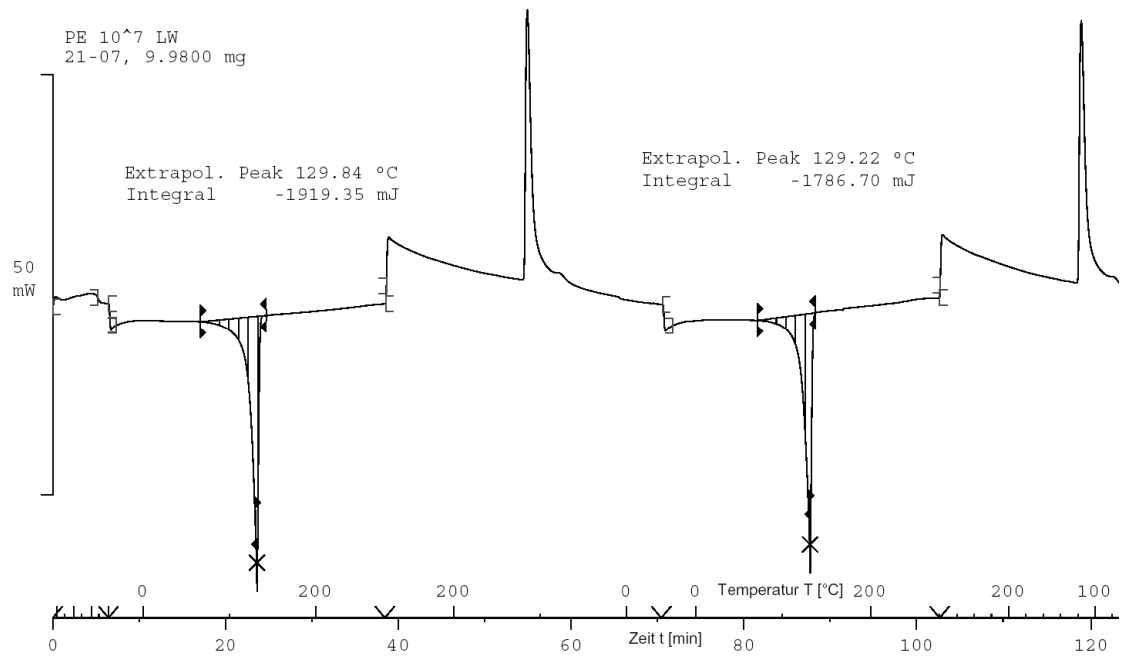


Abbildung 88 DSC-Referenzmessung von GG5-PE

Abbildung 89 DSC-Messung nach 10<sup>7</sup> Lastwechseln GG5-PETabelle 20 Auswertung der Schmelzenthalpie  $\Delta H$  für GG5-PE

Probenbezeichnung		1. Heizgang		2. Heizgang	
		Referenz	N = 10 <sup>7</sup>	Referenz	N = 10 <sup>7</sup>
Probennummer		26-07	21-07	26-07	21-07
Polymer		PE	PE	PE	PE
Schmelzenthalpie $\Delta H$ nach [KREVELEN-03]	[J/g]	293	293	293	293
kristalliner Anteil K	[%]	79,46	69,09	70,79	64,32
Einwaage m	[mg]	10,48	9,98	10,48	9,98
Messwert Enthalpie H	[mJ]	2318,02	1919,35	2065,03	1786,7
Massendifferenz m <sub>D</sub>	[m-%]	5,00	5,00	5,00	5,00





## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verhalten von Geokunststoffen unter zyklischen Beanspruchungen untersucht und eine Vorgehensweise für die Einschätzung des Ermüdungsverhaltens von Geokunststoffen entwickelt. Ausgehend von konventionellen Analyseverfahren für die Bestimmung der Dauerfestigkeit von Werkstoffen, die zwar für Metalle eine ausreichend genaue Prognose ermöglichen, aber das Verhalten von Polymeren nicht befriedigend beschreiben können wurde für die eigenen Betrachtungen auf die Morphologie der Polymere unter mechanischer Beanspruchung eingegangen.

Da die Analyse zugänglicher Quellen zu Untersuchungen von Geokunststoffen unter dynamischen und zyklischen Einwirkungen keine Rückschlüsse auf das Verhalten von Geokunststoffen unter hohen Lastwechselzahlen zuließ, wurde die Kenntnisstandsanalyse auf Anwendungen polymerer Bauteile unter diskontinuierlichen Beanspruchungen außerhalb der Geotechnik erweitert.

Daraus konnten neue Impulse für die eigenen Untersuchungen abgeleitet werden. Besonders hervorzuheben ist dabei das Modell von [HEUVEL-92] und [HEUVEL-92a], das zunächst von [VOSKAMP-01] und [VOSKAMP-06] für die Erklärung des Zugkraft-Dehnungsverhaltens und des Zeitstandverhaltens von PET-Materialien adaptiert wurde und ebenso für die Erläuterung der Ergebnisse der hier durchgeführten Versuche herangezogen werden konnte. Bei der Beurteilung von Materialien aus PET ist deshalb das 2. Maximum im Modulverlauf der Zugkraft-Dehnungslinien zu berücksichtigen. Es hat als eine Art Grenzwert entscheidenden Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit von derartigen Geokunststoffen.

Für Geokunststoffe aus Polyolefinen belegen die angestellten Überlegungen und die durchgeführten Untersuchungen einen Einfluss des viskosen Fließens und der Ausbildung einer Einschnürung kurz vor dem Versagen des Materials auf dessen Zugkraft-Dehnungsverhalten. Es gibt bei Geokunststoffen aus diesen Polymeren, wie bei Metallen, eine wahre Spannung im Material, die über der in den Zugversuchen ermittelten Nennspannung liegt. Deshalb ist es erforderlich die Zugkraftbeanspruchung dieser Geokunststoffe auf den Bereich des gleichmäßigen Verlaufes der Zugkraft-Dehnungslinie zu beschränken. Wendepunkte und Sprünge im Verlauf der Zugkraft-Dehnungslinie weisen darauf hin, dass die beiden genannten Spannungen divergieren.

