

**Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Beton
aus dem Schlusssentwurf prEN 1992-1-2 Fassung
10/02 durch Vergleich von berechneten und
gemessenen Temperaturen**

T 3075

T 3075

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6845-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de

SCHLUSSBERICHT

**Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Beton
aus dem Schlussentwurf prEN 1992-1-2 Fassung 10/02
durch Vergleich von berechneten
und gemessenen Temperaturen**

Aktenzeichen P 32-5-7.225-1047/03

Im Auftrag des
Deutschen Instituts für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 L, 10829 Berlin

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser
Dr.-Ing. Ekkehard Richter
cand. ing. A. Wöckener

Oktober 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort.....	4
2	Zusammenstellung von Versuchsergebnissen.....	5
2.1	Vorbemerkungen	5
2.2	Durchlaufplatte	6
2.3	Balken mit Rechteckquerschnitt.....	8
2.4	Stützen.....	13
2.5	Wände.....	15
3	Rechengrundlagen.....	17
3.1	Vorbemerkungen	17
3.2	Thermische Analyse	17
3.3	Thermische Einwirkungen.....	19
3.3.1	Allgemeines	19
3.3.2	Konvektion (Wärmemitführung).....	22
3.3.3	Wärmestrahlung (Radiation).....	22
3.4	Temperaturabhängige thermische Materialeigenschaften	24
3.4.1	Allgemeines	24
3.4.2	Wärmeleitfähigkeit	26
3.4.3	Dichte.....	28
3.4.4	Spezifische Wärmekapazität	29
4	Vergleich der Temperaturen	31
4.1	Vorbemerkungen	31
4.2	Berechnung der Temperaturen.....	31
4.2.1	Rechengrundlagen	31
4.2.2	Wärmeleitfähigkeit nach prEN 1992-1-2.....	32
4.3	Vergleich der Temperaturen	33
4.3.1	Allgemeines	33
4.3.2	Durchlaufplatte $d = 10$ cm.....	33
4.3.3	Balken $b/d = 20/40$ cm.....	36
4.3.4	Balken $b/d = 10/40$ cm.....	39
4.3.5	Stütze $b/d = 30/30$ cm.....	42
4.3.6	Stütze $b/d = 20/20$ cm.....	44
4.3.7	Balken $b/d = 20/40$ cm („trocken“)	46
4.3.8	Balken $b/d = 10/40$ cm („trocken“)	48
4.3.9	Wand $d = 10$ cm	51
4.3.10	Wand $d = 15$ cm	53
4.4	Zusammenfassung	55
5	Brandschutztechnische Bemessung	58
5.1	Vorbemerkungen	58
5.2	STABA-F.....	58
5.3	Berechnung der Feuerwiderstandsdauer.....	59
5.3.1	Allgemeines	59

5.3.2	Stützen.....	59
5.3.3	Balken.....	62
5.3.4	Raumabschluss	66
6	Zusammenfassung	67
7	Literatur.....	69
Anhänge	71
	Anhang A Gemessene Temperaturen	
	Anhang B Berechnete Temperaturen	
	Anhang C Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen	
	Anhang D Temperaturfelder	

1 VORWORT

Im Mai 1997 wurde vom DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) die deutsche Fassung der europäischen Vornorm ENV 1992-1-2: 1995 veröffentlicht und in Verbindung mit dem Nationalen Anwendungsdokument [2, S.IX] zur probeweisen Anwendung freigegeben. Parallel dazu wurde in einem Forschungsvorhaben des DIBt durch Vergleichsrechnungen von repräsentativen Stahlbeton-, Stahl-, Verbund- und Holzbauteilen nachgewiesen, „*dass mit den brandschutztechnischen Bemessungsregeln des Eurocodes 2 Teil 1-2 im Mittel das gleiche Sicherheitsniveau erreicht wird wie mit den Brandschutznachweisen der DIN 4102 Teil 4*“ [5, S.2-1].

Nach Ablauf der dreijährigen Laufzeit wurde die Vornorm überarbeitet, um die Kommentare, Einwände und Korrekturvorschläge, die sich nach der probeweisen Anwendung in Europa ergeben haben, zu berücksichtigen. Damit wurde aus der ENV-Fassung eine sogenannte prEN-Fassung (Entwurf europäischer Norm), die längerfristig die Grundlage für die harmonisierte europäische Norm EN („Weißdruck“) darstellt.

Im Rahmen der Entwurfsarbeiten für die prEN-Fassung wurden die Rechengrundlagen für die thermische Analyse, d.h. für die Ermittlung der Temperaturentwicklung im Bauteilquerschnitt, überarbeitet. Die Funktionen zur Beschreibung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärmekapazität) wurden im Schlusssentwurf prEN 1992-1-2 (Fassung Oktober 2002) anders formuliert, als in der Vornorm ENV 1992-1-2: 1995. Dabei wurden für die Wärmeleitfähigkeit von Beton eine obere und eine untere Grenzfunktion genannt, zwischen denen eine national anzuwendende Funktion definiert werden muss.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben soll ein Vorschlag für die Festlegung einer solchen Funktion erarbeitet werden.

Dafür sollen zunächst mit Hilfe von umfangreichen Vergleichsrechnungen die Auswirkungen hinsichtlich der berechneten Temperaturen in einem Betonquerschnitt festgestellt und beurteilt werden, die durch die veränderten thermischen Materialkennwerte verursacht werden. Als Beurteilungskriterium soll der Vergleich mit Temperaturen dienen, die mit den thermischen Materialkennwerten aus dem Vorentwurf ENV 1992-1-2, Fassung 1997 berechnet werden und mit Temperaturen, die im Normbrandversuch gemessenen wurden. In die Untersuchungen sollen ein-, drei- und vierseitig brandbeanspruchte Querschnitte einbezogen werden. Da am iBMB seit über 40 Jahren Brandversuche an Balken, Stützen, Wänden und Decken durchgeführt werden, kann davon ausgegangen werden, dass zur Auswertung eine

große Anzahl von ausreichend dokumentierten Versuchsdaten zur Verfügung steht. Außerdem werden die Brandversuche am iBMB seit vielen Jahren systematisch durch rechnerische Analysen begleitet.

Aus dem Vergleich zwischen repräsentativen Messergebnissen und berechneten Temperaturen soll der temperaturabhängige Verlauf für die Wärmeleitfähigkeit von Beton festgelegt werden, der in Verbindung mit der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte aus prEN 1992-1-2 (07/02) eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen sicherstellt und im Nationalen Anhang als maßgebende Funktion für die Wärmeleitfähigkeit übernommen werden kann.

In einem letzten Arbeitsschritt sollen dann einige hochbautypische Stahlbetonbauteile mit den thermischen Materialkennwerten nach ENV 1992-1-2 (05/97) und den überarbeiteten thermischen Materialkennwerten nach prEN 1992-1-2 (10/02) berechnet und die Ergebnisse miteinander verglichen werden. Hierzu soll das Computerprogramm STABA-F verwendet werden.

In der Forschungsarbeit wird die deutsche Fassung der ENV 1992-1-2 : 1995, d. h. die DIN V ENV 1992-1-2 (Ausgabe Mai 1997) und die englische Fassung des Schlusssentwurfes prEN 1992-1-2 (Ausgabe Oktober 2002) verwendet. Das Ausgabedatum wird im Folgenden nicht an jeder Stelle angefügt, sondern vereinfachend lediglich ENV 1992-1-2 und prEN 1992-1-2 genannt.

2 ZUSAMMENSTELLUNG VON VERSUCHSERGEBNISSEN

2.1 Vorbemerkungen

In diesem Abschnitt werden Versuchsergebnisse hinsichtlich der Temperaturentwicklung in verschiedenen Stahlbetonbauteilen zusammengestellt. Die hierfür zugrunde liegenden Brandversuche wurden weitgehend zwischen 1960 und 1980 am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt und dienen als Grundlage für die Ermittlung von Bemessungsverfahren für das Tragverhalten von Bauteilen unter Brandbeanspruchungen [Vorwort zu 3, 7, 11], [14, S.2], [8, S.2]. Bei den Bauteilen handelt es sich um eine Durchlaufplatte, zwei Balken mit Rechteckquerschnitt sowie zwei quadratische Stützen. Anschließend werden die Temperaturverteilungen in zwei Wänden zahlenmäßig dargestellt. Die Temperaturen hierfür werden aus Isothermenbildern in [9, S.67] entnommen.

Streuungen bei den gemessenen Temperaturen können durch den zulässigen Toleranzbereich der Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102 – Teil 2 (Bild 2.1), durch die Messun-

genauigkeiten der verwendeten Thermolemente (in [7, S.7] mit einem mittleren Fehler von 20 – 25°C angegeben), sowie durch die Ungenauigkeit beim Ablesen der Temperatur-Zeit-Diagramme bzw. Isothermenbilder auftreten.

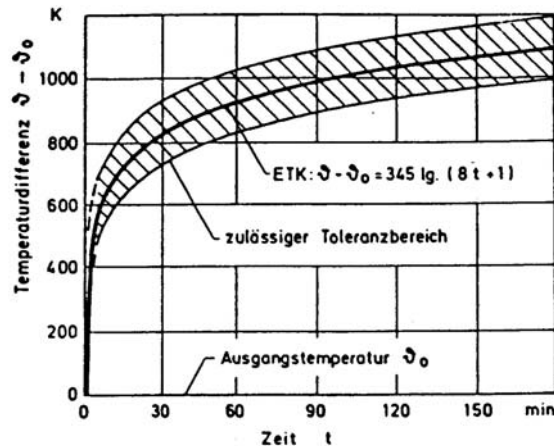


Bild 2.1: Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102 Teil 2 (09/1977) (aus [4])

2.2 Durchlaufplatte

Die ausgewerteten Temperatur-Zeit-Verläufe stammen aus [8]. Sie wurden an einer über zwei Felder durchlaufenden Stahlbetonplatte (in [8] Platte 2) gemessen (Bild 2.2 und 2.3). Die für die Ermittlung der Temperaturen im Bauteilquerschnitt wichtigen Materialeigenschaften und Versuchsrandbedingungen sind im Folgenden stichpunktartig zusammengefasst:

Geometrie:

- Querschnitt b/d [cm]: 100/10 [8, S.5, Tab.2]
- Plattenlänge [m]: 8,0 [8, S.5, Tab.2]

Baustoff Beton:

- Zuschlag und Dichte: keine genauen Angaben
- mittlere Betonfeuchtigkeit: 3,58 Gew.-% [8, S.11, Tab.6]

Thermische Randbedingungen:

- Beflammung der Plattenunterseite mit ETK nach DIN 4102-2 [8, S.12]
- Anfangstemperatur 20°C [8, Anlage 2.3.1]

Messung der Temperaturen:

- im Brandraum mit NiCr-Ni-Thermolementen [8, S.13]
- im Betonquerschnitt mit Fe-Konst.-Thermolementen [8, S.13]

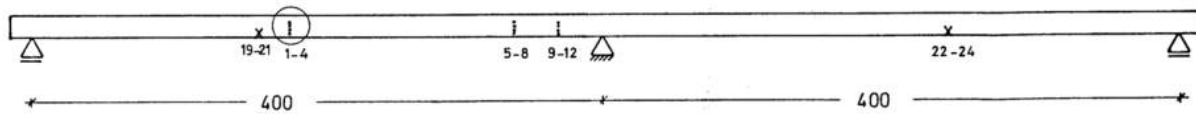


Bild 2.2: Stahlbetondurchlaufplatte 2 aus [8, Anlage 2.2], Messstelle 1-4: ausgewertet

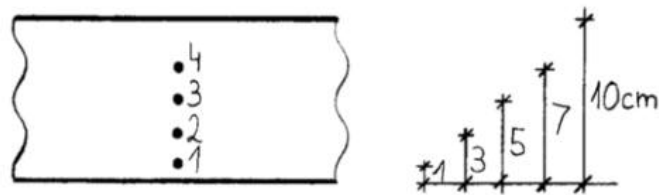


Bild 2.3: Lage der Messstellen im Bauteilquerschnitt (nach [8, Anlage 2.2])

Die Temperaturen im Bauteilquerschnitt werden der Anlage 2.3.1 in [8] (vgl. Anhang A.1) entnommen und an dieser Stelle tabellarisch dargestellt.

