

Anhang zu:

**Bindemitteldesign
für Asphaltstraßen –**

**Definition eines
chemisch-rheologischen
Anforderungsprofils**

von

Dietmar Aloys Stephan
Sandra Weigel

Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie
Institut für Bauingenieurwesen
Technische Universität Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbautechnik Heft S 123 – Anhang

bast

Im Auftrag des
Bundesministers für Verkehr,
Bau- und Stadtentwicklung

Forschungsbericht FE-Nr. 07.0249/2011/BRB

**Bindemitteldesign für Asphaltstraßen durch Definition eines chemisch-rheologischen
Anforderungsprofils**

ANLAGE 1

Projektleiter: Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Aloys Stephan

Mitarbeiterin: Sandra Weigel, M.Sc.

Fachgebiet Baustoffe und Bauchemie
Sekretariat TIB1-B4
Gustav-Meyer-Allee 25 (Gebäude 13b)
13355 Berlin
Institut für Bauingenieurwesen
Technische Universität Berlin



Fachgebietsleiter: Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Aloys Stephan

30. November 2015

Inhalt

1. Einleitung	2
2. Ergebnisse der Untersuchungen.....	2
2.1. Chemische Bitumenanalysen.....	2
2.2. Konventionelle Prüfverfahren...	14
2.3. Performance-orientierte Prüfverfahren	15
2.4. Alterungsverfahren - Masseänderung infolge der RFT- Alterung.....	28
2.5. Untersuchungen der Gesteine .	28
2.6. Untersuchungen zum Haftverhalten.....	30

1. Einleitung

In dieser Anlage zum Schlussbericht des Projekts FE-Nr. 07.0249/2011/BRB *Bindemitteldesign für Asphaltstraßen durch Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils* sind die Prüfergebnisse der einzelnen durchgeführten Untersuchungsmethoden zusammengefasst.

2. Ergebnisse der Untersuchungen

Im Folgenden sind die gewonnenen Ergebnisse der unterschiedlichen Untersuchungen am Bitumen, den Gesteinskörnungen und den Bitumen-Gesteins-Gemischen zusammenfassend dargestellt. Bezüglich der unterschiedlichen Alterungsstufen werden der nicht gealterte Zustand durch *oA*, der kurzzeitgealterte Zustand durch *RFT* und der langzeitgealterte Zustand durch *RFT+PAV* abgekürzt.

2.1. Chemische Bitumenanalysen

CHNS-Elementaranalyse

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Elementaranalyse der unterschiedlichen Alterungszustände zusammengefasst.

Tabelle 1 Ergebnisse der CHNS-Analyse

	Kohlenstoff C [M.-%]	Wasserstoff H [M.-%]	Stickstoff N [M.-%]	Schwefel S [M.-%]	Summe CHNS [M.-%]
Nicht gealterter Zustand oA					
20/30 A	86,85	10,50	0,67	2,29	100,32
20/30 E	82,82	9,48	0,72	2,81	95,83
30/45 A	83,30	9,83	0,69	2,48	96,29
30/45 C	87,41	10,55	0,65	2,67	101,28
30/45 E	83,09	9,87	0,57	4,21	97,74
50/70 A	82,70	9,73	0,64	1,97	95,04
50/70 B	87,23	10,70	0,68	2,21	100,81
50/70 D	86,77	10,79	0,51	3,59	101,65
70/100 A	87,10	10,71	0,60	2,34	100,74
70/100 B	86,17	11,50	0,60	0,63	98,90
70/100 D	86,31	10,55	0,38	4,74	101,98
F	82,55	10,49	0,96	1,89	95,88
RFT-gealterter Zustand RFT					
20/30 A	86,12	10,53	0,54	1,57	98,76
20/30 E	86,93	10,68	0,76	2,04	100,41
30/45 A	86,33	10,56	0,45	1,45	98,77
30/45 C	87,00	10,82	0,74	1,76	100,32
30/45 E	85,63	10,74	0,60	3,36	100,33
50/70 A	85,69	10,66	0,48	1,25	98,08
50/70 B	86,26	10,83	0,72	1,70	99,51
50/70 D	86,27	11,12	0,64	2,41	100,44
70/100 A	86,49	10,70	0,49	1,30	98,98
70/100 B	86,12	11,04	0,76	1,54	99,98
70/100 D	85,80	10,90	0,52	3,33	100,55
F	83,69	10,33	1,18	3,26	98,47
Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV					
20/30 A	85,43	10,37	0,68	1,78	98,25
20/30 E	85,53	10,44	0,58	2,08	98,63
30/45 A	85,34	10,51	0,65	1,87	98,36
30/45 C	85,94	10,37	0,71	1,58	98,59
30/45 E	84,37	10,58	0,41	3,50	98,85
50/70 A	85,36	10,62	0,61	1,56	98,15
50/70 B	86,00	10,71	0,62	1,64	98,97
50/70 D	85,19	10,72	0,56	2,62	99,09
70/100 A	85,53	10,71	0,60	1,69	98,53
70/100 B	85,84	10,77	0,64	1,49	98,74
70/100 D	84,70	10,59	0,47	3,38	99,13
F	82,53	10,04	0,87	3,53	96,97

Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse sind in Tabelle 2 zusammengefasst, wobei diese lediglich im nicht gealterten Zustand bestimmt wurden.

Tabelle 2 Ergebnisse der RFA-Analyse an den Bitumenproben

	Vanadium V [ppm]	Nickel Ni [ppm]	Calcium Ca [ppm]	Schwefel S [M.-%]	Titan Ti [ppm]	Kupfer Cu [ppm]	Zink Zn [ppm]
20/30 A	665	91	98	3,53	1	4	1
20/30 E	287	79	51	3,70	1	4	1
30/45 A	611	84	100	3,45	1	4	1
30/45 C	270	80	67	3,27	1	4	28
30/45 E	310	74	65	5,25	1	4	1
50/70 A	579	79	102	3,40	1	4	1
50/70 B	250	71	40	3,30	1	4	1
50/70 D	233	75	51	4,23	1	4	1
70/100 A	569	78	96	3,40	1	4	1
70/100 B	254	74	39	3,30	1	4	1
70/100 D	416	48	65	5,30	1	4	1
F	306	114	789	4,58	40	4	3

FTIR-Spektroskopie

In Tabelle 3 und Tabelle 4 sind die Ergebnisse der FTIR-Spektroskopie in Form der Peakhöhen und -flächen dargestellt.

Tabelle 3 Ergebnisse der FTIR-Spektroskopie – Nicht gealterter und kurzzeitgealterter Zustand

	Peakhöhen [-]										Peakflächen [-]		
	Aliphalten1 2921cm ⁻¹	Aliphalten2 2842cm ⁻¹	Carbonyle 1705cm ⁻¹	Aromaten 1598cm ⁻¹	Aliphalten3 1455cm ⁻¹	Aliphalten4 1377cm ⁻¹	Sulfoxide 1030cm ⁻¹	Poly- aromaten1 869cm ⁻¹	Poly- aromaten2 811cm ⁻¹	Poly- aromaten3 745cm ⁻¹	Poly- aromaten4 719cm ⁻¹	Carbonyle 1750- 1660cm ⁻¹	Sulfoxide 1070- 980cm ⁻¹
	Nicht gealterter Zustand oA												
20/30 A	0,25004	0,17178	0,00811	0,02338	0,12231	0,08021	0,01985	0,0294	0,03696	0,04068	0,03405	0,53376	1,43388
20/30 E	0,25847	0,18255	0,00698	0,02725	0,11839	0,07514	0,02835	0,03094	0,03987	0,04568	0,04297	0,57912	1,96791
30/45 A	0,24795	0,16949	0,0094	0,0226	0,12165	0,07993	0,01897	0,02946	0,03706	0,04074	0,03347	0,56612	1,37065
30/45 C	0,26516	0,18849	0,00672	0,0266	0,11948	0,07542	0,02573	0,0299	0,03822	0,04422	0,04457	0,57698	1,83924
30/45 E	0,25689	0,18137	0,00488	0,02205	0,11814	0,07578	0,02329	0,02873	0,04007	0,0417	0,04485	0,47286	1,66887
50/70 A	0,24581	0,16756	0,00971	0,02182	0,12088	0,07946	0,01987	0,02875	0,03634	0,03998	0,03241	0,58512	1,44254
50/70 B	0,26078	0,18278	0,0039	0,02276	0,11633	0,07194	0,02011	0,02783	0,0356	0,04228	0,04099	0,3713	1,41249
50/70 D	0,26267	0,18616	0,00374	0,02043	0,11562	0,07176	0,02217	0,02718	0,03552	0,03785	0,04372	0,40478	1,59906
70/100 A	0,2462	0,1676	0,01013	0,0215	0,12142	0,07965	0,0199	0,02889	0,03665	0,0403	0,0326	0,58956	1,44821
70/100 B	0,25804	0,18087	0,0034	0,02189	0,11625	0,07171	0,02135	0,02824	0,03591	0,04221	0,04027	0,35062	1,48916
70/100 D	0,26686	0,18755	0,00387	0,01961	0,11804	0,07454	0,02335	0,02792	0,03881	0,03991	0,04625	0,40141	1,66087
F	0,20976	0,13898	0,03555	0,0324	0,12283	0,08259	0,03128	0,02339	0,03328	0,03262	0,01937	1,99261	2,23939
	RFT-gealterter Zustand RFT												
20/30 A	0,24629	0,1698	0,00918	0,02397	0,12193	0,07997	0,02097	0,02946	0,03718	0,04057	0,03383	0,64046	1,52632
20/30 E	0,25604	0,18181	0,00491	0,02543	0,11709	0,07378	0,02305	0,02975	0,03892	0,04462	0,04262	0,45281	1,59916
30/45 A	0,24399	0,16767	0,00998	0,02303	0,12103	0,07959	0,02084	0,02943	0,03698	0,04052	0,03357	0,65386	1,53504
30/45 C	0,25076	0,17837	0,00547	0,02504	0,11516	0,07284	0,02189	0,02885	0,03699	0,04347	0,04251	0,493	1,54976
30/45 E	0,26298	0,18436	0,00547	0,02263	0,11915	0,07658	0,02433	0,02928	0,0406	0,04274	0,0458	0,48626	1,71497
50/70 A	0,24384	0,16591	0,01016	0,02202	0,12007	0,07905	0,01926	0,02896	0,0366	0,0402	0,03249	0,61312	1,40531
50/70 B	0,25649	0,18006	0,00382	0,02247	0,11538	0,07155	0,01905	0,02811	0,03577	0,04263	0,0412	0,37053	1,35046
50/70 D	0,26418	0,18574	0,00285	0,01944	0,11464	0,07075	0,01709	0,02613	0,03456	0,03728	0,04224	0,31052	1,21139
70/100 A	0,23931	0,16277	0,01022	0,02126	0,11894	0,07816	0,01919	0,02845	0,03612	0,03958	0,03182	0,60867	1,40663
70/100 B	0,26005	0,18157	0,0026	0,02121	0,1157	0,07087	0,01822	0,02735	0,03474	0,04131	0,04	0,28747	1,27577
70/100 D	0,26298	0,18485	0,00349	0,0193	0,11721	0,07362	0,01988	0,0276	0,03873	0,03962	0,04547	0,36252	1,41864
F	0,20186	0,13543	0,04074	0,0395	0,13272	0,09537	0,05166	0,05129	0,06272	0,06371	0,05115	2,35998	4,14608