Die untersuchten Geokunststoffe wurden in hydraulischen Prüfraumen  $10^7$  Lastwechseln unterzogen. Ein Vergleich ihrer Restzugfestigkeit am Ende der Versuche mit der Zugfestigkeit des zugehörigen Referenzmaterials ließ Rückschlüsse auf die Auswirkungen der zyklischen Beanspruchungen zu und erlaubt die Berechnung des Abminderungsfaktors  $A_5$ . Für die untersuchten Materialien wurde unter den angewendeten Randbedingungen kein oder nur ein geringer Zugfestigkeitsabfall von weniger als 10 % der ursprünglichen Zugfestigkeit des Referenzmaterials ermittelt.

Die aufgezeichneten Hystereseschleifen während der zyklischen Versuche belegen für die Geokunststoffe aus PET einen ausgeprägten Trainingseffekt und eine deutliche Zunahme der Steifigkeit der Materialien mit steigender Anzahl der Lastwechsel. Dieser Effekt ist bei Polyolefinen kaum ausgeprägt.

Die Materialerwärmung während der Versuche war, bei der aufgetragenen Lastkombination mit einem dynamischen Verhältnis zwischen Unter- und Oberlast von 0,66 bei einer Frequenz von 10 Hz sowie der Berücksichtigung des Zeitstandverhaltens des jeweiligen Geokunststoffes über die Versuchsdauer, unkritisch.

Als essentiell wichtig bei der Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Geokunststoffen unter zyklischen Beanspruchungen haben sich neben der Feststellung mechanischer Kennwerte die Auswertung von IR-Spektren und DSC-Kurven erwiesen. Beide Verfahren spiegeln die gemessenen Veränderungen der Restzugfestigkeiten der Geokunststoffe nach den Versuchen wider. Wobei sich die Beurteilung unter Verwendung von IR-Spektren auf qualitative Aussagen beschränkt. Die Kombination mit DSC-Kurven erlaubt dann jedoch Aussagen zur Morphologie, insbesondere der *Kristallinität* der Polymere aus denen die Geokunststoffe hergestellt sind.

Abschließend bleibt zu sagen, dass die Geokunststoffe in den vorgestellten Versuchsreihen Beanspruchungen unterzogen wurden, der sie in der Praxis nicht ausgesetzt sind. Hier besteht die Gefahr, dass Einwirkungen auf die Geokunststoffe betrachtet werden, die zu einer Überdimensionierung führen. So lange es für den planenden Ingenieur keine Alternativen zu den Nachweisen der Grenzzustände der Tragfähigkeiten gibt und er nur mit erhöhtem Aufwand die Gebrauchstauglichkeit von

KBE-Konstruktionen nachweisen kann, ist dies allerdings eine akzeptable Möglichkeit um zeitlich veränderliche Einwirkungen zu berücksichtigen.

Erweiterte Ansätze zu einer realistischeren Ermittlung der Einwirkungen gibt es von [HEROLD-06], der die Dehnung in Geokunststoffen unter zyklischer Beanspruchung im eingebauten Zustand untersucht hat und zu dem gleichen dynamischen Verhältnis bei einem wesentlich geringeren Ausnutzungsgrad der Geokunststoffe kommt.

Sobald Einigkeit darüber besteht, auf welche Art und Weise die Kräfte aus dem Boden in die Geokunststoffbewehrungen eingetragen werden, sollten die hier vorgestellten In-Air-Versuche um Untersuchungen in Bodenkontakt ergänzt werden. Das ist zum einen für den Umfang der reinen zyklischen Beanspruchungen wichtig und zum anderen für die Abschätzung der äußeren Abrasion an den Geokunststoffen durch oszillierende Bodenteilchen.

Letztere dürfte nach dem derzeitigen Kenntnisstand, den auch die Veröffentlichungen von [GÖBEL-06] und [NIMMESGERN-01] widerspiegeln deutlich kleiner sein als die zu erwartenden Beschädigungen der Geokunststoffe durch Einbau und Verdichtung.



## 6 Conclusions and Recommendations

This work reports the effect of cyclic loads on geosynthetics and provides a procedure to assess the dynamic behaviour of such materials.

Conventional analytical methods to determine the endurance/fatigue limits of materials are proved to be reliable with sufficient accuracy for metals. However these methods do not reflect the behaviour of polymers in an acceptable manner. This work is focussed on the morphology of polymers under mechanical stress.

The analysis of available sources of tests regarding the use of geosynthetics under dynamic and cyclic loads does not allow conclusions on the behaviour of geosynthetics subjected to high cycle fatigue. Hence the analysis of the state of knowledge has been expanded to applications of polymers under cyclic loads beyond geotechnics.

The model of [HEUVEL-92] and [HEUVEL-92a], which has been adopted by [VOSKAMP-01] and [VOSKAMP-06] to explain the stress-strain-behaviour and the creep-rupture behaviour of PET materials, was applicable when compared with test results.

For the assessment of PET materials the 2<sup>nd</sup> maximum of the modulus curve is essential. The modulus curve is the 1<sup>st</sup> derivation of the stress-strain-curve. The 2<sup>nd</sup> maximum is as a kind limiting value and influencing factor on the failure probability of this kind of geosynthetics made of PET.

An effect of a tied up area and viscose yielding on the stress-strain-behaviour of materials out of polyolefin's has been confirmed with tests. It has to be divided between the actual stress and the numerical stress, which has been determined by tensile strength tests of these materials. Because the actual stress is higher than the numerical stress, the stress in the geosynthetics has to be limited to the area where the stress-strain-curve starts to defer. This is the point from where the two types of stress diverge from each other.

The investigated geosynthetics have been tested in a hydraulic test facility up to  $10^7$  load cycles. Conclusions on the effect of the cyclic loads on the geosynthetics have been drawn by comparing the residual strengths of the test samples after the cyclic loading to the original strength of the reference measurements. Using these two values a reduction factor can be calculated. The reduction of tensile strength of the

tested specimens related to its original reference tensile strength is very small and does not exceed 10 %.

The tracked hysteresis loops show a distinct training effect on geosynthetics made from PET. That goes along with an increase of their stiffness as the number of load cycles increases. This effect does not appear to be similar with polyolefin's.