Tabelle 2.1: Gemessene Temperaturen (Einzelmessung) in der Stahlbetondurchlaufplatte (vgl. Anhang A.1)

Zeit [min]	Punkt 1 [°C]	Punkt 2 [°C]	Punkt 3 [°C]	Punkt 4 [°C]
0	20	20	20	20
10	220	110	60	45
20	360	170	110	100
30	460	245	125	120
40	545	305	160	120
50	605	370	205	130
60	665	420	245	150
70	700	460	280	175
80	745	495	310	205
90	770	530	350	235

2.3 Balken mit Rechteckquerschnitt

In [7] wird über experimentelle Untersuchungen an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung berichtet. Aus der Vielzahl der untersuchten Querschnitte werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse von zwei Rechteckquerschnitt gegenübergestellt. Auch hier werden nur die für die Ermittlung der Temperaturentwicklung im Bauteilquerschnitt wichtigen Materialeigenschaften und Versuchsrandbedingungen stichpunktartig zusammengefasst:

Geometrie:

- Querschnitt b/d [cm]: Balken 1: 20/40 Balken 2: 10/40
- Balkenlänge [m]: 4,5

Baustoff Beton:

- Zuschlag: Rheinkies (quarzitisch) [7, S.5, Tafel 3]
- Dichte [kg/m³]: 2300 – 2350 [7, S.5, Tafel 3]
- mittlere Betonfeuchtigkeit: zwischen 3,0 und 4,0 Gew.-% [7, S.9]
bzw. ohne Baustofffeuchte („trocken“) [7, S.9]

Thermische Randbedingungen:

- 3-seitige Beflammung der Balken (seitlich und unten) [7, S.5]
- Brandbeanspruchung gemäß Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102-2 [7, S.6]
- Anfangstemperatur 10°C [7, S.8]

Messung der Temperaturen:

- im Brandraum mit NiCr-Ni-Thermoelementen [7, S.6]
- im Betonquerschnitt mit Fe-Konst.-Thermoelementen [7, S.6]

In Bild 2.4 sind die einzelnen Messstellen nach ihrer Lage im Querschnitt entsprechend eingezeichnet und nummeriert. Die zugehörigen Temperaturen werden den in [3] dargestellten Temperatur-Zeit-Diagrammen entnommen (vgl. Anhang A.2 – A.7) und in den Tabellen 2.2 bis 2.8 zahlenmäßig zusammengestellt.

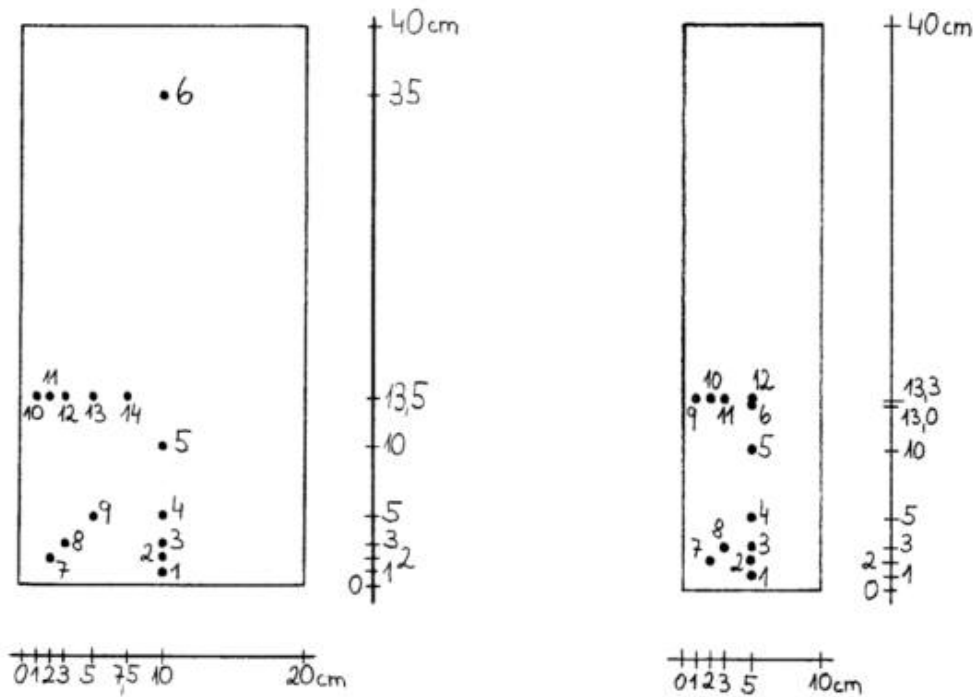


Bild 2.4: Lage der Messstellen in den Rechteckquerschnitten (nach Anhang A.2 – A.7), links Balken 1, rechts Balken 2

Tabelle 2.2: Gemessene Temperaturen in Balken 1, feucht (vgl. Anhang A.2)

Zeit [min]	Punkt 1 [°C]	Punkt 2 [°C]	Punkt 3 [°C]	Punkt 4 [°C]	Punkt 5 [°C]	Punkt 6 [°C]
0	10	10	10	10	10	10
5	90	30	15	10	10	10
10	195	100	50	20	10	10
15	285	165	95	30	15	10
20	350	220	140	50	20	10
25	400	270	180	70	25	15
30	460	315	220	95	30	20
40	560	400	300	150	60	40
50	630	475	370	210	95	60
60	680	525	430	265	135	85
70	730	595	495	320	170	120
80	770	635	535	365	215	160
90	810	675	590	420	255	200

Tabelle 2.3: Gemessene Temperaturen in Balken 1, feucht (vgl. Anhang A.3)

Zeit [min]	Punkt 7 [°C]	Punkt 8 [°C]	Punkt 9 [°C]
0	10	10	10
5	60	35	10
10	160	100	20
15	250	185	40
20	320	245	65
25	380	290	100
30	440	350	140
40		450	210
50		540	280
60		605	345
70		660	400
80		720	460
90		745	525

Tabelle 2.4: Gemessene Temperaturen in Balken 1, feucht (vgl. Anhang A.3)

Zeit [min]	Punkt 10 [°C]	Punkt 11 [°C]	Punkt 12 [°C]	Punkt 13 [°C]	Punkt 14 [°C]
0	10	10	10	10	10
5	115	35	20	10	10
10	195	100	50	20	10
15	260	155	90	30	20
20	315	200	120	45	25
25	365	240	155	65	30
30	410	280	190	85	40
40	490	365	255	135	65
50	560	420	310	185	105
60	610	475	355	230	140
70	655	530	400	270	175
80	695	570	450	310	210
90	735	610	505	350	250

Tabelle 2.5: Gemessene Temperaturen in Balken 2, feucht (vgl. Anhang A.4)

Zeit [min]	Punkt 1 [°C]	Punkt 2 [°C]	Punkt 3 [°C]	Punkt 4 [°C]	Punkt 5 [°C]	Punkt 6 [°C]
0	10	10	10	10	10	10
5	80	45	30	25	15	15
10	210	140	80	55	45	35
15	320	240	165	115	90	75
20	415	330	250	180	145	125
25	485	405	320	245	195	170
30	550	465	390	310	250	230
40	650	580	495	420	345	320
50	720	660	600	520	435	405
60	780	730	675	610	525	480

Tabelle 2.6: Gemessene Temperaturen in Balken 2, feucht (vgl. Anhang A.5)

Zeit [min]	Punkt 7 [°C]	Punkt 8 [°C]	Punkt 9 [°C]	Punkt 10 [°C]	Punkt 11 [°C]	Punkt 12 [°C]
0	10	10	10	10	10	10
5	145	40	115	40	30	15
10	260	120	230	120	75	35
15	370	220	330	205	135	80
20	465	305	400	270	195	130
25	535	365	455	325	245	180
30	600	440	510	380	295	230
40	680	550	595	470	390	325
50	750	640	655	550	470	415
60	805	710	715	625	555	490

Tabelle 2.7: Gemessene Temperaturen in Balken 1, trocken (vgl. Anhang A.6)

Zeit [min]	Punkt 1 [°C]	Punkt 2 [°C]	Punkt 3 [°C]	Punkt 4 [°C]	Punkt 5 [°C]	Punkt 6 [°C]
0	10	10	10	10	10	10
5	90	35	20	10	10	10
10	185	100	45	20	10	10
15	275	160	90	30	15	10
20	340	215	140	45	20	15
25	400	260	180	70	25	20
30	450	305	215	90	35	25
40	550	395	295	145	60	45
50	620	465	365	205	95	70
60	680	520	430	260	130	100
70	725	590	495	310	175	135
80	775	635	530	360	210	175
90	810	680	590	415	255	205

Tabelle 2.8: Gemessene Temperaturen in Balken 2, trocken (vgl. Anhang A.7)

Zeit [min]	Punkt 1 [°C]	Punkt 2 [°C]	Punkt 3 [°C]	Punkt 4 [°C]	Punkt 5 [°C]	Punkt 6 [°C]
0	10	10	10	10	10	10
5	94	50	30	25	15	10
10	215	155	85	60	45	35
15	320	250	170	120	95	75
20	420	325	250	180	140	130
25	480	415	330	250	200	180
30	545	470	385	310	250	230
40	650	575	490	420	345	320
50	720	665	600	525	440	410
60	785	735	680	615	525	480

2.4 Stützen

Das Erwärmungsverhalten von 20 Stahlbetonstützen wird in [14] und [15] umfangreich dokumentiert. Die Betontemperaturen werden in [15] für jeden Messpunkt in einem Temperatur-Zeit-Diagramm dargestellt. In [14] sind fast alle gemessenen Betontemperaturen eines Querschnittes zu einem Temperatur-Zeit-Diagramm mit Angabe des Mittelwerts und der Streuung zusammengefasst. Die ausgewerteten Temperatur-Zeit-Diagramme sind im Anhang A.8 – A.10 zu finden.