Tabelle 4 Ergebnisse der FTIR-Spektroskopie – Langzeitgealterter Zustand

	Peakhöhen [-]											Peakflächen [-]	
	Aliphalten1 2921cm ⁻¹	Aliphalten2 2842cm ⁻¹	Carbonyle 1705cm ⁻¹	Aromaten 1598cm ⁻¹	Aliphalten3 1455cm ⁻¹	Aliphalten4 1377cm ⁻¹	Sulfoxide 1030cm ⁻¹	Poly- aromaten1 869cm ⁻¹	Poly- aromaten2 811cm ⁻¹	Poly- aromaten3 745cm ⁻¹	Poly- aromaten4 719cm ⁻¹	Carbonyle 1750- 1660cm ⁻¹	Sulfoxide 1070- 980cm ⁻¹
Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV													
20/30 A	0,23715	0,16399	0,01344	0,026	0,12008	0,07952	0,02945	0,02972	0,03696	0,04072	0,03435	0,90519	2,13005
20/30 E	0,2561	0,18074	0,01015	0,02446	0,11806	0,07609	0,03258	0,02887	0,0396	0,0417	0,04528	0,7457	2,23086
30/45 A	0,23735	0,16307	0,01394	0,02484	0,11925	0,07889	0,02904	0,02897	0,03616	0,03994	0,0333	0,90594	2,09977
30/45 C	0,24752	0,17667	0,01069	0,02751	0,11499	0,0729	0,03035	0,02873	0,03648	0,04311	0,04294	0,76981	2,10458
30/45 E	0,26304	0,18605	0,00979	0,02862	0,12025	0,07621	0,02985	0,03127	0,04014	0,04619	0,04484	0,71295	2,02317
50/70 A	0,24511	0,16755	0,01569	0,02521	0,12195	0,08049	0,02795	0,02946	0,03709	0,0407	0,03384	0,99086	2,01936
50/70 B	0,26269	0,18476	0,00949	0,02553	0,11786	0,07304	0,02986	0,02787	0,03529	0,04211	0,04192	0,67621	2,03236
50/70 D	0,26535	0,18774	0,00855	0,02324	0,1163	0,0724	0,03084	0,02684	0,03478	0,03779	0,04411	0,66512	2,11576
70/100 A	0,23137	0,15896	0,0145	0,02382	0,11836	0,07817	0,02938	0,02885	0,03637	0,04007	0,03287	0,92206	2,12755
70/100 B	0,25684	0,18042	0,00888	0,02463	0,11581	0,07158	0,0314	0,02768	0,03491	0,04157	0,04129	0,6441	2,1234
70/100 D	0,25883	0,18289	0,00827	0,02157	0,11625	0,07341	0,03152	0,02742	0,03799	0,03938	0,04591	0,6197	2,13212
F	0,18879	0,12661	0,0416	0,03925	0,12431	0,09019	0,05537	0,05007	0,05955	0,06118	0,04973	2,4702	4,46257

Säurezahl

In Tabelle 5 sind die Säurezahlen der Aciditätsmessungen zusammengefasst.

Tabelle 5 Säurezahlen aus Aciditätsmessungen

	Säurezahl [mg KOH/g Probe]		
	Nicht gealterter Zustand oA	RFT-gealterter Zustand RFT	RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV
20/30 A	2,887	2,664	3,120
20/30 E	0,214	0,231	0,309
30/45 A	3,350	3,175	3,509
30/45 C	0,000	0,000	0,504
30/45 E	0,355	0,355	0,460
50/70 A	3,698	3,508	3,957
50/70 B	0,000	0,000	0,476
50/70 D	0,242	0,220	0,304
70/100 A	3,809	3,659	4,117
70/100 B	0,000	0,000	0,564
70/100 D	0,216	0,218	0,431
F	0,353	0,385	0,840

Bitumenauftrennung

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Bitumenauftrennung zusammengefasst.

Tabelle 6 Gehalte der Fraktionen der nicht gealterten Bitumenproben

	Gesättigte KW [M.-%]	Mono- aromaten [M.-%]	Di- aromaten [M.-%]	Poly- aromaten [M.-%]	pol. arom. Verbindungen [M.-%]	Verbleib [M.-%]	Asphaltene [M.-%]
Nicht gealterter Zustand							
20/30A	13,04	6,21	4,27	23,23	39,52	13,74	12,87
20/30E	9,70	8,94	4,31	23,37	43,00	10,68	16,22
30/45A	12,55	7,99	5,63	23,70	40,30	9,84	11,37
30/45C	13,54	8,59	4,79	22,75	36,84	13,50	17,85
30/45E	14,44	7,98	4,91	24,36	38,52	9,79	16,88
50/70A	14,58	8,28	5,06	23,51	33,29	15,28	11,23
50/70B	7,50	8,90	4,72	25,02	42,66	11,20	10,14
50/70D	11,42	7,46	4,57	23,17	37,40	15,99	8,65
70/100A	14,45	9,66	6,20	22,12	36,44	11,14	10,93
70/100B	9,24	7,08	4,85	23,56	42,47	12,80	7,17
70/100D	9,46	9,13	4,13	28,45	35,60	13,22	9,19
F	12,85	6,44	3,47	11,39	50,06	15,80	23,80
RFT-gealterter Zustand RFT							
20/30A	12,51	6,11	4,61	20,31	30,64	12,59	13,22
20/30E	9,67	5,50	3,97	20,70	33,99	8,05	18,13
30/45A	14,36	5,82	4,46	22,70	33,97	6,21	12,48
30/45C	12,23	5,48	3,93	20,34	31,95	7,04	19,04
30/45E	12,54	5,74	3,81	18,95	29,48	11,87	17,61
50/70A	14,16	6,42	4,82	19,17	27,45	16,09	11,89
50/70B	9,81	7,24	4,96	23,23	35,37	8,73	10,65
50/70D	13,06	5,84	3,85	25,24	33,25	9,35	9,42
70/100A	15,14	6,70	4,67	19,50	26,54	16,96	10,49
70/100B	7,91	7,63	4,51	21,72	39,63	11,68	6,92
70/100D	9,95	7,03	4,80	27,93	29,13	11,89	9,27
F	11,36	3,45	2,85	9,61	33,46	12,84	26,41
RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV							
20/30A	13,00	4,99	3,83	17,18	30,51	11,80	18,68
20/30E	9,39	5,52	3,91	18,26	33,87	7,68	21,37
30/45A	14,46	5,43	3,83	16,84	29,15	13,76	16,54
30/45C	14,64	6,04	3,73	16,23	34,22	1,84	23,30
30/45E	13,20	6,00	4,09	17,65	30,17	5,96	22,94
50/70A	16,01	5,41	4,15	16,78	30,05	11,33	16,26
50/70B	10,66	5,30	4,44	16,22	35,80	11,87	15,71
50/70D	11,92	6,52	4,19	20,15	36,98	6,12	14,11
70/100A	16,85	6,11	4,54	18,16	29,33	8,86	16,14
70/100B	10,71	5,35	4,44	18,65	39,51	9,35	12,00
70/100D	11,74	7,68	4,97	24,40	27,57	8,54	15,10
F	10,35	3,49	2,46	8,69	31,97	12,90	30,14

Gelpermeationschromatographie (GPC)

In Tabelle 7, Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10 sind die M-Werte der Gelpermeationschromatographie der einzelnen Fraktionen sowie des Gesamtbitumens aufgeführt. Die einzelnen Messwerte der Verteilungen sind in der beigefügten CD enthalten.

Tabelle 7 Zahlenmittlerer Molmassenmittelwert M_n des Gesamtbitumens und der einzelnen Fraktionen

	Zahlenmittlerer Molmassenmittelwert M_n [g/mol]						
	Gesamtbitumen	Gesättigte KW	Monoaromaten	Diaromaten	Polyaromaten	pol. arom. Verbindungen	Asphaltene
	Nicht gealterter Zustand						
20/30A	709	788,5	776	717,5	623	848	3038
20/30E	883	1049	1069	925,5	787,5	877,5	2393,5
30/45A	683	747,5	779	659,5	631	851	3045
30/45C	837	876	971	839,5	784,5	832	2042,5
30/45E	756	882	904,5	782	684	820,5	2846,5
50/70A	638	715	713	619,5	595	817	2414
50/70B	936	1062,5	1093,5	961	833	925	2617,5
50/70D	947	1165,5	1177	1001	850,5	959	2428
70/100A	617	683	679,5	594,5	552	770	2799,5
70/100B	886	1095	1076,5	950	819,5	892,5	2334,5
70/100D	811	1028	912,5	872,5	756,5	962,5	2111,5
F	474	391	376	377,5	512,5	725,5	2421
	RFT-gealterter Zustand RFT						
20/30A	667	692,5	730,5	670,5	651	849	2224
20/30E	858	996	1017,5	883	774	889,5	1665,5
30/45A	660	702	704,5	643	648	834	2200,5
30/45C	816	872,5	921	827	766,5	924	2428
30/45E	737	848	846	758	684,5	788,5	1559,5
50/70A	668	741,5	729,5	659	636	827,5	2140,5
50/70B	886	1057,5	1036	928,5	824,5	945	2311
50/70D	861	1077	1022	897,5	805	884	2264
70/100A	658	713,5	699	632,5	635	828	2365,5
70/100B	899	1090	1079	943,5	825,5	912	2227,5
70/100D	826	978	974	856	769	929,5	2041,5
F	428	401	404,5	406	453	704	1538,5
	RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV						
20/30A	634	748	734,5	654	581,5	754	1605
20/30E	766	933,5	935,5	821,5	678,5	788,5	1830,5
30/45A	630	741,5	723,5	645	573	784,5	1646,5
30/45C	752	842	873,5	771	705	780	1557,5
30/45E	686	782,5	777	715	644,5	809	1954,5
50/70A	618	720,5	695	617	576,5	768	1767
50/70B	878	985	1048,5	950	785,5	914,5	1978
50/70D	857	1081,5	1065,5	897,5	779,5	901,5	1392
70/100A	556	657	622,5	564	512,5	724,5	1705,5
70/100B	846	1056,5	1033	913,5	774	915	1841
70/100D	764	983	917	800	707,5	849,5	1774,5
F	452	418,5	415,5	416,5	479,5	683	2618,5