The applied load combinations did not cause any critical warming of the test samples. That includes the chosen dynamic ratio between the lower and the upper stress of 0.66, the frequency of 10 Hz and the material specific creep-rupture reduction factor for the test period.

After conducting a series of tests it can be concluded that a judgement of the fatigue behaviour of geosynthetics shall include the use of IR-spectroscopy and Differential Scanning Calorimetry in addition to the determination of the mechanical properties. Both methods prove the tensile strength measurements. The IR-spectroscopy helps to quantify chemical changes of the materials. A combination of these results with the outcome of the Differential Scanning Calorimetry allows conclusions on the morphology, especially on the crystallinity of the polymers used to manufacture the geosynthetics.

Finally, it is noted that the tests stress on the geosynthetics was much higher than the practical demands on site. That may lead to an over dimensioning of reinforced structures. But it can be seen as a tolerable compromise to consider time dependent loads for designers as long as the limit state procedure is the standard and the serviceability can't be proven with acceptable efforts.

Extended formulations for a more realistic approach to identify the effect of cyclic loads are available from [HEROLD-06] and [HEROLD-07], who has measured the elongation of geosynthetics under cyclic loads in an embedded state. These tests and measurements have been resulted in the same dynamic ratio as used for the tests of this work but on a lower level of stress in the geosynthetics.

Once there is an acceptable theory of how the stress transfers from the loaded soil into the geosynthetic reinforcement, the in-air-tests of this work should be completed with in-soil-tests. This is important to realistically assess the cyclic stress in the geosynthetic layer. It will also help to determine the surface abrasion of the geosynthetics by oscillating soil particles.

---

Based on the recent state of knowledge, which is reflected in [GÖBEL-06] and [NIMMESGERN-01] as well, the expected surface abrasion is less than the installation damage.





## 7 Glossar

Die Thematik dieser Arbeit ist an der Schnittstelle zwischen dem Bau- und dem Chemieingenieurwesen angesiedelt. Da sie aber eigentlich für Bauingenieure geschrieben wurde, sind in diesem Abschnitt einige Begriffe aus dem Bereich der Polymertechnik zum besseren Verständnis kurz erläutert.

Die Definitionen sind eine Art Konglomerat aus [JAKUBKE-87], [LENK-89] und eigenem Wissensstand.

Begriffe, die in diesem Glossar näher erläutert werden, sind im laufenden Text *kursiv* geschrieben.

$\pi$ -Elektron                      verhält sich antisymmetrisch in einer Spiegelungsebene die die Verbindungsachse der beiden Bindungspartner enthält. Somit ist die Ladungsdichte eines  $\pi$ -Elektrons in dieser Ebene Null.

Aldehyd                            ist eine chemische Verbindung, für deren Entstehung einem Alkohol Wasserstoff entzogen wird.

Amorphe Bereiche                haben keine periodische Anordnung der Moleküle über einen größeren Bereich. Es gibt jedoch eine gewisse Regelmäßigkeit hinsichtlich Molekülordnung, die der kristallinen Bereiche desselben Stoffes ähnelt. Amorphe Bereiche sind isotrop.

Aromatizität                      ist ein Phänomen, bei dem bestimmte zyklisch konjugierte Systeme gegenüber vergleichbaren kettenförmigen (aliphatischen) Verbindungen auf Grund gleicher  $\pi$ -Elektronenzahl und deren günstigem Energieniveau besonders stabil sind.

---

Block-Copolymer	sind <i>Mischpolymere</i> , die im Gegensatz zu alternierenden oder statistischen Copolymeren aus längeren Sequenzen oder Blöcken eines jeden Monomers (z.B. A und B) bestehen. [COWIE-97] ~AAAABBBBAAAA~
Ester	entstehen aus anorganischen Säuren oder Carbonsäuren bzw. deren Derivaten und Alkoholen oder Phenolen.
freies Volumen	ist Ausdruck der unvollständigen Lagerung von Molekülketten in den amorphen Bereichen eines Polymers.
Homopolymer	sind Monomere, die als reaktive chemische Verbindung im Einzelzustand vorlagen und durch <i>Polymerisation</i> , <i>Polykondensation</i> bzw. Polyaddition zu Polymeren verkettet wurden.
Hydrolyse	Umsetzung einer chemischen Verbindung mit Wasser. Für Geokunststoffe ist insbesondere die Spaltung kovalenter Bindungen von Carbonsäureestern von PET durch Wasser relevant.
Isomerie	liegt vor, wenn zwei oder mehrere chemische Verbindungen sich in ihren chemisch-physikalischen Eigenschaften unterscheiden, jedoch die gleiche Bruttoformel und somit Molekülmasse besitzen aber verschiedene Strukturformeln aufweisen
Ketone	sind organische Verbindungen, die als funktionelle Gruppe die Ketogruppe =CO im Molekül enthalten.
Konjugierte Doppelbindungen	beschreiben Doppelbindungen zwischen zwei Kohlenstoffatomen, die durch eine Einfachbindung getrennt sind und eine typische Wechselwirkung zeigen.

---

Kristalline Bereiche/Kristallinität	Bereiche, deren Moleküle periodisch angeordnet sind. Kristalle entstehen aus einem Keim ( <i>Nukleierungsmittel</i> ) durch Wachstum.
Mesomorphe Moleküle	sind lang gestreckte, stab- oder lattenförmige Moleküle in organischen Verbindungen
Metastabile Struktur	ist ein Zustand von Kunststoffen, der vom thermodynamischen Gleichgewicht mit niedrigster Freier Enthalpie wegen fehlender Keimbildung einer stabileren Phase durch deren hohe Aktivierungsenergie abweicht.
Mischpolymer	entsteht durch das Mischen zweier oder mehrerer Polymere um bestimmte Eigenschaften zu vereinen. Meist bedingt durch die Thermodynamik ihrer Lösungen ist dies nur in einem beschränkten Umfang möglich, da die meisten Polymere beim Mischen keine homogenen, einphasigen Lösungen bilden.
Molmasse	Angabe der Stoffmenge einer Verbindung. Wegen der unterschiedlichen Kettenlängen der Moleküle eines hochmolekularen Polymers, kann nur eine Molmassenverteilung angegeben werden. Daraus ergeben sich unterschiedliche Mittelwerte. Dies sind eine zahlenmittlere Molmasse $M_n$ , eine gewichtsmittlere Molmasse $M_w$ und ein höherer Durchschnittswert $M_z$ . In der vorliegenden Arbeit wird $M_n$ verwendet. $M_n < M_w < M_z$
Monochromator	durch die Umlenkung von Licht auf ein Prisma oder Beugungsgitter können Wellen/Strahlen ihrer Frequenz nach ausgewählt werden.