Die im Zusammenhang mit der Betontemperaturen wichtigsten Materialeigenschaften und Versuchsrandbedingungen sind im Folgenden zusammengestellt:

Geometrie:

- Querschnitt b/d [cm]: Stütze 1: 30/30 Stütze 2: 20/20
- Stützenlänge [m]: 3,8 bis 5,8

Baustoff Beton:

- Zuschlagart: quarzitisch [14, S.22, Tafel 4]
- Dichte [kg/m³]: 2345 [14, S.21, Tab.3]
- Betonfeuchtigkeit: zwischen 2,0 und 6,0 Gew.-% [14, S.24, Tab.6]

Thermische Randbedingungen:

- 4-seitige Beflammung der Stütze [14, S.19, Tab.1]
- Brandbeanspruchung gemäß ETK nach DIN 4102-2 [14, S.19, Tab.1]
- Anfangstemperatur 20°C

Messung der Temperaturen:

- im Brandraum mit NiCr-Ni-Thermoelementen [14, S.8]
- im Betonquerschnitt mit NiCr-Ni-Thermoelementen [14, S.7]

In Bild 2.5 ist die Lage und Nummerierung der einzelnen Messstellen im Querschnitt eingezeichnet. Die zugehörigen Temperaturen sind in den Tabellen 2.9 – 2.11 zahlenmäßig zusammengefasst.

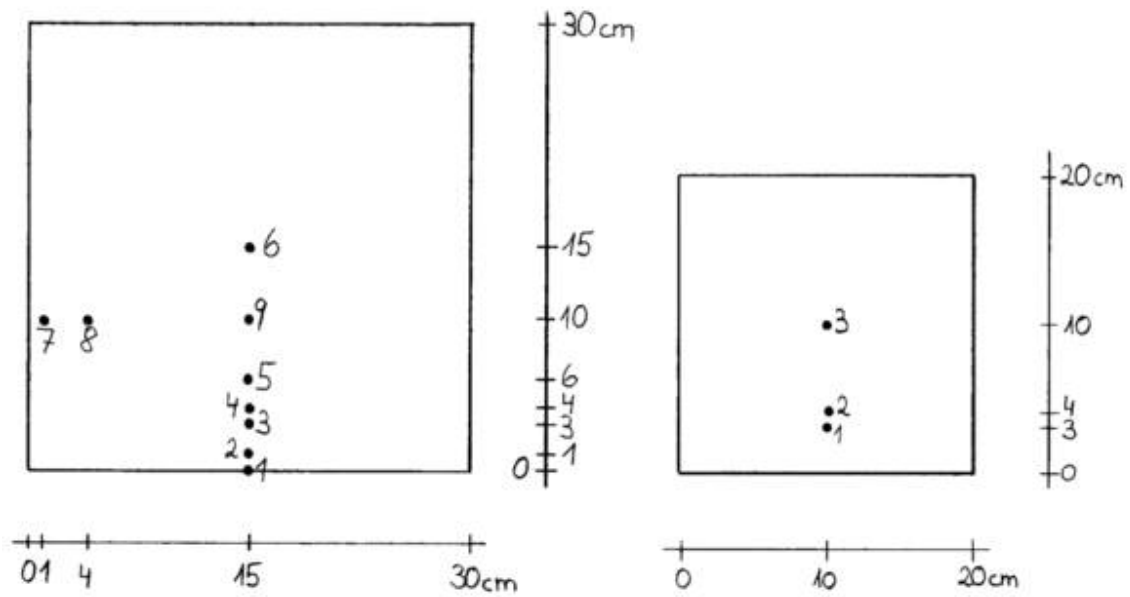


Bild 2.5: Lage der Messstellen in den Stützenquerschnitten (nach Anhang A.8 – A.10), links Stütze 1, rechts Stütze 2

Tabelle 2.9: Gemessene Temperaturen (Mittelwert) in Stütze 1 (Punkt 1 – 6) (vgl. Anhang A.8)

Zeit [min]	Punkt 1 [°C]	Punkt 2 [°C]	Punkt 3 [°C]	Punkt 4 [°C]	Punkt 5 [°C]	Punkt 6 [°C]
0	20	20	20	20	20	20
10	335	175	95	60	35	20
20	550	320	150	115	70	30
30	675	435	220	155	110	50
40	760	520	285	200	120	75
50	820	585	340	250	140	90
60	870	635	395	300	170	105
70	900	680	440	340	210	115
80	920	715	480	375	245	120
90	940	750	515	410	285	125

Tabelle 2.10: Gemessene Temperaturen in Stütze 1 (Punkt 7 – 9) (vgl. Anhang A.9: Es wird jeweils der Mittelwert der Thermolemente 1, 4, 13, 17 (Punkt 7); 2, 5, 7, 14, 16 (Punkt 8) und 3, 6, 15 (Punkt 9) angegeben.)

Zeit [min]	Punkt 7 [°C]	Punkt 8 [°C]	Punkt 9 [°C]
0	20	20	20
10	160	40	20
20	325	105	25
30	445	130	55
40	515	180	90
50	575	225	115
60	625	280	115
70	670	320	115

Tabelle 2.11: Gemessene Temperaturen in Stütze 2 (Punkt 1 – 3) (vgl. Anhang A.10: Es wird jeweils der Mittelwert angegeben.)

Zeit [min]	Punkt 1 [°C]	Punkt 2 [°C]	Punkt 3 [°C]
0	20	20	20
10	70	50	25
20	135	115	50
30	180	145	100
40	250	195	120
50	320	260	120
60	380	320	140

2.5 Wände

Die Temperaturverteilungen im Anhang A.11 gelten für einseitig brandbeanspruchte Platten (Wände) mit einer Dicke von 10 cm bzw. 15 cm, quarzhaltigem Zuschlag und einer Brandbeanspruchung nach der Einheitstemperaturzeitkurve. Über die Dichte des Betons, dessen Feuchtegehalt sowie die verwendeten Thermolemente werden in [9] keine Angaben gemacht. Für die Auswertung wird davon ausgegangen, dass die Isothermenbilder auf Messwerten von Brandversuchen basieren. Die Punkte, für die die Isothermenbilder ausgewertet

werden, zeigt Bild 2.6. Die abgelesenen Temperaturen sind in den Tabellen 2.12 und 2.13 zahlenmäßig angegeben.

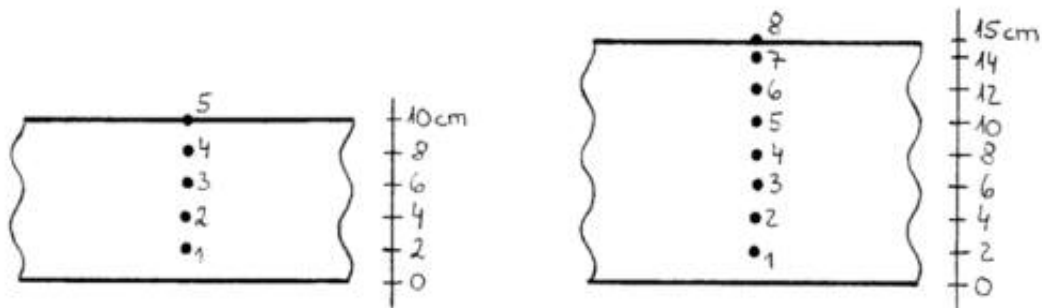


Bild 2.6: Lage der „Messstellen“ in den Wänden, links Wand 1, rechts Wand 2

Tabelle 2.12: „Gemessene“ Temperaturen in Wand 1 (vgl. Anhang A.11)

Zeit [min]	Punkt 1 [°C]	Punkt 2 [°C]	Punkt 3 [°C]	Punkt 4 [°C]	Punkt 5 [°C]
0	20	20	20	20	20
30	305	180	110	70	50
60	460	295	200	130	90
90	630	410	285	205	145
120		515	360	260	185
180		700	495	370	285

Tabelle 2.13: „Gemessene“ Temperaturen in Wand 2 (vgl. Anhang A.11)

Zeit [min]	Punkt 1 [°C]	Punkt 2 [°C]	Punkt 3 [°C]	Punkt 4 [°C]	Punkt 5 [°C]	Punkt 6 [°C]	Punkt 7 [°C]	Punkt 8 [°C]
0	20	20	20	20	20	20	20	20
30	305	180	115	65	40	30	30	35
60	450	285	190	135	90	65	55	50
90	635	400	275	190	140	95	70	65
120		510	360	250	175	125	85	80
180		700	495	365	275	205	155	145

3 RECHENGRUNDLAGEN

3.1 Vorbemerkungen

Mit der Entwicklung und Einführung der Eurocode-Brandschutzteile kann die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen nicht nur anhand von Tabellen sondern auch mit Hilfe von vereinfachten und allgemeinen rechnerischen Nachweisverfahren durchgeführt werden. Die allgemeinen Rechenverfahren beinhalten die Ermittlung der Temperaturentwicklung im Bauteilquerschnitt (thermische Analyse) sowie die darauf aufbauende Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens des Bauteils (mechanische Analyse).

In diesem Abschnitt werden die Rechengrundlagen der thermischen Analyse der Europäischen Vornorm ENV 1992-1-2 (Ausgabe 05/1997) mit denen des Schlussentwurfes prEN 1992-1-2 (Ausgabe 10/2002) verglichen. Die betrachteten Abschnitte und Absätze der Normen werden in einer Tabelle gegenübergestellt und vorhandene Änderungen genannt. Die Absätze der Vornorm werden jeweils zitiert.

3.2 Thermische Analyse

Die allgemeinen Rechenverfahren werden in der ENV 1992-1-2 im Abschnitt 4.4 und in der prEN 1992-1-2 im Abschnitt 4.3 beschrieben. Nach einem einleitenden allgemeinen Abschnitt wird in den Abschnitten 4.4.2 und 4.3.2 auf die thermische Analyse eingegangen (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1 zeigt, dass die grundlegenden Aussagen in diesen Abschnitten nicht verändert wurden. Bei der thermischen Analyse müssen die thermischen Einwirkungen und die temperaturabhängigen Materialeigenschaften berücksichtigt werden. Auf diese beiden Punkte wird in den nächsten Abschnitten näher eingegangen.

Ein hoher Feuchtegehalt des Betons führt aufgrund der Verdampfung des Wassers bei ca. 100 °C (Normaldruck) zu einer langsamen Erwärmung des Bauteilquerschnitts. Die Bauteiltemperatur kann erst dann weiter steigen, wenn das flüssige Wasser verdampft ist [1, S.53].