Tabelle 8 Gewichtsmittlerer Molmassenmittelwert M_w des Gesamtbitumens und der einzelnen Fraktionen

	Gewichtsmittlerer Molmassenmittelwert M_w [g/mol]						
	Gesamtbitumen	Gesättigte KW	Monoaromaten	Diaromaten	Polyaromaten	pol. arom. Verbindungen	Asphaltene
	Nicht gealterter Zustand						
20/30A	1061	960	1058	1039,5	1052	2020	19359
20/30E	1171	1236,5	1298	1143,5	1120	1409	7675,5
30/45A	1034	918,5	1065,5	944,5	1050	1826,5	12179,5
30/45C	1144	1082,5	1247	1087	1129	1398	7188,5
30/45E	1063	1078	1170	1022	1031,5	1423	8095
50/70A	989	874	981,5	890	1024	1771	8475
50/70B	1206	1228	1298,5	1183,5	1163	1611	8810,5
50/70D	1321	1369	1487	1283,5	1257	1764,5	7393,5
70/100A	946	846	932	881,5	978,5	1750,5	10674
70/100B	1164	1261,5	1293,5	1151,5	1130,5	1406	6762,5
70/100D	1153	1218,5	1194	1119,5	1152,5	2064	7275,5
F	673	484,5	522	538,5	766,5	1498	132483
	RFT-gealterter Zustand RFT						
20/30A	977	833,5	972	909	1032	1835	6801,5
20/30E	1115	1161,5	1231	1077,5	1067	1482,5	5429
30/45A	955	846,5	954	876,5	1010,5	1656	7077
30/45C	1093	1065,5	1172,5	1050,5	1082,5	1588,5	6405
30/45E	1008	1013	1075,5	963,5	994,5	1352	5977
50/70A	971	891	973	907	1000	1596,5	8185
50/70B	1136	1213,5	1235,5	1114,5	1134,5	1527,5	7599
50/70D	1162	1275	1290,5	1119,5	1158,5	1515,5	6922
70/100A	974	861,5	953	890	1025	1612,5	8246
70/100B	1160	1222,5	1278,5	1136	1128	1434	6621,5
70/100D	1114	1143	1192,5	1063	1128	1880,5	6690,5
F	585	475	519	530	664,5	1298,5	5471
	RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV						
20/30A	975	930,5	1021,5	920,5	984	1528,5	5405,5
20/30E	1035	1132	1166	1033	972,5	1349,5	6411,5
30/45A	961	915,5	1007,5	912	968	1685	5678
30/45C	1037	1051	1146	1002,5	1019,5	1327	5241
30/45E	975	977	1024,5	955,5	962	1496	7271
50/70A	945	889	971	874,5	957,5	1507	6100,5
50/70B	1130	1187,5	1235	1194	1090	1537,5	6303
50/70D	1196	1319	1388	1163	1153	1628	4318
70/100A	882	821,5	891	830,5	914,5	1533,5	5765
70/100B	1114	1230,5	1257,5	1116,5	1074	1549	5473
70/100D	1081	1173,5	1157	1028	1088	1563,5	5656,5
F	624	501,5	543	549	701	1263,5	7276

Tabelle 9 z- Molmassenmittelwert M_z des Gesamtbitumens und der einzelnen Fraktionen

	z-Molmassenmittelwert M_z [g/mol]						
	Gesamtbitumen	Gesättigte KW	Monoaromaten	Diaromaten	Polyaromaten	pol. arom. Verbindungen	Asphaltene
	Nicht gealterter Zustand						
20/30A	1582	1147	1435	1542,5	1721,5	4974	1790750
20/30E	1526	1413	1560	1410,5	1603	2319	14534
30/45A	1566	1121,5	1467	1398,5	1758,5	4278,5	24269
30/45C	1524	1303,5	1568,5	1389,5	1623,5	2292,5	14396,5
30/45E	1468	1269,5	1484	1336,5	1559	2441,5	14241
50/70A	1546	1066,5	1367,5	1327	1788	4424	15427
50/70B	1556	1388,5	1543,5	1480,5	1635,5	3122,5	16661,5
50/70D	1850	1579	1890,5	1702,5	1891	3559,5	13084,5
70/100A	1464	1049	1299	1344	1740,5	4306,5	19581
70/100B	1502	1431,5	1552,5	1400	1560,5	2255	11728
70/100D	1619	1408,5	1511,5	1468	1779	4890	14275,5
F	981	617	753,5	795	1177	3085	3783370
	RFT-gealterter Zustand RFT						
20/30A	1436	1002	1308	1263,5	1665	4607,5	12164,5
20/30E	1459	1331,5	1493,5	1332	1521	2754	10506
30/45A	1405	1020,5	1314	1247	1633,5	3877,5	13062,5
30/45C	1454	1279,5	1476	1329,5	1574,5	3039,5	11429,5
30/45E	1393	1191	1370,5	1246	1491,5	2556	12378,5
50/70A	1441	1079	1328,5	1314	1614,5	3490	15544,5
50/70B	1438	1372	1470,5	1344	1589,5	2685	14709,5
50/70D	1566	1488,5	1642	1415	1727,5	3034	12091
70/100A	1503	1055	1338,5	1350,5	1766,5	3689,5	15306,5
70/100B	1514	1365	1531,5	1397,5	1606,5	2458,5	11432,5
70/100D	1502	1314,5	1470	1338,5	1714,5	4347,5	12273
F	833	583,5	706,5	734	1028	2665	12157
	RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV						
20/30A	1477	1150,5	1417,5	1314	1648	3557,5	10312,5
20/30E	1372	1320	1432	1296,5	1410	2438,5	12163,5
30/45A	1453	1132,5	1413,5	1314,5	1618,5	3900	10523,5
30/45C	1411	1276	1484	1290	1509	2439	10323,5
30/45E	1388	1174	1337	1288	1455	2981	13559
50/70A	1470	1105	1384	1294,5	1639	3391	11182
50/70B	1430	1429,5	1445,5	1487	1537,5	2936	11338,5
50/70D	1630	1545	1790,5	1499,5	1740	3266,5	8233,5
70/100A	1396	1036,5	1296,5	1262,5	1633,5	3551,5	10459
70/100B	1454	1411	1537	1377	1519	2851	9609
70/100D	1511	1374	1469	1330,5	1696	3231,5	10229,5
F	913	622	760,5	772	1648	2476	12859,5

Tabelle 10 Molmasse M_p des Gesamtbitumens und der einzelnen Fraktionen

	Molmasse M_p [g/mol]						
	Gesamtbitumen	Gesättigte KW	Monoaromaten	Diaromaten	Polyaromaten	pol. arom. Verbindungen	Asphaltene
	Nicht gealterter Zustand						
20/30A	784	896	825,5	760,5	770,5	1085	11697
20/30E	1038	1277	1204,5	1023,5	905,5	1071,5	8629
30/45A	740	830	799,5	673	724	1032,5	12158,5
30/45C	1036	987	1217,5	1019	920,5	1103,5	7904,5
30/45E	902	1104,5	1075	891,5	793	970	9406
50/70A	672	788,5	708	606	669	998	10100
50/70B	1046	1245	1190	1024	932	1082,5	9831
50/70D	1076	1343,5	1273	1066	959	1137	9018
70/100A	653	765	683	598,5	647	1010,5	11446,5
70/100B	1010	1243	1159,5	1012,5	916,5	1064,5	8131,5
70/100D	967	1207,5	1075	942	876,5	1105,5	8248,5
F	398	401	367	389	544	960,5	7945
	RFT-gealterter Zustand RFT						
20/30A	727	762,5	752	693	730	985,5	8105,5
20/30E	964	1173	1124	949,5	846	1015	6836,5
30/45A	685	756,5	705	640	696	957,5	8483
30/45C	982	1027,5	1137,5	989	875,5	1057	7305,5
30/45E	840	1019,5	969	839	756,5	931	7170,5
50/70A	683	795,5	708	631	682,5	983	9311,5
50/70B	982	1206	1118,5	977	897,5	1064	8125,5
50/70D	961	1233	1087,5	953,5	885	1008	8418
70/100A	665	769	683,5	602	676,5	1000	9095
70/100B	982	1202	1140	983,5	897	1033,5	7914
70/100D	929	1121	1047,5	902,5	845,5	1026	8112,5
F	383	394,5	370,5	400,5	497	840	5319,5
	RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV						
20/30A	723	841,5	781,5	696,5	698,5	977,5	7125,5
20/30E	902	1159	1063	915	786,5	963	7795,5
30/45A	696	806,5	739,5	659	678	1039,5	7190,5
30/45C	919	1036	1089	939,5	826	945,5	5959,5
30/45E	813	990	912	809,5	739,5	977,5	8861
50/70A	642	776,5	683	599	623	975	7853
50/70B	1011	1101,5	1157	1052,5	869,5	1056	7992
50/70D	993	1295	1176,5	988,5	889	1069	4891,5
70/100A	604	714	626	569,5	604	962	7475
70/100B	947	1205,5	1100,5	970	863	1075,5	7398,5
70/100D	887	1138,5	978,5	862	807	1027,5	7200
F	382	414	370,5	380,5	494	823	6810,5

2.2. Konventionelle Prüfverfahren

In Tabelle 11 und Tabelle 12 sind die Ergebnisse der konventionellen Prüfverfahren in Form des Erweichungspunkts Ring und Kugel, der Nadelpenetration, des Brechpunkts nach Fraaß und des Penetrationsindex dargestellt.