---

Nukleierungsmittel	Keimbildner, der einigen Polymeren zugefügt werden kann, um deren Kristallisation durch das Bilden von wachstumsfähigen Kristallkeimen zu fördern oder zu beschleunigen.
Oxidation	ist die Abgabe von Elektronen durch Atome, Ionen oder Moleküle.
Polykondensation	ist eine chemische Reaktion durch die aus niedermolekularen Ausgangsverbindungen mit mindestens zwei reaktionsfähigen Gruppen (z.B. $-OH$ ; $-COOH$ ) unter Abspaltung eines niedermolekularen Reaktionsproduktes (z.B. $H_2O$ ) Makromoleküle gebildet werden.
Polymerisation	ist eine chemische Kettenreaktion bei der Moleküle niedermolekularer Verbindungen (Monomere) zu Makromolekülen (Polymeren) verbunden werden. Dabei bleiben die prozentualen Anteile der Elemente in den Monomeren auch im Polymer erhalten. Es spalten sich also weder Reaktionsprodukte ab noch werden Molekülgruppen umgelagert.
Taktizität	gibt die Anordnungsform der Substituenten an.
Teilkristalline Polymere	haben einen in chemischer und geometrischer Sicht regelmäßigen Aufbau, der es ihnen ermöglicht in bestimmten Bereichen Kristallite auszubilden.
Veresterung	ist eine chemische Reaktion zwischen einem Alkohol und einer Säure unter Bildung eines <i>Esters</i> .

## 8 Quellenverzeichnis

### 8.1 Literaturverzeichnis

- [ADAMA-03] ADAMA Engineering Inc.: ReSlope 4.0. Software, Version 4.0. Newark: 2003
- [ASHMAWY-96] Ashmawy, A.K.; Bourdeau, P.L.: Response of a Woven and a Nonwoven Geotextile to Monotonic and Cycle Simple Tension. Geosynthetics International, Vol. 3(1996), No. 4, pp. 493-515
- [AUERSCH-05] Auersch, L.; Rücker, W.: Dynamic Loads of Railway Traffic. Proceedings of the ECI International Conference The Use of Geosynthetics in Soil Reinforcement in Dresden/Germany 5.-8. September 2004. Essen: VGE, 2005
- [AYDOGMUS-06a] Aydogmus, T.: Beitrag zum Interaktionsverhalten von Geokunststoff und Lockergestein. Dissertation. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2006-6. Freiberg: 2006
- [BANJAC-98] Banjac, R.: Dimensionierung von Oberbauten von Verkehrsflächen unter Einsatz von Geokunststoffen zur Stabilisierung des Untergrundes. Diplomarbeit an der Fachhochschule Frankfurt/Main, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Geotechnik. Frankfurt: 1998
- [BATHURST-94] Bathurst, R. J.; Cai, Z.: In-Isolation Cyclic Load-Extension Behavior of Two Geogrids. Geosynthetics International, Vol. 1(1994), No. 1, pp. 1-19

- [BLUM-93] Blum, R.: Auswirkungen dynamischer Belastungen bei einem geogitterbewehrten Steilwall und einem Regeldamm. Forschungsvorhaben DIBt IV 1-5 660/92. Stuttgart: FMPA, 1993
- [BOSMAN-01] Bosman, R.: Test Method for Determining the Assured Residual Life Span (ARELIS) of Polyester Mooring Ropes. IEEE International Symposium 2001
- [BRÄU-03] Bräu, G.; Lehmann, E.: Auswirkungen von Bewehrungseinlagen in den unteren Teilen eines Dammes im Hinblick auf die Beanspruchung des Untergrundes durch Verkehrslasten beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FE 05.124/2000/IRB. München: TUM, 2003
- [COWIE-97] Cowie, J. M. G.: Chemie und Physik der synthetischen Polymere. Aus dem Englischen übersetzt. Braunschweig: Vieweg, 1997
- [DGGT-02] DGGT (Hrsg.): Empfehlungen des Arbeitskreises Baugrunderdynamik. 1. Auflage, Stand: Dezember 2002. Berlin: Grundbauinstitut der TU Berlin, 2002
- [DGGT-07] DGGT (Hrsg.): Überarbeitete Entwürfe der EBGEO auf der Homepage der Fachsektion „Kunststoffe in der Geotechnik“. [www.gb.bv.tum/fachsektion/fs-kgeo.htm](http://www.gb.bv.tum/fachsektion/fs-kgeo.htm); laufende Aktualisierungen, 2007
- [DGGT-97] DGGT (Hrsg.): Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO. Berlin: Ernst & Sohn, 1997

- [DRATWA-98] Dratwa, H.; Grugel, S.: Einsatzmöglichkeiten von Geokunststoffen zur Verbesserung der Tragfähigkeit des Untergrundes im Straßenbau. Diplomarbeit an der Fachhochschule Frankfurt/Main, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Geotechnik. Frankfurt: 1998
- [EHRENSTEIN-03] Ehrenstein, G.; Riedel, G.; Trawiel, P.: Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen. 2. Auflage. München: Hanser, 2003
- [ELKINK-07] Elkink, F.: persönliche Mitteilung vom 21.05.2007
- [FLESCHE-93] Flesch, R.: Baudynamik praxisgerecht. 1. Band: Berechnungsgrundlagen. Berlin: Bauverlag, 1993
- [FRIEDRICH-03] Friedrich, K.; Schmid, G.: Dynamic Behavior of Railway Track Systems Analyzed in Frequency Domain. In Popp, K.; Schiehlen, W. (eds.): System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, tracks and subgrade. Berlin: Springer, 2003
- [GERSTBERGER-03] Gerstberger, U.; Knothe, K.; Wu, Y.: Combined Modelling of Discretely Supported Track Models and Subgrade Models – Vertical and Lateral Dynamics in Popp, K.; Schiehlen, W. (Hrsg.): System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade. Heidelberg: Springer, 2003
- [GÖBEL-04] Göbel, C.; Lieberenz, K.: Handbuch Erdbauwerke der Bahnen. 1. Auflage. Hamburg: Eurailpress, 2004
- [GÖBEL-06] Göbel, C.; Großmann, S.: Geokunststoffbewehrte Erde unter dynamischer Belastung – Weiterentwicklung des Systems. Tagungsband zur Bautex 2006 in Chemnitz