Für Stahlbetonbauteile mit praxisüblichem Bewehrungsgehalt darf die Bewehrung bei der rechnerischen Ermittlung der Bauteiltemperaturen vernachlässigt werden. Die Temperatur in der Achse des Bewehrungsstabes entspricht in etwa der Temperatur im ungestörten Beton [9, S.67] (Bild 3.1).

Tabelle 3.1: Thermische Analyse

ENV 1992-1-2	prEN 1992-1-2
4.4.2 Thermische Analyse	4.3.2 Thermal response
(1)P Allgemeine Rechenverfahren für die thermische Analyse müssen auf den anerkannten Prinzipien und Voraussetzungen der Theorie der Wärmeübertragung aufbauen.	(1) entsprechend
(2)P Das Modell der thermischen Analyse muß berücksichtigen: a) die thermischen Einwirkungen, ermittelt nach ENV 1991-2-2; b) die temperaturabhängigen Materialeigenschaften, wie in den maßgebenden Dokumenten festgelegt (siehe Anhang A); [...]	(2)P entsprechend a) (mit EN 1991-1-2)
(3) Der Einfluß des Feuchtegehalts sowie der Feuchtigkeitswanderung im Beton [...] darf auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt werden.	(3) entsprechend
(4) Die Temperaturprofile in einem Stahlbetonbauteil dürfen ohne Berücksichtigung der Bewehrung ermittelt werden.	(4) entsprechend
(5) Die Auswirkungen einer ungleichförmigen Temperaturbeanspruchung und die Wärmeübertragung auf anschließende Bauteile dürfen berücksichtigt werden.	(5) entsprechend

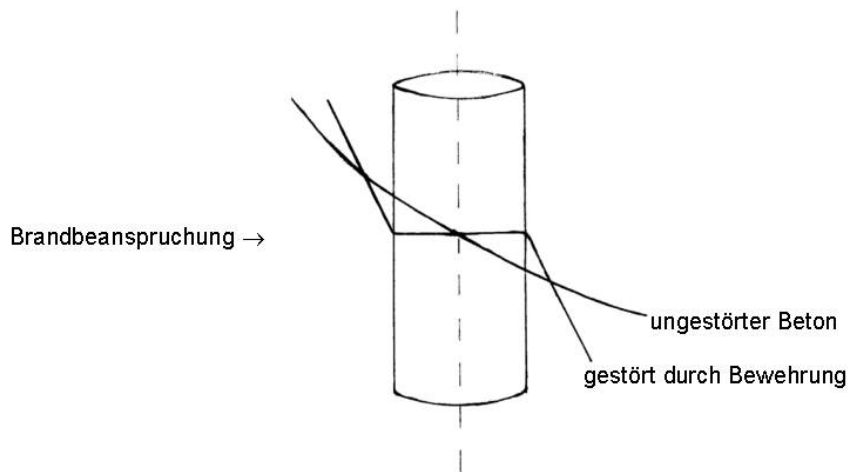


Bild 3.1: Einfluss der Bewehrung auf den Temperaturverlauf (Prinzipskizze) (nach [9, S.66])

3.3 Thermische Einwirkungen

3.3.1 Allgemeines

Die thermischen Einwirkungen werden in ENV 1991-2-2 (05/1997) Abschnitt 4 und EN 1991-1-2 (01/2002) Abschnitt 3 definiert (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Thermische Einwirkungen

ENV 1991-2-2	prEN 1991-1-2
4 Temperaturberechnung (thermische Einwirkungen)	3 Thermal actions for temperature analysis
4.1 Allgemeine Festlegungen	3.1 General rules
(1)P Thermische Einwirkungen sind durch den Netto-Wärmestrom h'_{net} zur Bauteiloberfläche in Watt pro Quadratmeter angegeben.	(1) entsprechend
(2)P Der Netto-Wärmestrom h'_{net} ist unter Berücksichtigung der Wärmestrahlung und der Wärmekonvektion aus dem Brandbereich sowie in diesen Bereich hinein zu bestimmen.	An dieser Stelle so nicht enthalten.
(3) Der Strahlungsanteil am Wärmestrom je Flächeneinheit wird bestimmt durch: $h'_{net,r} = \Phi \times \varepsilon_{res} \times 5,67 \times 10^{-8} \times [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \quad [W/m^2] \quad (4.1)$ Dabei ist: Φ der Konfigurationsfaktor ε_{res} der resultierender Emissionswert Θ_r die Strahlungstemperatur der Umgebung des Bauteils [°C] Θ_m Temperatur der Bauteiloberfläche [°C] $5,67 \times 10^{-8}$ Stefan-Boltzmannsche Konstante [W/(m ² K ⁴)]	Im Absatz (6) wird $h'_{net,r}$ definiert: $h'_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \quad [W/m^2] \quad (3.3)$ Dabei ist: Φ der Konfigurationsfaktor $\varepsilon_m = 0,8$ (Emissionswert des Oberflächenmaterials) wird in der prEN 1992-1-2 Abschnitt 2.2 Absatz (2) auf 0,7 geändert $\varepsilon_f = 1,0$ (Emissionswert des Feuers) σ die Stefan-Boltzmannsche Konstante (= $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)})$ Θ_r die Strahlungstemperatur der Umgebung des Bauteils [°C] Θ_m Temperatur der Bauteiloberfläche [°C]
(4) Sofern in den Teilen der ENV 1992 bis 1996 und ENV 1999, die sich mit der Brandschutzbemessung befassen, nichts anderes festgelegt wird, sollte der Konfigurationsfaktor Φ mit [1,0] angenommen werden. (Laut NAD gilt $\Phi = 1,0$.)	Im Absatz (7) wird Φ ebenfalls mit 1,0 angenommen.
(5) Für den für nominelle Temperaturzeitkurven maßgebenden resultierenden Emissionswert ε_{res} siehe 4.2.	nicht enthalten

Tabelle 3.2 (Fortsetzung)

(6) Die Strahlungstemperatur Θ_r kann als die Gastemperatur Θ_g angenommen werden, siehe 4.1 (11).	Nach (8) kann bei (von allen Seiten brandbeanspruchten) Bauteilen die Strahlungstemperatur Θ_r durch die Gastemperatur Θ_g ausgedrückt werden.
(7) Die Oberflächentemperatur Θ_m ergibt sich aus der Temperaturberechnung des Bauteils nach dem jeweiligen Teil der ENV 1992 bis 1996 bzw. ENV 1999, die sich mit der Brandschutzbemessung befaßt.	(9) entsprechend
(8) Der Konvektionsanteil am Wärmestrom je Flächeneinheit sollte bestimmt werden durch: $h'_{\text{net,c}} = \alpha_c \times (\Theta_g - \Theta_m) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (4.2)$ Dabei ist: α_c der Koeffizient des Wärmeübergangs durch Konvektion [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] Θ_g die Gastemperatur der Umgebung des Bauteils bei Brandbeanspruchung [$^{\circ}\text{C}$] Θ_m die Temperatur der Bauteiloberfläche [$^{\circ}\text{C}$]	(3) entsprechend Gleichung (3.2) entsprechend
(9) Für den für nominelle Temperaturzeitkurven maßgebenden Koeffizienten des Wärmeübergangs durch Konvektion α_c siehe 4.2.	(4) entsprechend siehe entsprechend 3.2
(10) Auf der unbeanspruchten Fläche eines raumabschließenden Bauteils darf der Wärmestrom infolge Wärmestrahlung vernachlässigt werden, und die Konvektion α_c darf mit [9] angenommen werden, in Watt pro Quadratmeter Kelvin ausgedrückt. (Laut Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1991-2-2 gilt $\alpha_c = 9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.)	Nach (5) soll der Netto-Wärmestrom auf der unbeanspruchten Fläche eines raumabschließenden Bauteils mit der Gleichung (3.1), mit $\alpha_c = 4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ bestimmt werden. Der Koeffizient des Wärmeübergangs durch Konvektion sollte mit $\alpha_c = 9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ angenommen werden, wenn vorausgesetzt wird, dass er den Effekt der Wärmestrahlung enthält.
(11) Die Gastemperatur Θ_g darf - als nominelle Temperaturzeitkurve angenommen werden, siehe 4.2; [...]	(10) entsprechend siehe entsprechend 3.2
4.2 Nominelle Temperaturzeitkurven	3.2 Nominal temperature-times curve
4.2.1 Allgemeines	nicht enthalten
(1) Der Absatz wird laut Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1991-2-2 ersetzt durch: Für die zu erbringenden brandschutztechnischen Nachweise gilt grundsätzlich die Einheits-Temperaturzeitkurve nach Abschnitt 4.2.2, die DIN 4102-2 entspricht.	nicht enthalten

Tabelle 3.2 (Fortsetzung)

<p>(2) Bei der Bemessung mit nominellen Temperaturzeitkurven beträgt der Netto-Wärmestrom infolge Konvektion und Wärmestrahlung:</p> $h'_{net,d} = \gamma_{n,c} \times h'_{net,c} + \gamma_{n,r} \times h'_{net,r} \text{ [W/m}^2\text{]} \text{ (4.3)}$ <p>Dabei ist:</p> <p>$h'_{net,c}$ nach Gleichung (4.2) zu berechnen;</p> <p>$h'_{net,r}$ nach Gleichung (4.1) zu berechnen;</p> <p>$\gamma_{n,c}$ ein Faktor zur Berücksichtigung der verschiedenen Arten von nationalen Prüfungen und ist gleich [1,0];</p> <p>$\gamma_{n,r}$ ist gleich [1,0] wie $\gamma_{n,c}$</p> <p><i>(Laut Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1991-2-2 gilt $\gamma_{n,c} = \gamma_{n,r} = 1,0$.)</i></p>	<p>In der prEN 1991-1-2 wird der Netto-Wärmestrom bereits im Abschnitt 3.1 Absatz (2) allgemein für die brandbeanspruchte Oberfläche als</p> $h'_{net} = h'_{net,c} + h'_{net,r} \text{ [W/m}^2\text{]} \text{ (3.1)}$ <p>festgelegt.</p> <p>$h'_{net,c}$ ist durch Gleichung (3.2) und $h'_{net,r}$ durch Gleichung (3.3) gegeben.</p>
<p>(3) Der resultierende Emissionswert sollte ermittelt werden durch:</p> $\varepsilon_{res} = \varepsilon_1 \times \varepsilon_m \text{ (4.4)}$ <p>Dabei ist:</p> <p>ε_f der auf den jeweiligen Brandabschnitt bezogene Emissionswert, der üblicherweise mit [0,8] angenommen wird; <i>(Laut Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1991-2-2 gilt $\varepsilon_f = 0,8$.)</i></p> <p>ε_m der auf das Oberflächenmaterial bezogene Emissionswert; sofern in den Teilen der ENV 1992 bis 1996 und ENV 1996, die sich mit der Brandschutzbemessung befassen, nicht anders festgelegt ist, sollte ε_m mit [0,7] angenommen werden. <i>(Laut Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1991-2-2 gilt $\varepsilon_m = 0,9$ (Änderung!).)</i></p>	<p>nicht enthalten,</p> <p>vgl. Abschnitt 3.1 Absatz (6)</p>
<p>4.2.2 Einheitstemperaturzeitkurve</p>	<p>3.2.1 Standard temperature-time curve</p>
<p>(1) Die Einheitstemperaturzeitkurve wird bestimmt durch:</p> $\Theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]} \text{ (4.5)}$ <p>Dabei ist:</p> <p>Θ_g die Gastemperatur im Brandabschnitt [°C]</p> <p>t die Zeit, in Minuten</p>	<p>(1) entsprechend</p> <p>Gleichung (3.4) entsprechend</p>
<p>(2) Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient ist:</p> $\alpha_c = [25] \text{ W/(m}^2\text{K)}$ <p><i>(Laut Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1991-2-2 gilt $\alpha_c = 25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.)</i></p>	<p>In (2) wird α_c mit 25 W/(m²K) festgelegt.</p>

Die thermischen Einwirkungen werden in der ENV- und der prEN-Fassung durch einen Anteil infolge

- Konvektion (auch Wärmeströmung oder Wärmemitführung) und
- Wärmestrahlung (Radiation)

berücksichtigt. Die Wärmeleitung wird vernachlässigt [6, S. 90ff], [10, S.327], [13, S.53].