Tabelle 11 Ergebnisse der konventionellen Prüfverfahren – Erweichungspunkt und Nadelpenetration

	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]			Nadelpenetration [1/10 mm]		
	oA	RFT	RFT+PAV	oA	RFT	RFT+PAV
20/30 A	58,7	61,1	68,8	25,8	24,2	12,6
20/30 E	58,5	62,9	74,2	25,3	23,5	6,3
30/45 A	53,3	54,7	64,2	43,0	37,1	18,7
30/45 C	57,3	60,6	74,3	33,3	27,7	15,1
30/45 E	55,4	57,6	68,9	38,9	33,4	18,8
50/70 A	49,2	49,9	60	61,4	54,8	31,1
50/70 B	5,03	52,7	61,7	47,0	37,9	21,1
50/70 D	49,8	51,9	62,6	51,3	43,2	23
70/100 A	46,9	47,1	55,9	84,4	76,4	36,6
70/100 B	48,2	49,1	56,9	71,7	53,9	25
70/100 D	48,0	49,5	59,7	70,0	61,7	28
F	76,0	76,9	92,7	5,7	2,4	1

Tabelle 12 Ergebnisse der konventionellen Prüfverfahren – Brechpunkt und Penetrationsindex

	Brechpunkt nach Fraaß [°C]			Penetrationsindex [-]		
	oA	RFT	RFT+PAV	oA	RFT	RFT+PAV
20/30 A	1	/	/	-0,7	-0,3	-0,2
20/30 E	-4	/	/	-0,7	-0,1	-0,4
30/45 A	-4	/	/	-0,8	-0,8	-0,3
30/45 C	-8	/	/	-0,4	-0,2	0,9
30/45 E	-9	/	/	-0,5	-0,4	0,5
50/70 A	-6	/	/	-0,9	-1	-0,1
50/70 B	-7	/	/	-1,3	-1,2	-0,5
50/70 D	-8	/	/	-1,2	-1,1	-0,2
70/100 A	-12	/	/	-0,7	-0,9	-0,5
70/100 B	-7	/	/	-0,8	-1,3	-1,1
70/100 D	-11	/	/	-0,9	-0,8	-0,3
F	/	/	/	-0,3	-1,3	-0,5

2.3. Performance-orientierte Prüfverfahren

Kraftduktilität/ Formänderungsarbeit

Tabelle 13 und Tabelle 14 enthalten die Ergebnisse des Kraftduktilitätsverfahrens,

wozu die flächenbezogenen Ausgangsarbeiten $E'_{0,4-0,2}$ in einem Bereich zwischen den Ausziehlängen 0,2 m und 0,4 m, $E'_{0,2}$ für eine Ausziehlänge von 0,2 m, die maximale Kraft F_{max} innerhalb der Probe und die maximale Ausziehlänge L_{max} zählen.

Tabelle 13 Ergebnisse des Kraftduktilitätsverfahrens – Formänderungsarbeiten

	Prüf-temperatur	Formänderungsarbeit $E_{0,4-0,2}$ [J/cm ²]			Formänderungsarbeit $E_{0,2}$ [J/cm ²]		
		oA	RFT	RFT+PAV	oA	RFT	RFT+PAV
20/30 A	25°C	0,10			0,69		1,83
20/30 E		0,08			0,59		2,65
30/45 A	25°C	0,03			0,15		0,62
30/45 C		0,05			0,49		0,70
30/45 E		0,03			0,25		1,34
50/70 A	13°C	0,16	0,18		1,64	1,60	
50/70 B		0,26	0,02		2,14	2,37	3,59
50/70 D		0,48	0,02		2,79	2,83	3,14
70/100 A	7°C	0,17			1,49		2,57
70/100 B		0,55			3,51		4,59
70/100 D		0,26			2,36		3,07
F	35°C	0,17			1,48		

Tabelle 14 Ergebnisse des Kraftduktilitätsverfahrens – Maximale Kraft und Ausziehlänge

	Prüf-temperatur	Maximale Kraft F_{max} [N]			Maximale Ausziehlänge L_{max} [m]		
		oA	RFT	RFT+PAV	oA	RFT	RFT+PAV
20/30 A	25°C	9,47		25,00	0,81		0,26
20/30 E		8,03		35,93	0,69		0,22
30/45 A	25°C	2,47		10,57	0,67		0,22
30/45 C		6,97		9,90	0,82		0,31
30/45 E		3,50		18,67	1,00		0,27
50/70 A	13°C	21,50	21,83	35,07	0,64	0,55	0,17
50/70 B		30,87	46,27	51,83	0,85	0,64	0,28
50/70 D		41,50	52,33	46,67	1,00	0,71	0,36
70/100 A	7°C	20,67		35,63	0,53		0,22
70/100 B		53,07		68,90	0,70		0,20
70/100 D		34,03		44,23	0,73		0,24
F	35°C	18,50		53,00	1,00		0,01

Krafrückstellung

In Tabelle 15 sind die Ergebnisse der Krafrückstellversuche in Form der Kraft-

verhältnisse zu unterschiedlichen Zeitpunkten bezogen auf einen Zeitpunkt nach 20 Sekunden angegeben.

Tabelle 15 Ergebnisse der Prüfung der Krafrückstellung

	Nicht gealterter Zustand oA					Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV				
	100% Dehnung									
	F_{30s}/F_{20s} [-]	F_{40s}/F_{20s} [-]	F_{50s}/F_{20s} [-]	F_{80s}/F_{20s} [-]	F_{100s}/F_{20s} [-]	F_{30s}/F_{20s} [-]	F_{40s}/F_{20s} [-]	F_{50s}/F_{20s} [-]	F_{80s}/F_{20s} [-]	F_{100s}/F_{20s} [-]
20/30 A	0,752	0,581	0,463	0,288	0,243	0,749	0,620	0,536	0,376	0,307
20/30 E	0,697	0,545	0,468	0,401	0,393	0,783	0,627	0,515	0,333	0,280
30/45 A	0,599	0,410	0,321	0,250	0,243	0,817	0,685	0,581	0,381	0,307
30/45 C	0,827	0,696	0,597	0,423	0,367	0,837	0,710	0,606	0,396	0,313
30/45 E	0,783	0,635	0,528	0,352	0,300	0,826	0,699	0,598	0,394	0,314
50/70 A	0,638	0,440	0,328	0,208	0,190	0,806	0,656	0,542	0,335	0,265
50/70 B	0,827	0,699	0,603	0,435	0,381	0,827	0,705	0,607	0,413	0,338
50/70 D	0,723	0,553	0,447	0,317	0,292	0,821	0,681	0,571	0,363	0,288
70/100 A	0,761	0,594	0,477	0,298	0,251	0,701	0,533	0,439	0,339	0,324
70/100 B	0,749	0,598	0,490	0,305	0,246	0,743	0,604	0,511	0,330	0,249
70/100 D	0,749	0,578	0,457	0,263	0,208	0,803	0,659	0,548	0,345	0,275
F	0,822	0,712	0,625	0,449	0,379					
	333% Dehnung									
	F_{30s}/F_{20s} [-]	F_{40s}/F_{20s} [-]	F_{50s}/F_{20s} [-]	F_{80s}/F_{20s} [-]	F_{100s}/F_{20s} [-]	F_{30s}/F_{20s} [-]	F_{40s}/F_{20s} [-]	F_{50s}/F_{20s} [-]	F_{80s}/F_{20s} [-]	F_{100s}/F_{20s} [-]
20/30 A	0,783	0,625	0,508	0,312	0,253	0,899	0,829	0,769	0,625	0,553
20/30 E	0,766	0,613	0,510	0,360	0,324	0,876	0,777	0,697	0,538	0,477
30/45 A	0,789	0,652	0,555	0,400	0,356	0,840	0,718	0,622	0,448	0,387
30/45 C	0,813	0,683	0,584	0,407	0,347	0,740	0,550	0,411	0,180	0,111
30/45 E	0,787	0,679	0,600	0,424	0,339	0,861	0,757	0,670	0,473	0,382
50/70 A	0,836	0,705	0,597	0,377	0,289	0,842	0,726	0,630	0,419	0,324
50/70 B	0,815	0,681	0,575	0,373	0,298	0,828	0,690	0,578	0,354	0,268
50/70 D	0,810	0,665	0,553	0,349	0,280	0,859	0,742	0,643	0,435	0,348
70/100 A	0,767	0,650	0,570	0,419	0,359	0,612	0,415	0,310	0,192	0,163
70/100 B	0,791	0,643	0,535	0,356	0,302	0,805	0,649	0,526	0,290	0,202
70/100 D	0,780	0,626	0,518	0,354	0,310	0,859	0,745	0,652	0,464	0,389
F	0,823	0,693	0,590	0,396	0,325					
	667% Dehnung									
	F_{30s}/F_{20s} [-]	F_{40s}/F_{20s} [-]	F_{50s}/F_{20s} [-]	F_{80s}/F_{20s} [-]	F_{100s}/F_{20s} [-]	F_{30s}/F_{20s} [-]	F_{40s}/F_{20s} [-]	F_{50s}/F_{20s} [-]	F_{80s}/F_{20s} [-]	F_{100s}/F_{20s} [-]
20/30 A	0,907	0,844	0,789	0,644	0,563	0,711	0,562	0,472	0,320	0,255
20/30 E	0,881	0,796	0,731	0,616	0,577	0,907	0,838	0,782	0,672	0,629
30/45 A	0,984	0,982	0,982	0,982	0,982	0,808	0,675	0,573	0,381	0,311
30/45 C	0,797	0,658	0,562	0,421	0,385	0,839	0,725	0,635	0,446	0,366
30/45 E	0,819	0,731	0,689	0,654	0,651	0,848	0,719	0,612	0,380	0,281
50/70 A	0,835	0,737	0,662	0,506	0,439					
50/70 B	0,747	0,597	0,508	0,407	0,389	0,858	0,743	0,644	0,424	0,325
50/70 D	0,836	0,729	0,640	0,449	0,364	0,876	0,769	0,676	0,464	0,365
70/100 A	0,867	0,778	0,709	0,574	0,523	0,817	0,674	0,563	0,355	0,282
70/100 B	0,752	0,620	0,542	0,418	0,368	0,792	0,654	0,557	0,386	0,318
70/100 D	0,873	0,778	0,700	0,532	0,461	0,831	0,704	0,599	0,384	0,296
F	0,823	0,693	0,590	0,396	0,325					

Biegebalkenrheometer (BBR)

In Tabelle 16 sind die BBR-Ergebnisse in Form der Steifigkeit S und des m -Werts auf einer Temperaturstufe von -16°C dargestellt, während in Tabelle 17 und Tabelle 18 die Temperatur und der dazugehörige m -Wert bei $S = 300 \text{ MPa}$ und die Temperatur bei einem m -Wert von $m = 0,3$ zusammengefasst sind.