- [GOTSCHOL-02] Gotschol, A.: Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch dynamischer Beanspruchung. Dissertation, Schriftenreihe Universität Kassel Heft 12. Kassel, 2002
- [GÜNZLER-03] Günzler, H.; Böck, H.: IR – Spektroskopie – Eine Einführung. 4. vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage. Weinheim: Wiley-VCH, 2003
- [HARTING-93] Harting, U.: Kriechverhalten von Geogittern unter dynamischer Beanspruchung. Diplomarbeit, Fachhochschule Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen. Münster: 1993
- [HARTWIG-05] Hartwig, K.-H.: Volkswirtschaftliche Effekte unterlassener Infrastrukturinvestitionen. Vortrag zur Veranstaltung: „Infrastrukturausbau schafft Wachstum und Standortqualität“, Berlin, 31.05.2005 Quelle: [www.promobilitaet.de](http://www.promobilitaet.de)
- [HATAKEYAMA-99] Hatakeyama, T.; Quinn, F. X.: Thermal Analysis: Fundamentals and Applications to Polymer Science. 2<sup>nd</sup> edition. Chichester: John Wiley & Sons, 1999
- [HELLERICH-01] Hellerich, W.; Harsch, G.; Haenle, S.; Werkstoff-Führer Kunststoffe – Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte. 8. völlig überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2001
- [HEMMINGER-89] Hemminger, W. F.; Cammenga, H. K.: Methoden der Thermischen Analyse. Anleitungen für die chemische Laboratoriumspaxis Band XXIV. Berlin: Springer, 1989



- [HEROLD-05] Herold, A.; Tamáskovis, N.: Bestimmung von dynamischen Spannungen in Kunststoff – Bewehrte – Erde – Konstruktionen unter Zuhilfenahme von Kegelmodellen. Veröffentlichungen der Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2005-1, S.201-228, Freiberg: 2005
- [HEROLD-06] Herold, A.; Pachomow, D.; Murray, H.; Boones, B.: Messung von statischen und dynamischen Dehnungen in KBE-kunststoffebwehrte-Erde-Konstruktionen mit faseroptischen Sensoren – Praxisbeispiele / Ergebnisse / numerische Simulationen und Rückrechnungen .Fachseminar: Messen in der Geotechnik 2006, 23./24. Februar 2006 in Braunschweig
- [HEROLD-07] Herold, A.: 10 Jahre Verformungsbeobachtungen an KBE-Bauwerken – Ist die Dehnsteifigkeit der Geokunststoffe der Schlüssel zur korrekten Prognose des Verformungsverhaltens von KBE-Stützbauwerken? Geotechnik 30 (2007) Nr. 2, S. 79-86
- [HEUVEL-92] Heuvel, C. J. M. v. d.; Heuvel, H. M.; Faassen, W. A.; Veurink, J.; Lukas, L. J.: Molekular changes of PET yarns during stretching measured with rheo-optical infrared spectroscopy and other techniques. AKZO Research Laboratories Arnhem, Unpublished report. Arnhem: 1992
- [HEUVEL-92a] Heuvel, H. M.; Lucas, L. J.; Heuvel, C. J. M. v. d.; Weijer A. P. d.: Experimental Relations between Physical Structure and Mechanical Properties of a Huge Number of Drawn Poly (ethylene terephthalate) Yarns. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 45 (1992), pp 1649 – 1660

- [HORNBOGEN-02] Hornbogen, E.: Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen. 7. neubearbeitete und ergänzte Auflage. Berlin: Springer, 2002
- [INGOLD-98] Ingold, T. S.: Improvement of Undrained Plane Strain Static Bearing Capacity. Technical note, 1998
- [JAKUBKE-87] Jakubke, H.-D.; Jeschkeit, H. (Hrsg.): Brockhaus abc Chemie. 2 Bände. 5. überarbeitete Auflage. Leipzig: Brockhaus, 1987
- [JEKER-02] Jeker, R. E. (Hrsg.): Gotthard – Basistunnel, Der längste Tunnel der Welt. 1. Band – Die Zukunft beginnt. Zürich: Werd, 2002
- [JONES-02] Jones, C. F. P. (ed.): Guide to reinforced fill structure and slope design. Geoguide 6 – Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department. Hong Kong: 2002
- [KATZENBACH-05] Katzenbach, R.; Ittershagen, M.; Werner, A.: Optimierte Ertüchtigung von Verkehrswegen auf gering tragfähigem Baugrund. Veröffentlichungen der Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin, Heft Nr. 38 – Vorträge zum 1. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2005, S. 51-65
- [KAUSCH-05] Kausch-Blecken von Schmeling, H.-H.: The role of chain length and conformation in stress-transmission and fracture of thermoplastic polymers. Физика твердого тела, 2005, том 47, вып. 5, п. 906-913
- [KENSCH-96] Kensche, C.W. (ed.): Fatigue of materials and components to wind turbine rotor blades. EUR 16684, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996