3.3.2 Konvektion (Wärmemitführung)

In der ENV 1991-2-2 und der prEN 1991-1-2 wird der konvektive Wärmestrom mit Gleichung (3.1) beschrieben:

$$h'_{\text{net,c}} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.1)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α_c [W/(m²K)] hängt dabei „von der Oberflächengestalt und Oberflächenbeschaffenheit sowie bei erzwungener Konvektion auch von der Strömungsgeschwindigkeit“ ab [10, S.327]. Bei Verwendung der Einheitstemperaturzeitkurve legt die Richtlinie zur Anwendung der DIN V ENV 1991-2-2 für α_c einen Wert von 25 W/(m²K) fest. Dieser Wert wird in der prEN 1991-1-2 nicht verändert. Für die feuerabgekehrte Seite wird α_c in beiden Normen mit 9 W/(m²K) angegeben.

Für die Gastemperatur Θ_g wird in diesem Bereich die Einheitstemperaturzeitkurve zugrunde gelegt. Sie wird in der ENV 1991-2-2 und in der prEN 1991-1-2 durch die Gleichung (3.2) definiert:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1) \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.2)$$

Θ_m ist die Oberflächentemperatur des Bauteils, die sich bei der Berechnung der Bauteiltemperaturen ergibt (vgl. Abschnitt 3.4).

3.3.3 Wärmestrahlung (Radiation)

Bei der Wärmestrahlung erfolgt die Wärmeübertragung durch elektromagnetische Energie (Wellen). „Die Wärmestrahlung ist umso intensiver, je höher die Temperatur des strahlenden Körpers ist.“ [10, S.326] Je nachdem ob die Wärmestrahlung von einem Bauteil durchgelassen, reflektiert oder absorbiert wird, erwärmt sich das Bauteil. „Die absorbierte Wärmestrahlung wird wieder in Wärme verwandelt.“ [10, S.326]

Der Wärmestrom infolge Strahlung wird in der prEN 1991-1-2 mit der Gleichung (3.3)

$$h'_{\text{net,r}} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.3)$$

angegeben und entspricht der Gleichung in der ENV 1991-2-2 ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$).

Nach Absatz 1.4.1 der ENV 1991-2-2 ist der Konfigurationsfaktor Φ das „*Verhältnis zwischen dem Raumwinkel, unter dem von einem bestimmten Punkt der Bauteiloberfläche aus die strahlende Umgebung gesehen werden kann, und 2π .*“ Er ist also ein „*Faktor zur Berücksichtigung von Abschattungen*“ [5, S.1-3], [13, S.330]. In der Richtlinie zur Anwendung der DIN V ENV 1991-2-2 und in der prEN 1991-1-2 wird der Konfigurationsfaktor $\Phi = 1,0$ gesetzt.

Die Emissionswerte ε_m und ε_f werden in der ENV 1991-2-2 zu einem resultierenden Emissionswert ε_{res} zusammengefasst. Diesen Ausdruck gibt es in der prEN 1991-1-2 nicht. Der Emissionswert vergleicht das Emissionsvermögen der Bauteiloberfläche (ε_m) bzw. des Brandabschnitts / des Feuers (ε_f) mit dem eines schwarzen Körpers, der die Wärmestrahlung vollständig absorbiert [10, S.260].

Die Richtlinie zur Anwendung der DIN V ENV 1991-2-2 (NAD) legt die beiden Emissionswerte mit $\varepsilon_m = 0,9$ und $\varepsilon_f = 0,8$ fest. In der prEN 1992-1-2 wird $\varepsilon_m = 0,7$ und in der prEN 1991-1-2 $\varepsilon_f = 1,0$ definiert.

Die Strahlungstemperatur der Umgebung Θ_r kann in beiden Normen durch die Gastemperatur Θ_g ausgedrückt werden. Θ_m ist die Oberflächentemperatur des Bauteils.

Der Netto-Wärmestrom wird in der prEN 1991-1-2 durch Gleichung (3.4)

$$h'_{\text{net,d}} = h'_{\text{net,c}} + h'_{\text{net,r}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.4)$$

festgelegt. Sie entspricht der Gleichung in der ENV 1991-2-2, in der die Faktoren $\gamma_{n,c}$ und $\gamma_{n,r}$ mit 1,0 angenommen werden. Der Netto-Wärmestrom wird nach Gleichung (3.5) zu:

$$h'_{\text{net,d}} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m) + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.5)$$

Die Rechenannahmen für thermische Einwirkungen nach ENV-Fassung in Verbindung mit dem NAD und nach prEN-Fassung sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst. Der Vergleich der Rechenannahmen zeigt, dass sich für ETK-Brände nur die Größe des resultierenden Emissionswertes geringfügig verändert hat (grau hinterlegte Felder).

Tabelle 3.3: Vergleich der Rechenannahmen für die thermischen Einwirkungen nach ENV- und prEN-Fassung

		ENV 1991-2-2		prEN 1991-1-2	
Wärmeübergangs- koeffizient α_c [W/(m ² K)]	ETK	25		25	
	Hydrokarbon	25		50	
Emissionszahl ε	ε_f	0,8		0,8	prEN 1992-1-2: 0,7
	ε_m	0,7	NAD: 0,9	1,0	
	$\varepsilon_{res} = \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m$	0,56	0,72	0,8	0,7

3.4 Temperaturabhängige thermische Materialeigenschaften

3.4.1 Allgemeines

Die instationären Temperaturen im Bauteil werden nach [13, S.129] mit Gleichung (3.6)

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad (3.6)$$

berechnet. Die zeitliche und örtliche Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt hängt von den temperaturabhängigen thermischen Materialeigenschaften ab:

- Wärmeleitfähigkeit λ ,
- Dichte ρ und
- der spezifischen Wärmekapazität c_p

In der ENV 1992-1-2 werden die temperaturabhängigen thermischen Materialeigenschaften im Anhang A.3 und in der prEN 1992-1-2 im Abschnitt 3.3 beschrieben (Tabelle 3.4).

Tabelle 3.4: Temperaturabhängige thermische Materialeigenschaften

ENV 1992-1-2	prEN 1992-1-2
<p>A.3 Thermische Eigenschaften A.3.1 Beton (quarzitische, kalksteinhaltige und Leichtzuschläge)</p>	<p>3.3 Thermal and physical properties of concrete with siliceous and calcareous aggregates</p>
<p>(2) Die spezifische Wärme c_c von Beton darf nach den Gleichungen A.6 und A.7 (Bild A.15) angenommen werden.</p> <p>Beton mit quarzhaltigen und kalksteinhaltigen Zuschlägen: für $20^\circ\text{C} < \Theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$ $c_c = 900 + 80 \times \Theta_c / 120 - 4 \times (\Theta_c / 120)^2$ [J/kgK] (A.6)</p> <p>[...]</p> <p>Sofern der Feuchtegehalt nicht im Rahmen von Wärme- und Massenbilanzen berücksichtigt wird, darf die für die spezifische Wärme von Beton mit quarzhaltigen oder kalksteinhaltigen Zuschlägen angegebene Funktion durch folgenden, zwischen 100°C und 200°C liegenden Spitzenwert ergänzt werden:</p> <p>$c_{c,peak} = 1875$ J/kgK bei einer Feuchtigkeit von 2% des Betongewichts; $c_{c,peak} = 2750$ J/kgK bei einer Feuchtigkeit von 4% des Betongewichts.</p> <p>[...]</p>	<p>3.3.2 Specific heat</p> <p>(1) Die spezifische Wärme $c_p(\Theta)$ von trockenem Beton kann nach den folgenden Gleichungen bestimmt werden:</p> <p>Beton mit quarzhaltigen und kalksteinhaltigen Zuschlägen: $c_p(\Theta) = 900$ (J/kgK) für $20^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 100^\circ\text{C}$ $c_p(\Theta) = 900 + (\Theta - 100)$ (J/kgK) für $100^\circ\text{C} < \Theta \leq 200^\circ\text{C}$ $c_p(\Theta) = 1000 + (\Theta - 200) / 2$ (J/kgK) für $200^\circ\text{C} < \Theta \leq 400^\circ\text{C}$ $c_p(\Theta) = 1100$ (J/kgK) für $400^\circ\text{C} < \Theta \leq 200^\circ\text{C}$ Θ ist die Betontemperatur [$^\circ\text{C}$]</p> <p>Als konstante Spitzenwerte zwischen 100°C und 115°C werden genannt: $c_{c,peak} = 900$ J/kgK bei einer Feuchtigkeit von 0% des Betongewichts $c_{c,peak} = 1470$ J/kgK bei einer Feuchtigkeit von 1,5% des Betongewichts $c_{c,peak} = 2020$ J/kgK bei einer Feuchtigkeit von 3,0% des Betongewichts</p> <p>Zwischen dem Spitzenwert bei 115°C und den 1000J/kgK bei 200°C darf eine lineare Beziehung angenommen werden. Für andere Feuchtigkeiten darf linear interpoliert werden.</p>

Tabelle 3.4 (Fortsetzung)