Tabelle 17 Ergebnisse der BBR-Untersuchung – Temperatur und m-Wert bei $S = 300 \text{ MPa}$

	Nicht gealterter Zustand oA						RFT-gealterter Zustand RFT						RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV					
	T bei $S = 300 \text{ MPa}$ [°C]																	
	8s	15s	30s	60s	120s	240s	8s	15s	30s	60s	120s	240s	8s	15s	30s	60s	120s	240s
20/30 A	-9,03	-10,17	-11,51	-13,26	-15,15	-17,57	-7,82	-9,40	-11,25	-13,17	-15,25	-16,87	-7,82	-9,40	-11,25	-13,17	-15,25	-16,87
20/30 E	-11,45	-13,17	-15,17	-17,14	-19,25	-21,68	-9,95	-11,58	-13,42	-14,96	-16,55	-18,08	-9,95	-11,58	-13,42	-14,96	-16,55	-18,08
30/45 A	-12,58	-14,09	-15,79	-17,48	-19,10	-21,21	-11,35	-12,72	-14,34	-16,02	-17,76	-19,51	-11,35	-12,72	-14,34	-16,02	-17,76	-19,51
30/45 C	-17,27	-18,86	-20,60	-22,46	-24,47	-28,85	-16,89	-18,02	-19,31	-20,66	-22,28	-24,20	-16,89	-18,02	-19,31	-20,66	-22,28	-24,20
30/45 E	-17,63	-19,36	-21,23	-23,16	-25,41	-28,32	-16,24	-17,84	-19,56	-21,27	-23,03	-24,90	-16,24	-17,84	-19,56	-21,27	-23,03	-24,90
50/70 A	-15,40	-16,92	-18,45	-20,00	-21,56	-23,63			-18,28	-19,82	-21,02	-22,28			-18,28	-19,82	-21,02	-22,28
50/70 B	-14,85	-16,53	-18,26	-19,93	-21,62	-23,83	-14,71	-15,67	-16,79	-18,03	-19,57	-21,17	-14,71	-15,67	-16,79	-18,03	-19,57	-21,17
50/70 D	-14,35	-16,11	-18,14	-20,34	-22,53	-25,19	-15,08	-15,64	-16,41	-17,55	-19,40	-22,23	-15,08	-15,64	-16,41	-17,55	-19,40	-22,23
70/100 A	-17,01	-18,49	-20,05	-22,07	-23,58	-25,33	-15,95	-16,83	-18,15	-20,08	-22,00	-23,89	-15,95	-16,83	-18,15	-20,08	-22,00	-23,89
70/100 B	-13,43	-15,99	-18,19	-20,11	-21,90	-23,68			-17,90	-19,05	-20,04	-21,15			-17,90	-19,05	-20,04	-21,15
70/100 D	-17,03	-18,90	-20,83	-21,99	-24,55	-26,62	-16,01	-17,23	-18,86	-20,93	-23,22	-25,62	-16,01	-17,23	-18,86	-20,93	-23,22	-25,62
F	4,72	3,33	1,83	0,23	-1,31	-2,81	6,99	5,74	4,26	2,28	0,10	-3,83	6,99	5,74	4,26	2,28	0,10	-3,83
	m bei $S = 300 \text{ MPa}$ [-]																	
	8s	15s	30s	60s	120s	240s	8s	15s	30s	60s	120s	240s	8s	15s	30s	60s	120s	240s
20/30 A	0,318	0,330	0,346	0,357	0,368	0,370	0,262	0,267	0,268	0,266	0,256	0,247	0,262	0,267	0,268	0,266	0,256	0,247
20/30 E	0,269	0,282	0,296	0,314	0,327	0,339	0,236	0,241	0,239	0,235	0,222	0,204	0,236	0,241	0,239	0,235	0,222	0,204
30/45 A	0,322	0,330	0,341	0,355	0,377	0,399	0,269	0,271	0,276	0,281	0,281	0,272	0,269	0,271	0,276	0,281	0,281	0,272
30/45 C	0,272	0,277	0,285	0,303	0,319	0,318	0,168	0,183	0,203	0,224	0,246	0,270	0,168	0,183	0,203	0,224	0,246	0,270
30/45 E	0,255	0,264	0,279	0,302	0,325	0,355	0,218	0,225	0,232	0,238	0,241	0,242	0,218	0,225	0,232	0,238	0,241	0,242
50/70 A	0,344	0,351	0,365	0,388	0,404	0,436			0,223	0,218	0,227	0,242			0,223	0,218	0,227	0,242
50/70 B	0,291	0,301	0,318	0,336	0,359	0,373	0,206	0,218	0,233	0,248	0,259	0,268	0,206	0,218	0,233	0,248	0,259	0,268
50/70 D	0,285	0,295	0,306	0,321	0,332	0,348	0,181	0,206	0,231	0,254	0,266	0,253	0,181	0,206	0,231	0,254	0,266	0,253
70/100 A	0,329	0,344	0,371	0,376	0,387	0,354	0,300	0,323	0,340	0,338	0,323	0,294	0,300	0,323	0,340	0,338	0,323	0,294
70/100 B	0,362	0,345	0,349	0,364	0,379	0,389			0,215	0,231	0,257	0,298			0,215	0,231	0,257	0,298
70/100 D	0,300	0,304	0,325	0,348	0,359	0,335	0,233	0,244	0,246	0,234	0,217	0,199	0,233	0,244	0,246	0,234	0,217	0,199
F	0,267	0,278	0,285	0,288	0,288	0,282	0,372	0,352	0,334	0,307	0,279	0,205	0,372	0,352	0,334	0,307	0,279	0,205

Tabelle 18 Ergebnisse der BBR-Untersuchung – Temperatur bei $m = 0,3$

	T bei $m = 0,3$ [°C]																	
	8s	15s	30s	60s	120s	240s	8s	15s	30s	60s	120s	240s	8s	15s	30s	60s	120s	240s
20/30 A	-9,75	-11,53	-13,81	-16,41	-19,16	-21,77	-5,71	-7,46	-9,36	-11,23	-12,88	-14,30	-5,71	-7,46	-9,36	-11,23	-12,88	-14,30
20/30 E	-8,88	-11,55	-14,81	-17,82	-22,28	-26,19	-3,27	-6,08	-8,54	-10,43	-11,91	-13,07	-3,27	-6,08	-8,54	-10,43	-11,91	-13,07
30/45 A	-13,64	-15,64	-18,07	-20,98	-24,84	-31,09	-10,18	-11,41	-13,09	-14,98	-16,81	-18,29	-10,18	-11,41	-13,09	-14,98	-16,81	-18,29
30/45 C	-14,39	-16,61	-19,02	-22,27			-8,84	-9,85	-11,17	-12,82	-14,90	-17,90	-8,84	-9,85	-11,17	-12,82	-14,90	-17,90
30/45 E	-14,25	-16,34	-19,27	-23,11	-28,85	-38,55	-6,83	-9,89	-12,76	-15,33	-17,65	-19,77	-6,83	-9,89	-12,76	-15,33	-17,65	-19,77
50/70 A	-17,55	-19,38	-21,68	-24,46	-28,31	-29,78	-14,25	-15,01	-15,89	-16,83	-17,83	-18,96	-14,25	-15,01	-15,89	-16,83	-17,83	-18,96
50/70 B	-14,29	-16,61	-19,37	-22,30	-25,30	-28,23	-9,35	-10,07	-11,49	-13,44	-16,00	-18,43	-9,35	-10,07	-11,49	-13,44	-16,00	-18,43
50/70 D	-13,30	-15,69	-18,62	-22,01	-26,46	-35,79						-18,64						-18,64
70/100 A	-18,08	-20,53	-23,18	-24,85	-25,78	-26,34	-12,60	-18,82	-20,50	-21,75	-22,80	-23,72	-12,60	-18,82	-20,50	-21,75	-22,80	-23,72
70/100 B	-16,23	-18,25	-20,70	-23,11	-25,19	-26,80	-12,92	-13,80	-14,71	-15,71	-16,70	-17,94	-12,92	-13,80	-14,71	-15,71	-16,70	-17,94
70/100 D	-17,02	-19,11	-22,69	-25,47	-26,82	-27,56	-11,18	-13,71	-15,84	-17,45	-18,87	-20,09	-11,18	-13,71	-15,84	-17,45	-18,87	-20,09
F	7,21	4,62	2,70	0,85	-0,74	-2,05	4,84	4,03	3,04	1,99	0,92	-0,08	4,84	4,03	3,04	1,99	0,92	-0,08

Dynamisches Scherrheometer (DSR)

In Tabelle 19 und Tabelle 20 sind die Ergebnisse des komplexen Schermoduls $|G^*|$ und des Phasenwinkels δ auf den Temperaturstufen von 0°C bis 90°C zusammengefasst. Die Kennwerte für den Speichermodul G' , den Verlustmodul G'' und die komplexen Viskosität $|\eta^*|$ sowie des Frequenzsweeps sind aufgrund des erheblichen Umfangs auf der beigefügten CD enthalten.

In Tabelle 21 und Tabelle 22 sind die Verschiebungsfaktoren a_{Ti} sowie in Tabelle 23 und Tabelle 24 die Materialkonstanten c_1 und c_2 der Masterkurvenerstellung aufgeführt.

Tabelle 19 Ausschnitt der Ergebnisse der DSR-Untersuchung: Komplexer Schermodul $[G^*]$