- [KENSCHKE-96a] Kensche, C.: Eine Methode zur Lebensdauervorhersage von Faserverbundstoffen in Rotorblättern. Tagungsband DEWEK 1996, S. 187-190
- [KETCHARD-01] Ketchard, K.; Wu, J.T.H.: Performance Test for Geosynthetic-Reinforced Soil Including Effects of Preloading. FHWA Report Reference: FHWA-RD-01-018. Springfield: National Technical Information Service, 2001
- [KLAPPERICH-05] Klapperich, H.; Cazuffi, D.; Koerner, R. M.; Vollrath, L.: The Use of Geosynthetics in Soil Reinforcement. Proceedings of the ECI International Conference in Dresden/Germany 5.-8. September 2004. Essen: VGE, 2005
- [KLAPPERICH-06] Klapperich, H.; Aydogmus, T.; Alexiew, D.: Evaluation of interaction properties of PVA geogrids in stabilized cohesive soils: Shear- and pullout tests. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Yokohama/Japan 18.-22. September 2006, pp. 1427-1430. Rotterdam: Millpress, 2006
- [KONIETZKY-04] Konietzky, H.; Kamp, L. te; Groeger, T.; Jenner, C.: Use of DEM to model the interlocking effect of geogrids under static and cyclic loading. In: Shimuzi, Y. (ed.): Numerical Modelling in Micromechanics via Particle Methods, pp. 3-12. Rotterdam: Balkema, 2004
- [KONIETZKY-04a] Kongkitul, W.; Hirakawa, D.; Tatsuoka, F.; Uchimara, T.: Viscous deformation of geosynthetic reinforcement under cyclic loading conditions and its model simulation. Geosynthetics international Vol. 11(2004), No. 2, pp. 73-99
- [KREVELEN-03] Krevelen, D. W. van: Properties of Polymers. 3<sup>rd</sup> completely revised edition. Amsterdam: Elsevier, 2003

- [KÜHLMAYER-01] Kühlmeyer, M.: Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure mit Praxisbeispielen. Berlin: Springer, 2001
- [LENK-89] Lenk, R. (Hrsg.): Brockhaus abc Physik. 2 Bände, 2. verbesserte Auflage. Leipzig: Brockhaus, 1989
- [LESHCHINSKY-97] Leshchinsky, D.: Design Procedure for Geosynthetic Reinforced Steep Slopes“ US Army Corps of Engineers, Technical Report REMR-GT-23, Vicksburg: 1997
- [LIEBERENZ-03] Lieberenz, K.; Weisemann, U.; Haase, C.: Untersuchungen zur Wirkungsweise und Bemessung von geokunststoffbewehrten Schichtsystemen über Weichschichten bei Eisenbahnstrecken. Sonderheft 2005 der Geotechnik zur 9. Informations- und Vortragsstagung über Kunststoffe in der Geotechnik in München, S. 173-176
- [LIEBERENZ-07] Lieberenz, K.: Persönliche Mitteilung vom 07. März 2007 in Dresden
- [LIU-06] Liu, H.; Ling, H. I.: Modeling cyclic behavior of geosynthetics using mathematical functions: Masing rule and bounding surface plasticity. Geosynthetics International Vol. 13(2006), No. 6, pp. 234-245
- [MARTINI-03] Martini, J.; Küster, V.: DA – Flächenerweiterung im Mühlenberger Loch, Einsatz von Geotextilien zur Realisierung einer Landgewinnung auf geringtragfähigen organischen Wattböden in kürzester Zeit. Sonderheft 2003 der Geotechnik zur 8. Informations- und Vortragsstagung über Kunststoffe in der Geotechnik in München, S. 19-25
- [McGOWN-84] McGown, A.; Andrawes, K. Z.; Yeo, K. C.: The load-strain-time behaviour of Tensar grids. In Polymer grid reinforcement. London: Telford, 1984, pp 11 – 17

- [MIN-95] Min, Y.; Leshinsky, D.; Ling, H.; Kaliakin, V. N.: Effects of Sustained and Repeated Tensile Loads on Geogrid Embedded in Sand. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 18 No. 2, June 1995, pp. 204-225
- [MORO-02] Moro, M.: Skript für Vortrag zum Thema Polyester. Stand 11.03.2002. Obernburg: 2002, unveröffentlicht
- [NERNHEIM-05] Nernheim, A.: Interaktionsverhalten von Geokunststoff und Erdstoff bei statischen und zyklischen Beanspruchungen. Dissertation, Schriftenreihe Geotechnik und Markscheidewesen Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der Technischen Universität Clausthal, Heft 11/2005. Clausthal: TU Clausthal, 2005
- [NIMMESGERN-01] Nimmesgern, M.; Lieberenz, K.: Geogitterbewehrter Bahndamm – Ausgrabungen nach 10 - jähriger Beanspruchung. Sonderheft 2001 der Geotechnik zur 7. Informations- und Vortragstagung über Kunststoffe in der Geotechnik in München, S. 173-176
- [OUDET-87] Oudet, C.; Bunsell, A.R.: Effects of structure on the tensile creep and fatigue properties of polyester fibres. *Journal of Material Science* 22(1987) pp. 4292-4298
- [PERKINS-04] Perkins, S.; Christopher, B. R.; Cuelho, E. L.; Eiksund, G. R.; Hoff, I.; Schwartz, C. W.; Svanø, G.; Watn, A.: Development of Design Methods for Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements. Final report, FHWA Report: DTFH61-01-X-00068. Springfield: National Technical Information Service, 2004
- [POCANSCHI-03] Pocanschi, A.; Phocas, M.C.: Kräfte in Bewegung – Die Techniken des erdbebensicheren Bauens. Wiesbaden: Teubner, 2003

- [RETZLAFF-05] Retzlaff, J.: Geokunststoffbewehrter Bahndamm über Pfählen. Tagungsband zum 1. Arabischen Geokunststofftag in Damaskus/Syrien am 13. November 2005
- [RETZLAFF-06] Retzlaff, J.; Turczynski, U. Schwerdt, S.: The effect of geogrids under unbound sub base layers. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Yokohama/Japan 18.-22. September 2006, pp. 825-830. Rotterdam: Millpress, 2006
- [REUTER-03] Reuter, E.; Markwardt, N.: Geosynthetische Tondichtungsbahnen – ideale Dichtungselemente für Deponie- und Wasserbau? Sonderheft 2003 der Geotechnik zur 8. Informations- und Vortragstagung über Kunststoffe in der Geotechnik in München, S. 75-80
- [RIECHLE-00] Riechle, M.; Simmchen, E.: Grundlagen der Werkstofftechnik. 2. aktualisierte Auflage. Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2000
- [ROCHHOLZ-05] Müller-Rochholz, J. (Hrsg.): Geokunststoffe im Erd- und Straßenbau. München: Werner, 2005
- [ROCHHOLZ-98] Müller-Rochholz, J.: Dynamisches Verhalten von HDPE-Bewehrungsgittern. Geotechnik 21 (1998) Nr. 4, S. 310-313
- [RUEGGER-03] Ruegger, R.; Hufenus, R. (Hrsg.) Bauen mit Geokunststoffen – Ein Handbuch für den Geokunststoff – Anwender. Schweizerischer Verband für Geokunststoffe. St. Gallen: Zollikofer, 2003
- [SAATHOFF-03] Saathoff, F.: Geosynthetics in geotechnical and hydraulic engineering. In: Geotechnical Engineering Handbook, Volume 2: Procedures, S. 507-597. Berlin: Ernst & Sohn, 2003