ENV 1992-1-2	prEN 1992-1-2
<p>(3) Die Wärmeleitfähigkeit von Beton darf entsprechend den Gleichungen A.8 bis A.11 bestimmt werden.</p> <p>Beton mit quarzhaltigen Zuschlägen: für $20^{\circ}\text{C} < \Theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$ $\lambda_c = 2 - 0,24 \times \Theta_c / 120 + 0,012 \times (\Theta_c / 120)^2$ [W/mK] (A.8)</p> <p>Beton mit kalkhaltigen Zuschlägen: für $20^{\circ}\text{C} < \Theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$ $\lambda_c = 1,6 - 0,16 \times \Theta_c / 120 + 0,008 \times (\Theta_c / 120)^2$ [W/mK] (A.9)</p> <p>[...]</p>	<p>3.3.3 Thermal conductivity</p> <p>(1) Die Wärmeleitfähigkeit von Beton λ_c kann zwischen den unteren und oberen Grenzwerten, die in (2) angegeben sind, im nationalen Anhang festgelegt werden.</p> <p>(2) Die obere Grenze der Wärmeleitfähigkeit für Normalbeton kann bestimmt werden aus: $\lambda_c = 2 - 0,2451 (\Theta_c / 100) + 0,0107 (\Theta_c / 100)^2$ W/mK für $20^{\circ}\text{C} \leq \Theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$.</p> <p>Die untere Grenze der Wärmeleitfähigkeit für Normalbeton kann bestimmt werden aus: $\lambda_c = 1,36 - 0,136 (\Theta_c / 100) + 0,0057 (\Theta_c / 100)^2$ W/mK für $20^{\circ}\text{C} \leq \Theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$.</p> <p>$\Theta_c$ ist jeweils die Betontemperatur.</p>
<p>(4) Die Dichte ρ_c von unbewehrtem Beton darf als von der Betontemperatur unabhängig angesehen und entsprechend ENV 1992-1-1 ermittelt werden.</p> <p>Für die thermische Analyse darf bei normal dichtem Beton (quarzhaltig oder kalksteinhaltig) $\rho_c = 2300 \text{ kg/m}^3$ angenommen werden.</p> <p>Die Dichte darf auch für Temperaturen oberhalb 100°C wegen Verdampfungen des freien Wassers um 100 kg/m^3 vermindert werden.</p>	<p>Die Dichte wird bereits im Abschnitt 3.3.2 Absatz (2) in Abhängigkeit von der Temperatur wie folgt definiert:</p> <p>$\rho(\Theta) = \rho(20^{\circ}\text{C})$ für $20^{\circ}\text{C} \leq \Theta \leq 115^{\circ}\text{C}$</p> <p>$\rho(\Theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot (1 - 0,02(\Theta - 115)/85)$ für $115^{\circ}\text{C} < \Theta \leq 200^{\circ}\text{C}$</p> <p>$\rho(\Theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot (0,98 - 0,03(\Theta - 200)/200)$ für $200^{\circ}\text{C} < \Theta \leq 400^{\circ}\text{C}$</p> <p>$\rho(\Theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot (0,95 - 0,07(\Theta - 400)/800)$ für $400^{\circ}\text{C} < \Theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$</p>
<p>(5) Der Feuchtegehalt des Betons darf der Ausgleichsfeuchte gleichgesetzt werden. Sind diese Daten nicht verfügbar, darf der Feuchtegehalt mit $\leq 2\%$ des Betongewichts angenommen werden.</p> <p>Ein hoher Feuchtegehalt verzögert die Erwärmung des Betons, erhöht jedoch die Abplatzgefahr.</p>	<p>nicht enthalten</p>

3.4.2 Wärmeleitfähigkeit

In der ENV 1992-1-2 wird die Wärmeleitfähigkeit von Beton in Abhängigkeit der Zuschlagsart (quarzhaltig, kalkhaltig, Leichtzuschlag) genannt. Diese Abhängigkeit wird in der prEN 1992-

1-2 nicht mehr erwähnt. Die ENV 1992-1-2 definiert die Wärmeleitfähigkeit von Beton mit quarzhaltigen Zuschlägen für $20^\circ\text{C} < \Theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$ nach Gleichung (3.7):

$$\lambda_c = 2 - 0,24 \cdot \Theta_c / 120 + 0,012 \cdot (\Theta_c / 120)^2 \quad [\text{W}/(\text{mK})] \quad (3.7)$$

Θ_c ist die Betontemperatur.

In der prEN 1992-1-2 werden hingegen eine obere und eine untere Grenzfunktion für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton beschrieben. Innerhalb dieser Grenzen ist die national anzuwendende Funktion im Nationalen Anhang festzulegen.

Die obere Grenzfunktion lautet für $20^\circ\text{C} \leq \Theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 (\Theta_c / 100) + 0,0107 (\Theta_c / 100)^2 \quad [\text{W}/(\text{mK})] \quad (3.8)$$

und die untere Grenzfunktion für $20^\circ\text{C} \leq \Theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 (\Theta_c / 100) + 0,0057 (\Theta_c / 100)^2 \quad [\text{W}/(\text{mK})] \quad (3.9)$$

Bild 3.2 zeigt den Verlauf der unterschiedlichen Funktionen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit nach der ENV 1992-1-2 nicht innerhalb der beiden Grenzfunktionen der prEN 1992-1-2 liegt. Auf die neu zu definierende nationale Funktion wird im Abschnitt 4 eingegangen.

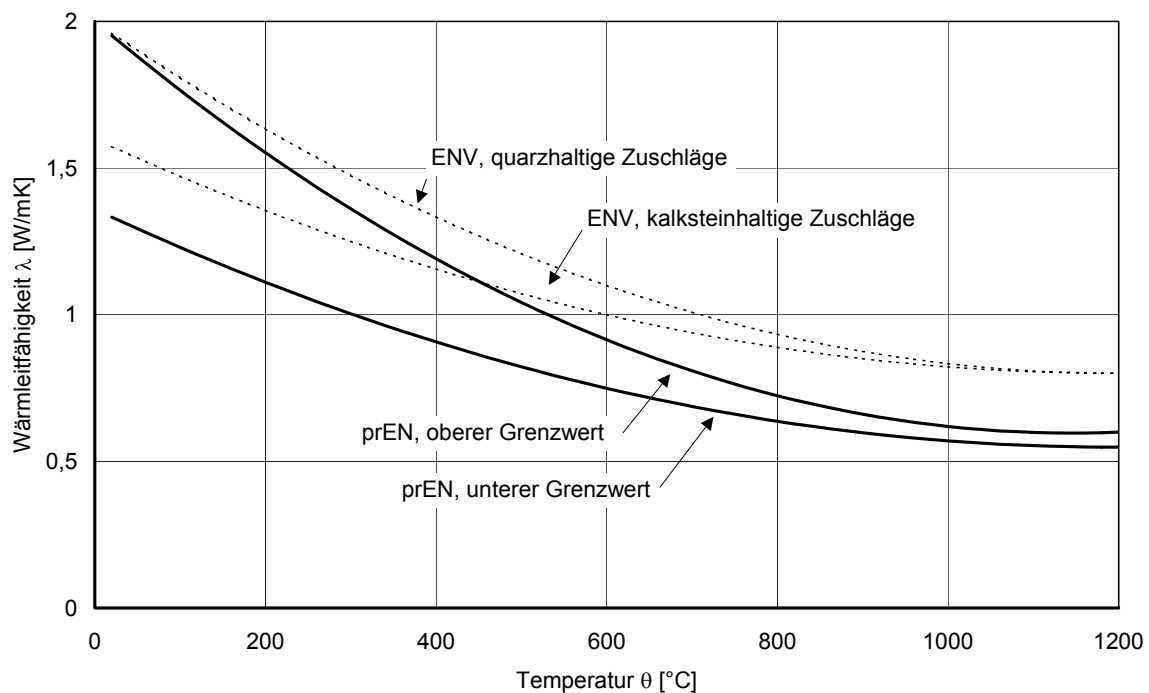


Bild 3.2: Wärmeleitfähigkeit von Beton

3.4.3 Dichte

Die Dichte von Normalbeton wird in der ENV 1992-1-2 mit $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ angenommen und kann für Temperaturen oberhalb 100°C aufgrund der Verdampfung des vorhandenen Wassers um 100 kg/m^3 verringert werden. In der prEN 1992-1-2 wird die Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur nach Gleichung (3.10) bis (3.13) definiert:

$$\text{für } 20^\circ\text{C} \leq \Theta \leq 115^\circ\text{C}: \quad \rho(\Theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \quad (3.10)$$

$$\text{für } 115^\circ\text{C} < \Theta \leq 200^\circ\text{C}: \quad \rho(\Theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \cdot (1 - 0,02(\Theta - 115)/85) \quad (3.11)$$

$$\text{für } 200^\circ\text{C} < \Theta \leq 400^\circ\text{C}: \quad \rho(\Theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \cdot (0,98 - 0,03(\Theta - 200)/200) \quad (3.12)$$

$$\text{für } 400^\circ\text{C} < \Theta \leq 1200^\circ\text{C}: \quad \rho(\Theta) = \rho(20^\circ\text{C}) \cdot (0,95 - 0,07(\Theta - 400)/800) \quad (3.13)$$

In der Bild 3.3 werden die beiden Funktionsverläufe der Dichte nach ENV 1992-1-2 und prEN 1992-1-2 gezeigt. Bei dem Verlauf nach prEN 1992-1-2 wurde bei einer Temperatur von 20°C eine Dichte von 2300 kg/m^3 angenommen. Aus Bild 3.3 ist zu erkennen, dass der temperaturabhängige Verlauf der Dichte für Temperaturen oberhalb von 115°C nach prEN 1992-1-2 annähernd linear abfällt und nach ENV 1992-1-2 einen konstanten Wert (2200 kg/m^3) behält.