	Komplexer Schermodul $[G^*]$ [Pa]									
	Nicht gealterter Zustand oA									
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
20/30 A	181.000.000	53.200.000	11.900.000	2.035.182	354.207	66.902	13.800	3.240	992	342
20/30 E	121.000.000	39.200.000	9.350.000	1.676.509	309.249	55.286	12.000	2.730	809	285
30/45 A	109.000.000	25.200.000	4.550.000	712.453	117.647	23.300	5.360	1.460	452	160
30/45 C	74.600.000	22.400.000	5.800.000	855.601	173.121	35.481	8.640	2.380	751	264
30/45 E	64.300.000	18.800.000	4.210.000	644.555	127.042	25.079	5.560	1.580	487	180
50/70 A	79.100.000	15.900.000	2.770.000	397.958	69.063	13.635	3.150	901	298	110
50/70 B	100.000.000	25.300.000	4.760.000	479.123	75.802	13.627	3.050	866	284	106
50/70 D	74.800.000	19.600.000	3.440.000	411.832	64.243	11.889	2.620	729	234	90
70/100 A	50.600.000	8.700.000	1.250.000	202.523	33.662	7.082	1.740	496	170	67
70/100 B	86.800.000	17.600.000	2.650.000	263.595	38.487	6.860	1.620	464	158	
70/100 D	61.000.000	13.300.000	2.100.000	238.235	40.205	7.512	1.830	538	185	72
F	988.219.198	631.904.913	247.279.698	69.185.000	16.281.000	733.590	136.000	25.000	6.330	1.810
	RFT-gealterter Zustand RFT									
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
20/30 A	189.000.000	60.500.000	13.100.000	2.370.000	397.060	77.394	15.400	3.880	1.080	373
20/30 E	135.000.000	43.700.000	11.400.000	2.490.000	465.368	98.241	20.300	5.000	1.410	453
30/45 A	133.000.000	32.500.000	6.150.000	1.070.000	156.861	31.903	6.210	1.700	522	181
30/45 C	73.000.000	23.100.000	6.180.000	1.340.000	241.601	59.443	13.500	3.650	1.050	345
30/45 E	76.000.000	22.300.000	5.260.000	1.020.000	182.081	42.106	8.770	2.190	642	223
50/70 A	83.500.000	18.200.000	3.090.000	483.000	83.024	17.333	3.730	1.040	326	117
50/70 B	113.000.000	28.700.000	5.310.000	762.000	100.092	20.446	3.860	1.070	317	127
50/70 D	98.000.000	26.300.000	4.790.000	646.000	83.291	17.268	3.320	898	290	107
70/100 A	59.800.000	11.700.000	1.700.000	267.000	44.023	9.250	2.070	618	202	80
70/100 B	110.000.000	24.900.000	3.730.000	444.000	53.932	10.589	2.160	607	192	77
70/100 D	52.300.000	11.600.000	1.830.000	258.000	44.773	9.119	2.280	662	218	85
F	626.840.000	324.550.000	126.000.000	32.600.000	6.185.000	1.140.000	196.000	40.500	10.100	2.860
	Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV									
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
20/30 A		78.583.000	23.600.000	5.850.000	1.122.265	247.629	51.700	13.000	3.580	1.130
20/30 E		74.800.000	26.500.000	7.510.000	1.815.000	449.500	103.000	26.000	7.140	1.900
30/45 A	146.000.000	47.700.000	12.100.000	2.750.000	568.913	124.416	28.300	7.280	2.000	592
30/45 C	117.000.000	47.100.000	16.700.000	5.040.000	1.152.846	321.901	75.900	21.400	5.920	1.860
30/45 E	102.000.000	37.100.000	11.200.000	3.080.000	661.754	163.291	35.900	9.780	2.960	905
50/70 A	121.000.000	35.900.000	7.980.000	1.630.000	290.617	62.057	13.000	3.350	2.000	592
50/70 B	150.000.000	51.100.000	13.100.000	2.810.000	463.375	97.317	18.500	4.660	1.320	411
50/70 D	124.000.000	43.300.000	11.700.000	2.500.000	442.224	92.124	17.600	4.250	1.110	340
70/100 A	99.500.000	26.900.000	5.660.000	1.100.000	193.903	41.818	8.830	2.300	668	238
70/100 B	115.000.000	34.300.000	7.940.000	1.380.000	214.725	39.269	7.980	1.920	569	186
70/100 D	98.500.000	30.600.000	7.280.000	1.450.000	230.945	49.401	9.520	2.380	707	249
F	258.683.000	270.095.000	154.000.000	91.466.031	58.400.000	16.400.000	3.820.000	638.000	152.000	41.000

Tabelle 20 Ausschnitt der Ergebnisse der DSR-Untersuchung: Phasenwinkel δ

	Phasenwinkel δ [°]								
	Nicht gealterter Zustand oA								
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
20/30 A	24,5	38,1	51,4	63,6	71,2	76,3	81,0	84,7	87,2
20/30 E	25,9	36,5	48,4	60,6	69,1	76,1	81,0	84,7	87,4
30/45 A	31,4	46,8	60,0	69,3	75,8	80,0	84,1	86,8	88,7
30/45 C	28,7	37,3	46,0	56,7	65,3	71,7	77,7	82,3	85,5
30/45 E	30,1	39,4	49,9	60,6	68,6	75,3	80,5	84,8	87,5
50/70 A	35,1	50,6	62,6	72,1	77,7	82,2	85,4	87,9	89,7
50/70 B	29,9	43,8	58,0	71,7	79,5	83,3	86,5	88,2	89,0
50/70 D	31,0	44,1	59,1	72,2	79,2	84,1	86,9	88,8	90,0
70/100 A	41,8	57,6	68,8	76,0	80,5	83,8	86,8	88,6	89,6
70/100 B	32,8	50,6	66,7	79,4	83,9	87,0	88,7	89,5	90,0
70/100 D	34,5	49,3	63,8	75,0	80,7	84,1	87,4	89,2	90,0
F	2,3	7,9	19,6	35,8	50,6	70,1	74,7	79,5	83,2
	RFT-gealterter Zustand RFT								
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
20/30 A	24,4	37,5	51,0	62,2	70,0	75,4	80,4	84,2	86,7
20/30 E	23,8	34,0	44,7	55,3	64,7	71,8	77,8	82,5	85,9
30/45 A	29,8	44,2	57,1	66,5	73,5	78,4	83,2	86,1	88,1
30/45 C	27,3	35,4	43,8	52,8	61,6	68,1	74,8	80,3	84,2
30/45 E	29,0	38,3	48,4	58,1	66,1	72,6	78,7	83,3	86,1
50/70 A	35,1	49,8	62,4	71,0	76,8	81,0	85,0	87,6	89,2
50/70 B	29,0	42,9	57,5	69,7	77,6	82,4	85,9	88,2	87,6
50/70 D	29,2	41,7	56,5	69,7	77,8	82,5	86,0	88,2	89,5
70/100 A	41,4	55,9	67,7	74,7	79,4	83,1	86,0	89,0	90,0
70/100 B	30,9	47,4	64,4	76,5	82,9	86,1	88,3	89,8	89,8
70/100 D	34,2	48,8	63,3	73,5	79,8	83,9	86,7	88,9	89,5
F	13,5	21,9	31,0	45,1	58,3	66,6	72,1	76,8	80,9
	Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV								
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
20/30 A		30,5	40,4	50,4	59,3	66,2	72,1	77,5	82,2
20/30 E		26,6	34,2	42,9	51,9	60,1	66,8	73,3	79,2
30/45 A	25,0	35,2	45,9	55,5	63,1	69,5	75,1	80,3	84,2
30/45 C	21,7	27,2	33,2	40,1	48,1	55,3	62,6	69,3	76,0
30/45 E	24,0	30,5	37,9	45,6	53,4	60,6	67,2	73,7	79,8
50/70 A	29,0	39,7	50,8	60,1	67,3	73,1	78,5	83,1	84,2
50/70 B	23,9	33,5	44,7	55,8	65,2	72,6	78,8	83,5	86,8
50/70 D	23,1	31,8	42,1	53,7	64,1	71,9	78,5	83,4	86,5
70/100 A	31,6	42,6	53,5	62,3	69,0	74,7	80,0	84,2	86,6
70/100 B	25,1	37,3	50,4	63,5	73,5	80,0	84,4	87,3	89,2
70/100 D	26,7	36,7	48,2	59,3	68,4	75,1	80,9	84,8	88,0
F	10,9	13,2	23,7	28,7	34,1	44,9	54,5	61,7	66,6

Tabelle 21 Ausschnitt der Ergebnisse der DSR-Untersuchung: Verschiebungsfaktoren a_{Ti} [-] – 1

	Nicht gealterter Zustand oA								
	10°C auf 0°C	20°C auf 10°C	30°C auf 20°C	40°C auf 30°C	50°C auf 40°C	60°C auf 50°C	70°C auf 60°C	80°C auf 70°C	90°C auf 80°C
20/30 A	0,0275	0,0501	0,0617	0,0970	0,1358	0,1667	0,2111	0,2912	0,3378
20/30 E	0,0392	0,0496	0,0582	0,1003	0,1218	0,1746	0,2019	0,2818	0,3423
30/45 A	0,0334	0,0566	0,0792	0,1116	0,1540	0,2013	0,2552	0,2994	0,3500
30/45 C	0,0373	0,0549	0,0348	0,0938	0,1243	0,1846	0,2376	0,2902	0,3378
30/45 E	0,0420	0,0529	0,0506	0,1060	0,1336	0,1793	0,2584	0,2937	0,3592
50/70 A	0,0352	0,0640	0,0787	0,1229	0,1608	0,2084	0,2709	0,3230	0,3703
50/70 B	0,0353	0,0549	0,0444	0,1144	0,1535	0,2065	0,2744	0,3233	0,3730
50/70 D	0,0393	0,0496	0,0592	0,1118	0,1567	0,2062	0,2692	0,3167	0,3870
70/100 A	0,0418	0,0654	0,1068	0,1308	0,1804	0,2307	0,2754	0,3367	0,3955
70/100 B	0,0318	0,0562	0,0611	0,1231	0,1659	0,2301	0,2811	0,3383	0,3949
70/100 D	0,0389	0,0565	0,0643	0,1294	0,1627	0,2270	0,2884	0,3419	0,3919
F	0,0364	0,0443	0,0414	0,0880	0,0104	0,1452	0,1788	0,2528	0,3085
	RFT-gealterter Zustand RFT								
	10°C auf 0°C	20°C auf 10°C	30°C auf 20°C	40°C auf 30°C	50°C auf 40°C	60°C auf 50°C	70°C auf 60°C	80°C auf 70°C	90°C auf 80°C
20/30 A	0,0315	0,0441	0,0678	0,0899	0,1318	0,1560	0,2235	0,2613	0,3373
20/30 E	0,0288	0,0468	0,0656	0,0825	0,1291	0,1526	0,2118	0,2601	0,3068
30/45 A	0,0307	0,0525	0,0815	0,0866	0,1503	0,1641	0,2538	0,2971	0,3424
30/45 C	0,0365	0,0512	0,0601	0,0704	0,1443	0,1565	0,2211	0,2579	0,3103
30/45 E	0,0374	0,0508	0,0664	0,0837	0,1510	0,1540	0,2154	0,2729	0,3364
50/70 A	0,0392	0,0599	0,0849	0,1190	0,1650	0,1883	0,2637	0,3057	0,3605
50/70 B	0,0311	0,0492	0,0676	0,0860	0,1676	0,1693	0,2640	0,2909	0,4067
50/70 D	0,0341	0,0446	0,0607	0,0847	0,1719	0,1727	0,2590	0,3177	0,3687
70/100 A	0,0473	0,0625	0,0977	0,1218	0,1775	0,2041	0,2875	0,3287	0,4125
70/100 B	0,0314	0,0486	0,0695	0,0946	0,1762	0,1936	0,2750	0,3060	0,4042
70/100 D	0,0379	0,0528	0,0775	0,1275	0,1722	0,2348	0,2809	0,3246	0,3896
F	0,0372	0,0403	0,0391	0,0525	0,0893	0,1020	0,1494	0,2060	0,2561
	Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV								
	10°C auf 0°C	20°C auf 10°C	30°C auf 20°C	40°C auf 30°C	50°C auf 40°C	60°C auf 50°C	70°C auf 60°C	80°C auf 70°C	90°C auf 80°C
20/30 A	0,0180	0,0455	0,0636	0,0650	0,1133	0,1297	0,1904	0,2356	0,2924
20/30 E	0,0150	0,0298	0,0534	0,0660	0,1062	0,1257	0,1701	0,2156	0,2329
30/45 A	0,0343	0,0469	0,0739	0,0934	0,1280	0,1587	0,2075	0,2427	0,2789
30/45 C	0,0352	0,0459	0,0528	0,0491	0,1085	0,1106	0,1776	0,2055	0,2652
30/45 E	0,0352	0,0436	0,0631	0,0616	0,1100	0,1169	0,1877	0,2430	0,2728
50/70 A	0,0397	0,0508	0,0784	0,0890	0,1373	0,1563	0,2204	0,5740	0,2789
50/70 B	0,0332	0,0428	0,0648	0,0686	0,1294	0,1403	0,2175	0,2631	0,3031
50/70 D	0,0304	0,0417	0,0560	0,0729	0,1273	0,1377	0,2057	0,2417	0,2979
70/100 A	0,0416	0,0550	0,0807	0,0944	0,1440	0,1634	0,2301	0,2730	0,3555
70/100 B	0,0287	0,0492	0,0648	0,0892	0,1372	0,1750	0,2255	0,2868	0,3247
70/100 D	0,0342	0,0477	0,0685	0,0765	0,1439	0,1510	0,2232	0,2830	0,3526
F	0,0120	0,0244	0,0427	0,0536	0,0763	0,0631	0,1361	0,1832	0,2120