- [SAECHTLING-01] Saechtling, H.; Oberbach, K.: Kunststoff-Taschenbuch. 28.Ausgabe. München: Hanser, 2001
- [SCHWARZ-05] Schwarz, O.; Ebeling, F.-W.: Kunststoffkunde. 8. überarbeitete Auflage. Würzburg: Vogel, 2005
- [SHERBY-56] Sherby, O. D. and Dorn, J. E.: Anelastic creep of polymethyl-methacrylate. Journal Mechanics and Physics of Solids (1956) p. 145
- [SOCRATES-01] Socrates, G.: Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies – Tables and Charts. 3<sup>rd</sup> edition. Chichester: John Wiley & Sons, 2001
- [STUDER-97] Studer, J. A.; Koller, M. G.: Bodendynamik – Grundlagen, Kennziffern, Probleme. 2. völlig neubearbeitete Auflage. Berlin: Springer, 1991
- [SÜRKEN-94] Sürken, A.; Marth, J. C.: Dynamische Beanspruchung von Geokunststoffen. Diplomarbeit, Fachhochschule Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen. Münster: 1994
- [TURCZYNSKI-05] Turczynski, U.; Schwerdt, S.; Mannsbart, G.: Die Bemessung von geokunststoffbewehrten Tragschichtenstabilisierungen unter Verwendung von Tragfähigkeitsmodellen. Tagungsband der 5. Österreichischen Geotechnik Konferenz in Wien, 21./22. Februar 2005, S. 203-218
- [UNI STUTTGART-05] Universität Stuttgart: Analyse von Seiltrieben. Website des Instituts für Fördertechnik und Logistik, [www.uni-stuttgart.de/ift](http://www.uni-stuttgart.de/ift), Stand 08.03.2004

- [VÈVE-87] Vève, J.C.; Bunsell, A.R.; Baillie, C.; Hagege, R.: Fatigue Failure and Associated Molecular Changes in Polyester Fibers under Cyclic Loading. *Kautschuk + Gummi Kunststoffe*, Vol. 40 (1987), No. 10, pp. 941-944
- [VOSKAMP-01] Voskamp, W.; Vliet, F. v.; Retzlaff, J.: Residual strength of PET after more than 12 years creep loading. *Kyushu 2001*
- [VOSKAMP-06] Voskamp, J.; Retzlaff, J.: Swing up in creep curves at high loadings of PET bars – further proof of the molecular chain change model. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Yokohama/Japan 18.-22. September 2006*, pp. 1599-1604. Rotterdam: Millpress, 2006
- [WEIBULL-61] Weibull, W.: *Fatigue Testing and Analysis of Results*. Oxford: Pergamon, 1961
- [WEISSMANTEL-82] Weißmantel, C.; Lenk, R.; Forker, W.; Linke, D.: *Kleine Enzyklopädie - Struktur der Materie*. Leipzig: Bibliographisches Institut, 1982
- [ZANZINGER-06] Zanzinger, H.: Geogrids under dynamic loading in railway structures: Where are the limits? *Proceedings of Railway Foundations - RailFound 06, 11<sup>th</sup> – 13<sup>th</sup> September 2006 in Birmingham*, pp. 376-384
- [ZILCH-02] Zilch, K.; Diederichs, C.J.; Katzenbach, R. (Hrsg.): *Handbuch für Bauingenieure*. Berlin: Springer, 2002



## 8.2 Normen und Vorschriften

- [ASTM D 4595] Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide Width Method. American Society for Testing and Materials. Philadelphia: 2005
- [DIN 1054] Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Ausgabe 01-2005. Berlin: Beuth, 2005
- [DIN 53765] Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren – Thermische Analyse, Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK). Ausgabe 03-1994. Berlin: Beuth 1994
- [DIN EN ISO 10319] Geotextilien – Zugversuch am breiten Streifen. Ausgabe 06/1996. Berlin: Beuth, 1996
- [DIN EN ISO 11357] Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen. Ausgabe 01-1997. Berlin: Beuth, 1997
- [DIN FB 101] Einwirkungen auf Brücken. DIN-Fachbericht, Ausgabe 03-2003. Berlin: Beuth, 2003
- [FGSV-535] FGSV: Merkblatt über die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Straßenbaus M Geok E mit Checklisten (C Geok E). Köln: FGSV, 2005
- [ISO 554] Standard atmospheres for conditioning and/or testing – Specifications. First edition. International Organisation for Standardisation, 1976
- [Ril 413] Deutsche Bahn AG: Richtlinie 413 – Bahnbetriebsinfrastruktur gestalten, Stand 08-2002

[Ril 836]

Deutsche Bahn AG: Richtlinie 836 – Erdbauwerke planen,  
bauen und instandhalten, Stand 09-2003

## 9 Abkürzungsverzeichnis

Anm.	Anmerkung
BKT	Bemessungs-Konzept Tragfähigkeiten
CBR	California Bearing Ratio
Db.	Dichtungsbahn
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EBGEO	Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen der DGGT
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Copolymer
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FHWA	Federal Highway Administration
HZK	Höchstzugkraft
IR	Infrarot
OK	Oberkante
PA6	Polyamid 6
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte
PET	Polyethylenterephthalat
PID	Regelung über Proportionale, Integrale und Differentiale Glieder
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PP-H	Polypropylen ( <i>Homopolymer</i> )
PPTA	Poly-p-Phenylenterephthalamid
PVAC	Polyvinylacetat
PVAL	Polyvinylalkohol
SOK	Schienenoberkante
U.S.	United States
UHMWPE	Ultra High Molecular Weight Polyethylene