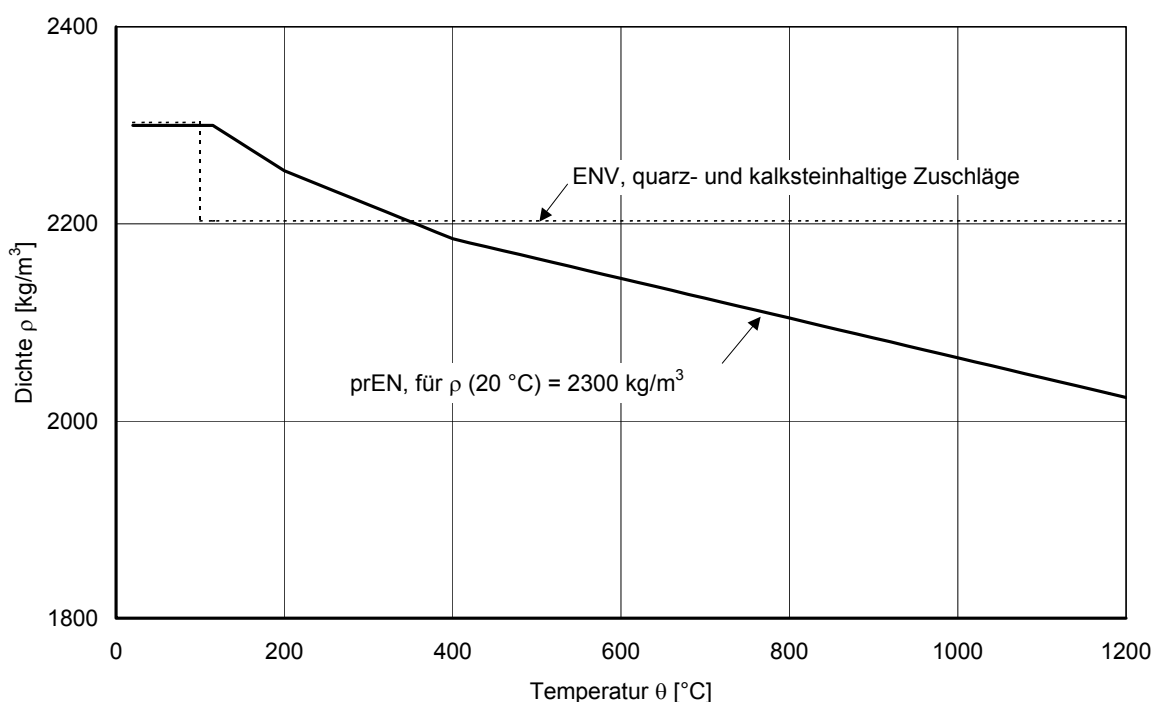


Bild 3.3: Temperaturabhängiger Verlauf der Dichte von Beton

3.4.4 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität ist die Wärmemenge, die benötigt wird, um 1 kg eines Stoffes um 1°C zu erwärmen [13, S.133]. In der ENV 1992-1-2 wird für Beton mit quarzhaltigen und kalksteinhaltigen Zuschlägen die spezifische Wärmekapazität für $20^{\circ}\text{C} < \Theta_c \leq 1200^{\circ}\text{C}$ mit Gleichung (3.14) beschrieben:

$$c_c = 900 + 80 \cdot \Theta_c / 120 - 4 \cdot (\Theta_c / 120)^2 \quad [\text{J}/(\text{kgK})] \quad (3.14)$$

Der Energieverbrauch zum Verdampfen des physikalisch gebundenen Porenwassers wird vereinfachend durch Vergrößerung der spezifischen Wärmekapazität zwischen 100 °C und 200 °C berücksichtigt. In der ENV 1992-1-2 werden als „Spitzenwerte“ für die spezifische Wärmekapazität für Feuchtigkeiten von 2 und 4 Gew.-% angegeben:

$c_{c,\text{peak}} = 1875 \text{ J}/(\text{kgK})$ bei einer Feuchtigkeit von 2% des Betongewichts;

$c_{c,\text{peak}} = 2750 \text{ J}/(\text{kgK})$ bei einer Feuchtigkeit von 4% des Betongewichts.

In der prEN 1992-1-2 wird die spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit von der Temperatur mit Gleichung (3.15) bis (3.18) beschrieben:

$$\text{für } 20^{\circ}\text{C} \leq \Theta \leq 100^{\circ}\text{C}: \quad c_p(\Theta) = 900 [\text{J}/(\text{kgK})] \quad (3.15)$$

$$\text{für } 100^{\circ}\text{C} < \Theta \leq 200^{\circ}\text{C}: \quad c_p(\Theta) = 900 + (\Theta - 100) [\text{J}/(\text{kgK})] \quad (3.16)$$

$$\text{für } 200^{\circ}\text{C} < \Theta \leq 400^{\circ}\text{C}: \quad c_p(\Theta) = 1000 + (\Theta - 200) / 2 [\text{J}/(\text{kgK})] \quad (3.17)$$

$$\text{für } 400^{\circ}\text{C} < \Theta \leq 2000^{\circ}\text{C}: \quad c_p(\Theta) = 1100 [\text{J}/(\text{kgK})] \quad (3.18)$$

Der „Spitzenwert“ wird als ein konstanter Wert zwischen 100°C und 115°C definiert:

$c_{c,\text{peak}} = 900 \text{ J}/(\text{kgK})$ bei einer Feuchtigkeit von 0% des Betongewichts

$c_{c,\text{peak}} = 1470 \text{ J}/(\text{kgK})$ bei einer Feuchtigkeit von 1,5% des Betongewichts

$c_{c,\text{peak}} = 2020 \text{ J}/(\text{kgK})$ bei einer Feuchtigkeit von 3,0% des Betongewichts.

Bild 3.4 und Bild 3.5 zeigen den temperaturabhängigen Verlauf der spezifischen Wärmekapazität und die „Spitzenwerte“ in Abhängigkeit der Feuchtigkeit.

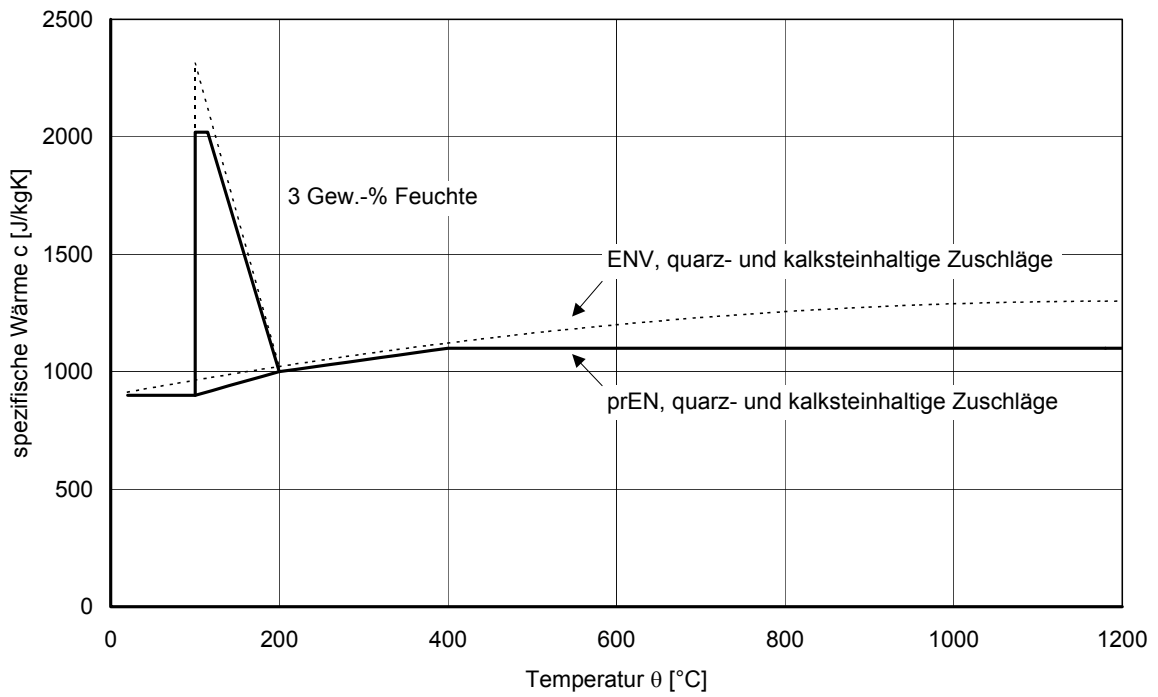


Bild 3.4: Temperaturabhängiger Verlauf der spezifischen Wärmekapazität

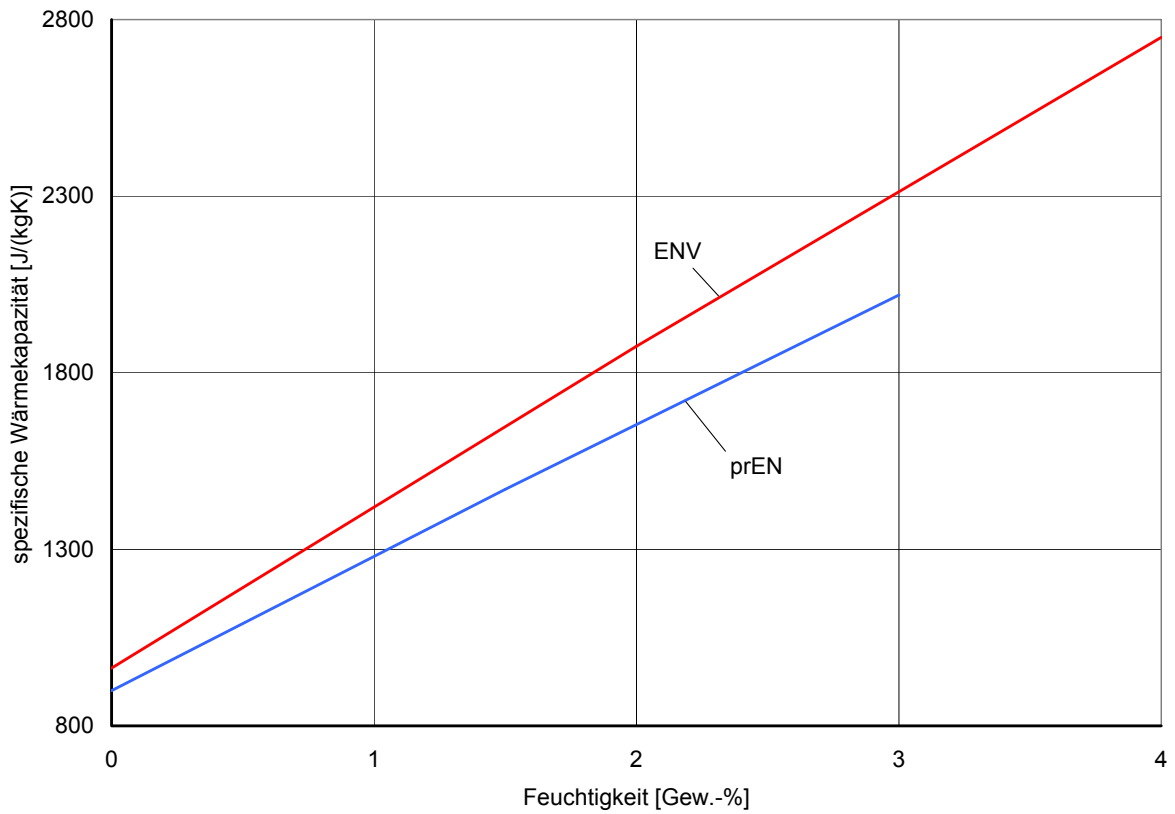


Bild 3.5: „Spitzenwerte“ der spezifischen Wärmekapazität

4 VERGLEICH DER TEMPERATUREN

4.1 Vorbemerkungen

Im Abschnitt 4 werden die Temperaturen aus Brandversuchen (Abschnitt 2) mit berechneten Temperaturen verglichen und bewertet. Die berechneten Temperaturen werden mit Hilfe des Computerprogramms FIRES-T [16] ermittelt. Dazu müssen die temperaturabhängigen Funktionen der thermischen Materialkennwerte numerisch aufbereitet und in das Computerprogramm FIRES-T implementiert werden. Im Anhang B-0 sind die verwendeten thermischen Materialkennwerte zusammengestellt.