Tabelle 22 Ausschnitt der Ergebnisse der DSR-Untersuchung: Verschiebungsfaktoren a_{Ti} [-] – 2

	Nicht gealterter Zustand oA								
	0°C auf 10°C	10°C auf 20°C	20°C auf 30°C	30°C auf 40°C	40°C auf 50°C	50°C auf 60°C	60°C auf 70°C	70°C auf 80°C	80°C auf 90°C
20/30 A	36,545	19,901	16,283	10,294	7,378	6,008	4,736	3,436	2,956
20/30 E	25,490	20,270	17,281	9,978	8,221	5,726	4,951	3,549	2,920
30/45 A	30,034	17,739	12,678	8,955	6,502	4,970	3,921	3,343	2,855
30/45 C	26,916	18,268	28,851	10,695	8,031	5,404	4,200	3,447	2,960
30/45 E	23,931	18,939	19,999	9,430	7,518	5,586	3,868	3,406	2,784
50/70 A	28,556	15,720	12,761	8,117	6,225	4,805	3,690	3,092	2,704
50/70 B	28,414	18,279	22,675	8,737	6,520	4,842	3,643	3,090	2,682
50/70 D	25,483	20,237	17,016	8,944	6,390	4,849	3,714	3,159	2,584
70/100 A	23,880	15,291	9,365	7,648	5,551	4,335	3,627	2,962	2,531
70/100 B	31,675	17,885	16,431	8,110	6,028	4,347	3,552	2,957	2,513
70/100 D	25,769	17,840	15,600	7,722	6,147	4,403	3,466	2,925	2,552
F	704,092	192,273	69,641	19,424	98,217	8,291	7,131	4,542	3,768
	RFT-gealterter Zustand RFT								
	0°C auf 10°C	10°C auf 20°C	20°C auf 30°C	30°C auf 40°C	40°C auf 50°C	50°C auf 60°C	60°C auf 70°C	70°C auf 80°C	80°C auf 90°C
20/30 A	31,750	22,689	14,763	11,117	7,581	6,419	4,475	3,828	2,964
20/30 E	34,604	21,335	15,237	12,110	7,725	6,563	4,729	3,850	3,261
30/45 A	32,507	19,032	12,289	11,529	6,641	6,112	3,948	3,364	2,919
30/45 C	27,325	19,597	16,733	14,233	6,961	6,409	4,532	3,876	3,221
30/45 E	26,726	19,736	15,148	11,936	6,634	6,519	4,646	3,665	2,971
50/70 A	25,441	16,749	11,777	8,403	6,042	5,298	3,792	3,274	2,772
50/70 B	32,028	20,374	14,806	11,610	5,963	5,907	3,787	3,437	2,524
50/70 D	29,257	22,445	16,510	11,793	5,812	5,793	3,859	3,148	2,708
70/100 A	21,137	16,031	10,219	8,196	5,629	4,901	3,481	3,084	2,447
70/100 B	31,753	20,676	14,382	10,549	5,658	5,161	3,633	3,228	2,460
70/100 D	26,342	18,958	12,845	7,801	5,795	4,269	3,558	3,080	2,556
F	26,900	23,995	25,537	18,945	11,205	9,778	6,714	4,868	3,912
	Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV								
	0°C auf 10°C	10°C auf 20°C	20°C auf 30°C	30°C auf 40°C	40°C auf 50°C	50°C auf 60°C	60°C auf 70°C	70°C auf 80°C	80°C auf 90°C
20/30 A	9,302	21,997	15,762	15,335	8,782	7,684	5,267	4,254	3,418
20/30 E	53,659	22,271	18,779	15,070	9,410	7,931	5,855	4,611	4,294
30/45 A	29,141	21,403	13,570	10,717	7,798	6,314	4,822	4,123	3,585
30/45 C	28,436	21,784	18,948	20,460	9,224	9,053	5,647	4,868	3,775
30/45 E	28,350	22,998	15,916	16,281	9,110	8,562	5,356	4,127	3,666
50/70 A	25,045	19,689	12,793	11,239	7,281	6,407	4,542	1,741	3,585
50/70 B	29,933	23,299	15,444	14,586	7,711	7,122	4,602	3,800	3,325
50/70 D	32,749	23,989	17,906	13,761	7,854	7,275	4,863	4,141	3,352
70/100 A	23,913	18,203	12,424	10,586	6,936	6,113	4,351	3,665	2,811
70/100 B	34,825	20,371	15,463	11,195	7,278	5,715	4,435	3,488	3,078
70/100 D	29,064	21,012	14,628	13,074	6,938	6,636	4,483	3,534	2,886
F	48,000	24,292	22,915	18,650	13,078	15,829	7,349	5,479	4,725

Tabelle 23 Ausschnitt der Ergebnisse der DSR-Untersuchung: Materialkonstante c_1 [-]

	Nicht gealterter Zustand oA									
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
20/30 A	43,7	40,24	37,52	32,11	29,20	27,08	23,7	19,89	18,48	17,35
20/30 E	49,13	45,26	40,03	33,12	31,19	26,75	24,93	20,59	18,57	17,3
30/45 A	39,46	36,04	33,02	29,36	26,10	23,50	21,32	19,97	18,55	17,41
30/45 C	49,84	46,34	42,27	28,19	26,03	22,40	20,49	18,92	17,72	16,66
30/45 E	46,75	42,86	37,69	28,53	26,75	23,13	19,60	18,77	17,06	15,87
50/70 A	37,83	34,59	32,05	27,37	24,98	22,18	19,55	18,05	16,87	15,92
50/70 B	41,41	37,81	33,86	24,20	22,60	20,12	17,86	16,74	15,64	14,69
50/70 D	41,27	37,36	32,15	25,67	23,24	20,89	18,59	17,22	15,47	14,33
70/100 A	35,54	32,24	29,15	27,47	23,90	21,62	19,86	17,66	16,06	15,02
70/100 B	36,78	33,20	29,87	23,53	21,57	19,04	17,62	16,10	14,82	13,68
70/100 D	37,92	34,27	30,04	23,81	22,27	19,22	17,36	16,08	15,00	14,08
F	99,28	51,47	46,28	42,74	50,78	22,37	22,03	19,05	17,78	16,61
	RFT-gealterter Zustand RFT									
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
20/30 A	46,31	42,39	37,93	33,13	30,31	28,22	23,59	22,00	19,36	17,88
20/30 E	47,07	43,55	40,34	34,75	31,00	29,31	24,98	22,93	21,38	20,16
30/45 A	42,14	38,79	36,00	32,92	26,94	25,86	20,46	19,36	18,22	17,19
30/45 C	50,67	47,11	42,92	34,73	27,85	28,20	24,10	22,89	21,14	19,83
30/45 E	48,24	44,53	40,06	33,27	28,72	29,56	24,34	21,50	19,34	17,99
50/70 A	39,93	36,52	33,05	30,06	26,69	25,16	20,89	19,63	18,10	16,95
50/70 B	41,48	37,85	34,10	29,05	23,73	24,03	18,98	18,02	14,84	13,98
50/70 D	42,70	38,72	33,61	27,88	22,74	23,32	18,73	17,05	15,86	14,84
70/100 A	38,19	34,72	30,70	29,46	24,20	22,50	18,43	17,17	15,11	14,09
70/100 B	38,96	35,25	31,25	27,51	21,99	21,78	18,33	17,42	14,77	13,4
70/100 D	36,62	32,92	28,62	26,62	22,32	19,92	18,81	17,6	15,93	14,71
F	77,77	72,9	65,43	50,9	41,36	39,33	32,20	27,83	25,47	23,95
	Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV									
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
20/30 A	47,84	124,38	61,26	50,00	37,66	35,32	28,61	26,00	23,61	22,1
20/30 E	49,43	48,92	48,96	43,96	37,26	35,89	31,44	29,06	28,81	28,01
30/45 A	48,21	44,45	40,21	36,48	33,99	31,50	28,17	26,86	25,54	24,31
30/45 C	67,31	63,75	59,38	44,27	36,44	37,13	29,53	28,3	25,51	23,83
30/45 E	59,72	55,79	50,63	47,66	36,42	35,08	27,08	24,48	23,61	22,57
50/70 A	44,08	40,39	35,69	32,00	26,32	23,05	16,53	8,80	11,22	16,45
50/70 B	51,02	47,11	42,14	35,92	30,09	29,39	23,57	22,04	20,89	20,00
50/70 D	51,39	47,48	42,76	34,64	31,21	30,97	25,52	24,12	22,07	20,61
70/100 A	46,55	43,05	38,89	34,86	30,20	28,61	23,62	21,57	18,68	17,18
70/100 B	43,6	40,11	37,04	32,10	27,72	25,54	22,78	20,43	19,38	18,36
70/100 D	47,26	43,63	39,37	33,69	28,00	27,84	22,3	19,72	17,61	16,72
F	60,97	65,73	73,41	65,47	57,78	57,27	35,50	31,82	30,56	29,32

Tabelle 24 Ausschnitt der Ergebnisse der DSR-Untersuchung: Materialkonstante c_2 [-]