## 10 Verzeichnis der Variablen

### 10.1 Große lateinische Buchstaben

$\dot{Q}$	Wärmestrom	[W], [W/g]
$A_1$	Abminderungsfaktor für das Zeitstandverhalten	[-]
$A_5$	Abminderungsfaktor für zeitlich veränderliche Einwirkungen	[-]
$A_{hys}$	Fläche der Hystereseschleife	[N%]
$A_i$	Abminderungsfaktor für die Einwirkung i	[-]
$A_{IR}$	Absorption im Sinne der IR Spektroskopie	[%]
$A_{ur}$	Fläche der Hystereseschleife nach [BATHURST-94]	[-]
$B_K$	Zeitstandbruchkonstante auf der Basis von $R_{B,k0}$ /Dekade	[%]
CBR	California Bearing Ratio	[%]
D	Schadensumfang	[-]; [%]
$D_{IR}$	Durchlässigkeit im Sinne der IR – Spektroskopie	[%]
$E_0$	höchster bekannter E-Modul eines Materials	[N/mm <sup>2</sup> ]
$E_n$	zeit-, temperatur- und dehnungsabhängiger E-Modul eines Materials	[N/mm <sup>2</sup> ]
F	Zugkraft	[N]
G	Schubmodul	[MN/m <sup>2</sup> ]
H	Enthalpie	[J], [J/g]
$J_s$	Differenziertes Steifigkeitsmodul eines Materials als 1. Ableitung seiner Zugkraft-Dehnungslinie	[N/%]
K	Grad der Kristallinität	[%]
M	Zahlenmittel der <i>Molmasse</i>	[g/mol]
N	Anzahl der Lastwechsel	[-]
$N_B$	Ertragbare Anzahl der Belastungen	[-]
$N_i$	Anzahl der möglichen Lastwechsel bis zur Dehnung $\varepsilon_i$	[-]
R	Dynamisches Verhältnis	[-]
$R_{B,k0}$	charakteristische Kurzzeitzugfestigkeit (Höchstzugkraft) des Bewehrungselements zum Zeitpunkt 0	[N]
$R_{B,k1}$	charakteristische Zugfestigkeit des Bewehrungselements zum Zeitpunkt 1 (hier Versuchsdauer)	[N]
$R_{B,k5}$	Restzugfestigkeit nach zeitlich veränderlichen Einwirkungen	[N]
$R_{B,ki}$	Restzugfestigkeit nach der Einwirkung i	[N]

$R_{B,k0,5}$	Kurzzeitzugfestigkeit unter Berücksichtigung des 5 %- Quantils	[N]
$R_{GL}$	Gleitreibungswiderstand	[kN/m <sup>2</sup> ]
T	Temperatur	[°C], [K]
$T_g$	Glasübergangstemperatur	[°C], [K]
$T_O$	Oberflächentemperatur	[°C]
$T_{pm}$	Schmelztemperatur	[°C]
W	Energie	[J]

## 10.2 Kleine lateinische Buchstaben

$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c_0 = 2,99793 \cdot 10^{10}$ cm/s	[cm/s]
$c_n$	Lichtgeschwindigkeit in einem bestimmten Medium	[cm/s]
$c_p$	spezifische Wärmekapazität	[J/g°C], [J/gK]
f	Frequenz	[Hz]
k	Summe der Laststufen	[-]
m	Einwaage	[g]
$m_D$	Massendifferenz	[m-%], [g]
n	Anzahl	[-]
$n_B$	Anzahl der durch B gekennzeichneten Belastungen	[-]
$n_i$	Anzahl der Lastwechsel im Spektrum bei einer Dehnung $\varepsilon_i$	[-]
$n_x$	Brechungsindex eines Mediums – für Luft $n = 1,00027$	[-]
t	Zeit	[s]
$t_B$	Zeit bis zum Bruch	[s]
$t_L$	Dauer der Lastweeinwirkung	[s]
$v_h$	Heizrate	[K/min]
$v_k$	Kühlrate	[K/min]

## 10.3 Große griechische Buchstaben

$\Delta \dot{Q}$	Wärmestromänderung	[W], [W/g]
$\Delta H$	Enthalpieänderung	[J], [J/g]
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	[°C], [K]
$\Delta \varepsilon^*$	Differenz der Dehnungsänderungen aus statischen und zyklischen Versuchen	[%]

$\theta$	Lastausbreitungswinkel	[°]
$\Sigma$	Summe	[-]
$\Phi$	Relative Luftfeuchtigkeit	[%]

#### 10.4 Kleine griechische Buchstaben

$\tilde{\nu}$	Frequenz des Lichtvektors	[Hz], [s <sup>-1</sup> ]
$\mu$	Poisson-Zahl	[-]
$\beta$	Böschungswinkel	[°]
$\gamma$	Wichte	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	Dehnung	[%]
$\varepsilon_{B,k0}$	Dehnung bei Höchstzugkraft (Kurzzeitzugfestigkeit)	[%]
$\varepsilon_{dyn,m}$	Dehnung bei Mittelspannung	[%]
$\varepsilon_{dyn,o}$	Dehnung bei Oberspannung	[%]
$\varepsilon_{dyn,u}$	Dehnung bei Unterspannung	[%]
$\varepsilon_i$	Dehnung bis zu einem bestimmten Ereignis	[%]
$\varepsilon_q$	Querkontraktion	[%]
$\varepsilon_{ur}$	Dehnungen des unloaded/reloaded Zyklus nach [BATHURST-94]	[%]
$\lambda$	Verhältnis Reibungswinkel Boden/Geokunststoff zum Winkel der inneren Reibung des Bodens ohne Geokunststoff	[-]
$\lambda_{IR}$	Wellenlänge der Infrarotstrahlung	[m]
$\lambda_R$	Wellenlänge der Rayleigh-/R-Wellen	[m]
$\rho$	Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]; [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Normalspannung	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma$	Zugspannung	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_a$	Spannungsamplitude	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_A$	Dauerfestigkeitsamplitude aus Wöhlerkurve	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{dyn,m}$	Mittelspannung	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{dyn,o}$	Oberspannung	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{dyn,u}$	Unterspannung	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\varphi'$	charakteristischer Wert des inneren Reibungswinkels eines Bodens	[°]