	Nicht gealterter Zustand oA									
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
20/30 A	43,7	40,24	37,52	32,11	29,20	27,08	23,7	19,89	18,48	17,35
20/30 E	49,13	45,26	40,03	33,12	31,19	26,75	24,93	20,59	18,57	17,3
30/45 A	39,46	36,04	33,02	29,36	26,10	23,50	21,32	19,97	18,55	17,41
30/45 C	49,84	46,34	42,27	28,19	26,03	22,40	20,49	18,92	17,72	16,66
30/45 E	46,75	42,86	37,69	28,53	26,75	23,13	19,60	18,77	17,06	15,87
50/70 A	37,83	34,59	32,05	27,37	24,98	22,18	19,55	18,05	16,87	15,92
50/70 B	41,41	37,81	33,86	24,20	22,60	20,12	17,86	16,74	15,64	14,69
50/70 D	41,27	37,36	32,15	25,67	23,24	20,89	18,59	17,22	15,47	14,33
70/100 A	35,54	32,24	29,15	27,47	23,90	21,62	19,86	17,66	16,06	15,02
70/100 B	36,78	33,20	29,87	23,53	21,57	19,04	17,62	16,10	14,82	13,68
70/100 D	37,92	34,27	30,04	23,81	22,27	19,22	17,36	16,08	15,00	14,08
F	99,28	51,47	46,28	42,74	50,78	22,37	22,03	19,05	17,78	16,61
	RFT-gealterter Zustand RFT									
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
20/30 A	46,31	42,39	37,93	33,13	30,31	28,22	23,59	22,00	19,36	17,88
20/30 E	47,07	43,55	40,34	34,75	31,00	29,31	24,98	22,93	21,38	20,16
30/45 A	42,14	38,79	36,00	32,92	26,94	25,86	20,46	19,36	18,22	17,19
30/45 C	50,67	47,11	42,92	34,73	27,85	28,20	24,10	22,89	21,14	19,83
30/45 E	48,24	44,53	40,06	33,27	28,72	29,56	24,34	21,50	19,34	17,99
50/70 A	39,93	36,52	33,05	30,06	26,69	25,16	20,89	19,63	18,10	16,95
50/70 B	41,48	37,85	34,10	29,05	23,73	24,03	18,98	18,02	14,84	13,98
50/70 D	42,70	38,72	33,61	27,88	22,74	23,32	18,73	17,05	15,86	14,84
70/100 A	38,19	34,72	30,70	29,46	24,20	22,50	18,43	17,17	15,11	14,09
70/100 B	38,96	35,25	31,25	27,51	21,99	21,78	18,33	17,42	14,77	13,4
70/100 D	36,62	32,92	28,62	26,62	22,32	19,92	18,81	17,6	15,93	14,71
F	77,77	72,9	65,43	50,9	41,36	39,33	32,20	27,83	25,47	23,95
	Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV									
	0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C
20/30 A	47,84	124,38	61,26	50,00	37,66	35,32	28,61	26,00	23,61	22,1
20/30 E	49,43	48,92	48,96	43,96	37,26	35,89	31,44	29,06	28,81	28,01
30/45 A	48,21	44,45	40,21	36,48	33,99	31,50	28,17	26,86	25,54	24,31
30/45 C	67,31	63,75	59,38	44,27	36,44	37,13	29,53	28,3	25,51	23,83
30/45 E	59,72	55,79	50,63	47,66	36,42	35,08	27,08	24,48	23,61	22,57
50/70 A	44,08	40,39	35,69	32,00	26,32	23,05	16,53	8,80	11,22	16,45
50/70 B	51,02	47,11	42,14	35,92	30,09	29,39	23,57	22,04	20,89	20,00
50/70 D	51,39	47,48	42,76	34,64	31,21	30,97	25,52	24,12	22,07	20,61
70/100 A	46,55	43,05	38,89	34,86	30,20	28,61	23,62	21,57	18,68	17,18
70/100 B	43,6	40,11	37,04	32,10	27,72	25,54	22,78	20,43	19,38	18,36
70/100 D	47,26	43,63	39,37	33,69	28,00	27,84	22,3	19,72	17,61	16,72
F	60,97	65,73	73,41	65,47	57,78	57,27	35,50	31,82	30,56	29,32

2.4. Alterungsverfahren - Masseänderung infolge der RFT-Alterung

In Tabelle 25 sind die Masseänderungen infolge der RFT-Alterung zusammengefasst.

Tabelle 25 Masseänderungen der Bitumenproben infolge der RFT-Alterung

	Massenänderung infolge RFT-Alterung [M.-%]
20/30 A	-0,004
20/30 E	-0,021
30/45 A	-0,034
30/45 C	-0,038
30/45 E	0,000
50/70 A	-0,021
50/70 B	-0,017
50/70 D	0,141
70/100 A	-0,008
70/100 B	-0,021
70/100 D	-0,008
F	0,313

2.5. Untersuchungen der Gesteine

Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse sind in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26 Ergebnisse der RFA an den Gesteinen

	Quarzit [M.-%]	Granodiorit [M.-%]	Diabas [M.-%]	Kalkstein [M.-%]
SiO ₂	89,63	62,48	43,27	1,62
Al ₂ O ₃	3,03	12,15	12,02	0,23
Fe ₂ O ₃	0,69	4,11	9,08	0,19
MgO	0,06	1,52	6,57	1,34
CaO	<0,10	1,51	7,3	54,03
Na ₂ O	<0,10	2,6	2,7	< 0,20
P ₂ O ₅	<0,05	0,13	0,18	< 0,05
TiO ₂	0,19	0,5	1,33	< 0,03
K ₂ O	0,76	3,02	0,88	0,07
SO ₃	<0,05	0,11	<0,05	/

Röntgendiffraktometrie (XRD)

In Tabelle 27 sind die in den Gesteinen identifizierten Phasen sowie die dazugehörigen Gehalte aufgeführt.

Tabelle 27 Phasen und dazugehörige Gehalte der untersuchten Gesteine

	Quarzit [%]	Granodiorit [%]	Diabas [%]	Kalkstein [%]
Quarz	95,60%	37,30%		0,80%
Augit			13,80%	
Klinochlor		7,70%	8,20%	
Hornblende			28,70%	
Biotit	0,40%	2,90%	1,40%	
Muskovit	3,10%			
Albit (Natronfeldspat)		27,50%	47,30%	
Anorthit		12,20%		
Mikroklin	0,90%	12,40%		
Calcit			0,60%	92,60%
Dolomit				6,50%
Siderit				0,10%

Bestimmung des Zeta-Potentials

Die Ergebnisse der Zeta-Potential-Messungen sind in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28 Ergebnisse der Zeta-Potential-Messung

	Quarzit	Granodiorit	Diabas	Kalkstein
ZP bei natürlichem pH [mV]	-9,52	-42,00	-39,85	5,32
Natürlicher pH [-]	9,8	10,2	10,1	9,2
Isoelektrischer Punkt IEP [-]	4,3	5,0	5,6	14,0

2.6. Untersuchungen zum Haftverhalten

Rolling Bottle Test

Die Ergebnisse des Rolling Bottle Test sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

Tabelle 29 Ergebnisse der Affinitätsprüfung

	Umhüllungsgrad [%]							
	Quarzit		Granodiorit		Diabas		Kalkstein	
	6 h	24 h	6 h	24 h	6 h	24 h	6 h	24 h
	Nicht gealterter Zustand oA							
20/30-A	50	45	80	60	85	70	90	80
20/30-E	55	40	80	60	90	70	80	75
30/45-A	50	35	75	55	90	60	90	80
30/45-C	40	20	85	55	85	60	90	65
30/45-E	60	35	80	75	80	70	85	70
50/70-A	50	10	80	50	80	60	95	80
50/70-B	50	20	75	50	75	65	75	55
50/70-D	25	5	70	50	85	60	80	60
70/100-A	40	5	75	50	85	55	95	80
70/100-B	45	20	70	50	80	50	65	40
70/100-D	20	5	70	25	65	35	80	50
	RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV							
20/30-A	45	25	65	45	75	60	90	85
20/30-E	55	35	75	50	80	65	80	65
30/45-A	50	20	85	45	75	60	90	85
30/45-C	45	20	70	55	80	55	85	70
30/45-E	60	30	80	45	70	60	80	70
50/70-A	55	20	70	50	85	55	90	85
50/70-B	60	20	55	40	80	50	70	65
50/70-D	55	35	75	55	80	50	80	70
70/100-A	40	15	65	45	70	50	90	85
70/100-B	65	25	85	45	75	50	85	65
70/100-D	55	35	70	50	75	50	80	75

Direkte Zugversuche

In Tabelle 30 sind die Ergebnisse der direkten Zugversuche dargestellt. Die weiteren Messwerte der Zugversuche in Form der Messkurven sind auf der beigefügten CD enthalten.

Tabelle 30 Ergebnisse der direkten Zugversuche

	Nicht gealterter Zustand oA		Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV		Nicht gealterter Zustand oA		Kombinierter RFT- und PAV-gealterter Zustand RFT+PAV	
	$\beta_{t, \text{drv}}$ [MPa]	$\beta_{t, \text{wet}}$ [MPa]	$\beta_{t, \text{drv}}$ [MPa]	$\beta_{t, \text{wet}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{Ausfall, drv}}$ [%]	$\epsilon_{\text{Ausfall, wet}}$ [%]	$\epsilon_{\text{Ausfall, drv}}$ [%]	$\epsilon_{\text{Ausfall, wet}}$ [%]
	50/70 A							
Quarzit	0,49	0,55	0,65	0,82	0,79%	0,58%	0,58%	0,39%
Granodiorit	0,38	0,42	0,50	0,82	0,71%	0,69%	0,55%	0,33%
Diabas	0,44	0,50	0,63	0,75	0,66%	0,66%	0,40%	0,46%
Kalkstein	0,56	0,51	0,76	0,96	0,63%	0,74%	0,48%	0,39%
	50/70 B							
Quarzit	0,70	0,96	1,07	0,95	0,58%	0,52%	0,40%	0,47%
Granodiorit	0,79	0,83	1,13	1,08	0,50%	0,51%	0,32%	0,39%
Diabas	0,68	0,79	0,99	0,10	0,50%	0,60%	0,36%	0,45%
Kalkstein	0,93	0,84	1,13	1,20	0,55%	0,45%	0,44%	0,35%
	50/70 D							
Quarzit	0,75	0,66	0,99	0,75	0,57%	0,69%	0,45%	0,62%
Granodiorit	0,64	0,71	0,82	0,84	0,53%	0,51%	0,42%	0,39%
Diabas	0,68	0,80	0,83	0,93	0,50%	0,51%	0,43%	0,40%
Kalkstein	0,80	0,65	0,95	0,71	0,48%	0,41%	0,41%	0,37%