4.2 Berechnung der Temperaturen

4.2.1 Rechengrundlagen

Die Temperaturen werden mit den thermischen Materialkennwerten nach der ENV 1992-1-2 und nach der prEN 1992-1-2 berechnet. Dabei wird, um die Ergebnisse besser miteinander vergleichen zu können, bei allen Bauteilen von quarzhaltigem Zuschlag und einer Betonfeuchte von 3,0 Gew.-% ausgegangen. Eine Ausnahme stellen die „trockenen“ Bauteile sowie die Wände dar. Bei den „trockenen“ Bauteilen wird eine Betonfeuchte von 0,0 Gew.-% angenommen und bei den Wänden wird eine Betonfeuchte von 1,5 Gew.-% gewählt. Mit dieser Festlegung werden die in der prEN 1992-1-2 angegebenen Spitzenwerte für die spezifische Wärmekapazität bei 0, 1,5 und 3 Gew.-% Feuchte erfasst.

Für die Berechnungen mit den thermischen Materialkennwerten nach der ENV 1992-1-2 werden die Spitzenwerte für die spezifische Wärmekapazität bei 0, 1,5 und 3 Gew.-% Feuchte linear zwischen den beiden angegebenen Spitzenwerten von 2 und 4 Gew.-% Feuchte interpoliert; das ergibt für eine Betonfeuchte von 3,0 Gew.-% einen Wert $c_{c,peak} = 2312,5$ J/(kgK) und für eine Betonfeuchte von 1,5 Gew.-% einen Wert $c_{c,peak} = 1647,2$ J/(kgK) (Bild 3.5).

Die verwendeten thermischen Materialgesetze können für eine Betonfeuchte von 3,0 Gew.-% Anhang B.03 (ENV 1992-1-2) und Anhang B.04 (prEN 1992-1-2) entnommen werden. Die Materialgesetze für die anderen Betonfeuchten unterscheiden sich lediglich in der Angabe der Spitzenwerte der spezifischen Wärmekapazität (vgl. Anhang B.02).

4.2.2 Wärmeleitfähigkeit nach prEN 1992-1-2

Die Temperaturentwicklung im Bauteilquerschnitt wird wesentlich durch die Temperaturleitfähigkeit bestimmt. Das Temperaturleitvermögen – ausgedrückt durch die Temperaturleitzahl a – ist die funktionale Kopplung der thermischen Materialkennwerte nach Gleichung 4.5:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4.5)$$

Die Einzelwerte - Wärmeleitfähigkeit λ , spezifische Wärmekapazität c_p und Dichte ρ – müssen nach Abschnitt 3 als temperaturabhängige Kenngrößen berücksichtigt werden. Bild 4.1 zeigt die Temperaturleitzahl a für die thermischen Materialkennwerte nach der ENV- und nach der prEN-Fassung, dabei wurde für die spezifische Wärmekapazität die Betonfeuchte mit 0 Gew.-% berücksichtigt. Die größte Übereinstimmung zwischen ENV- und prEN-Fassung wird für die Temperaturleitzahl mit der oberen Grenzfunktion für die Wärmeleitfähigkeit erreicht.

Die Berechnungen nach prEN-Fassung werden deshalb mit der oberen Grenzfunktion für die Wärmeleitfähigkeit durchgeführt.

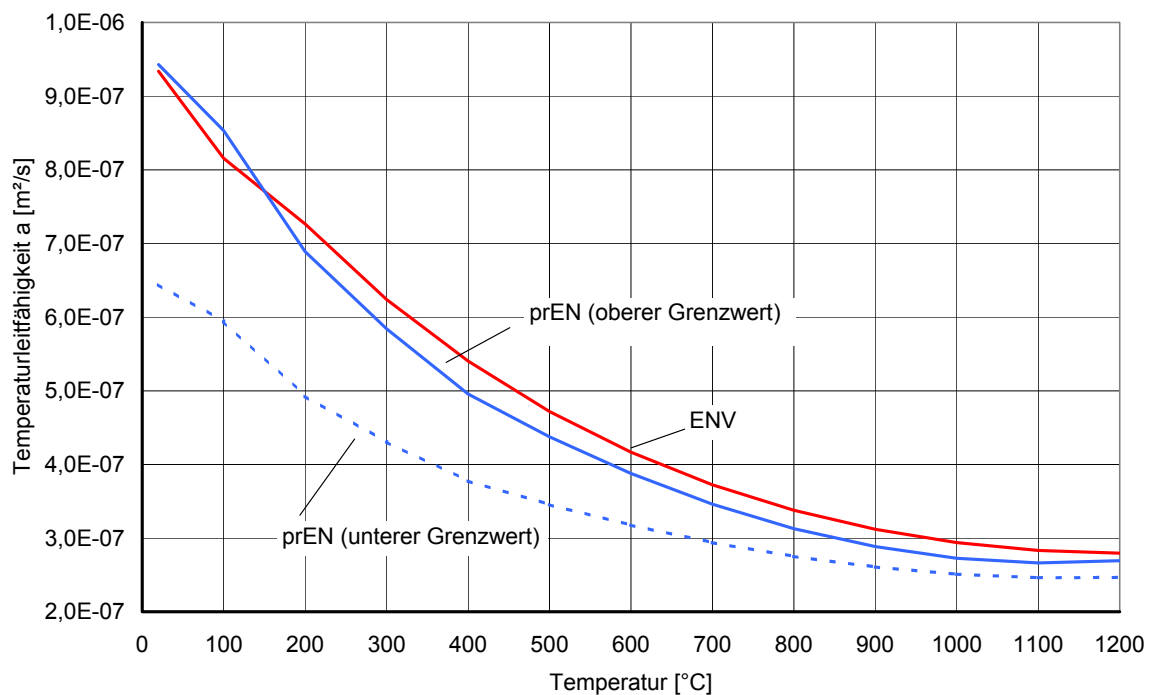


Bild 4.1: Temperaturleitfähigkeit a

4.3 Vergleich der Temperaturen

4.3.1 Allgemeines

Im Anhang B sind die berechneten und gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufe für jedes Bauteil und jeden Querschnittspunkt graphisch dargestellt. Ein erster Blick auf diese Diagramme bestätigt die aufgrund der ähnlichen Verläufe der Temperaturleitfähigkeit erwartete, gute Übereinstimmung zwischen den Werten nach ENV 1992-1-2 und prEN 1992-1-2. Die Temperaturverläufe nach ENV 1992-1-2 liegen in den meisten Fällen etwas oberhalb der Temperaturverläufe nach prEN 1992-1-2. Eine weitere Angleichung der Temperaturverläufe nach ENV 1992-1-2 und prEN 1992-1-2 könnte nur durch eine Vergrößerung der Wärmeleitfähigkeit nach prEN 1992-1-2 erzielt werden. Der größtmögliche Wert ist aber mit der oberen Grenzfunktion der Wärmeleitfähigkeit schon vorgegeben.

In der Auswertung werden die Temperaturunterschiede zwischen der Berechnung nach ENV- und prEN-Fassung sowie zwischen der Berechnung nach prEN-Fassung und Messwerten verglichen. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt auf dem Vergleich der nach ENV 1992-1-2 und nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen. Die maximalen Temperaturdifferenzen nach 30, 60 und 90 Minuten Branddauer werden zahlenmäßig angegeben und graphisch in einem Balkendiagramm dargestellt. Außerdem werden alle berechneten und gemessenen Temperaturen in zwei Diagrammen vergleichend gegenübergestellt.

4.3.2 Durchlaufplatte $d = 10$ cm

Die für die Durchlaufplatte ausgewerteten Temperatur-Zeit-Verläufe werden im Anhang B-1 in den Diagrammen B.1 – B.4, die dazugehörigen Ergebnisse der Temperaturberechnungen im Anhang C-1 in den Tabellen C.1 – C.4 und die Lage der Messpunkte im Bauteilquerschnitt in Bild 2.3 dargestellt.

Bild 4.2 und Tabelle 4.1 zeigen, dass die größten Temperaturunterschiede zwischen ENV 1992-1-2 und prEN 1992-1-2 bei der Durchlaufplatte in einer Tiefe zwischen 1 cm und 5 cm auftreten. Nach 90 Minuten liegt in einer Bauteiltiefe von 3 cm (Punkt 2) eine Temperaturdifferenz von 32,7 °C (ENV: 544 °C / prEN: 511,3 °C) vor (Tabelle C.2).

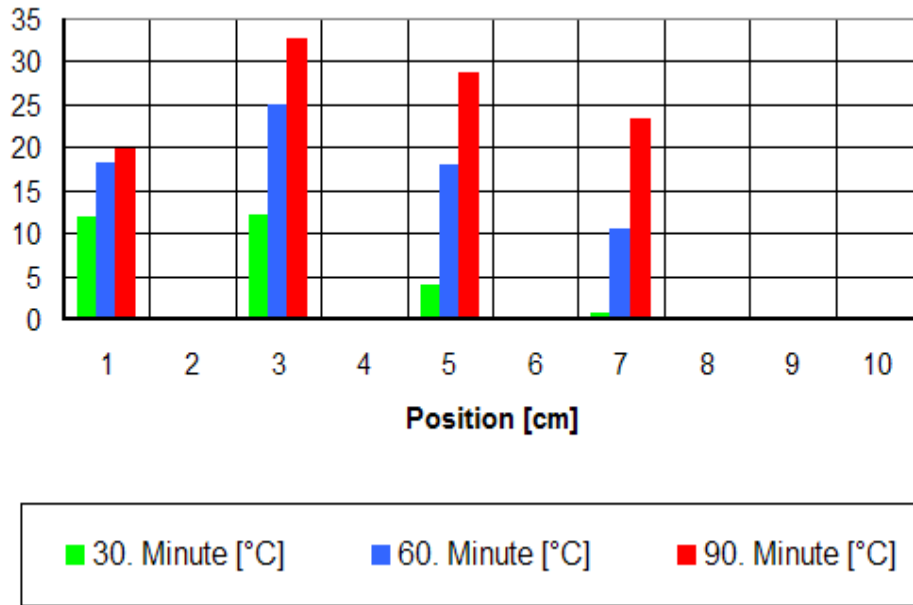


Bild 4.2: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte in der Durchlaufplatte (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflamelter Bauteiloberfläche)

Tabelle 4.1: Temperaturdifferenzen in der Durchlaufplatte

		Branddauer [min]		
		30	60	90
ENV-prEN	max. ΔT [°C]	12,1	25,0	32,7
	Mittelwert [°C]	7,2	17,9	26,2
MW-prEN	max. ΔT [°C]	45,0	12,2	18,7
	Mittelwert [°C]	22,5	11,3	9,7

In Bild 4.3 und 4.4 werden die nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen den nach ENV 1992-1-2 berechneten und den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

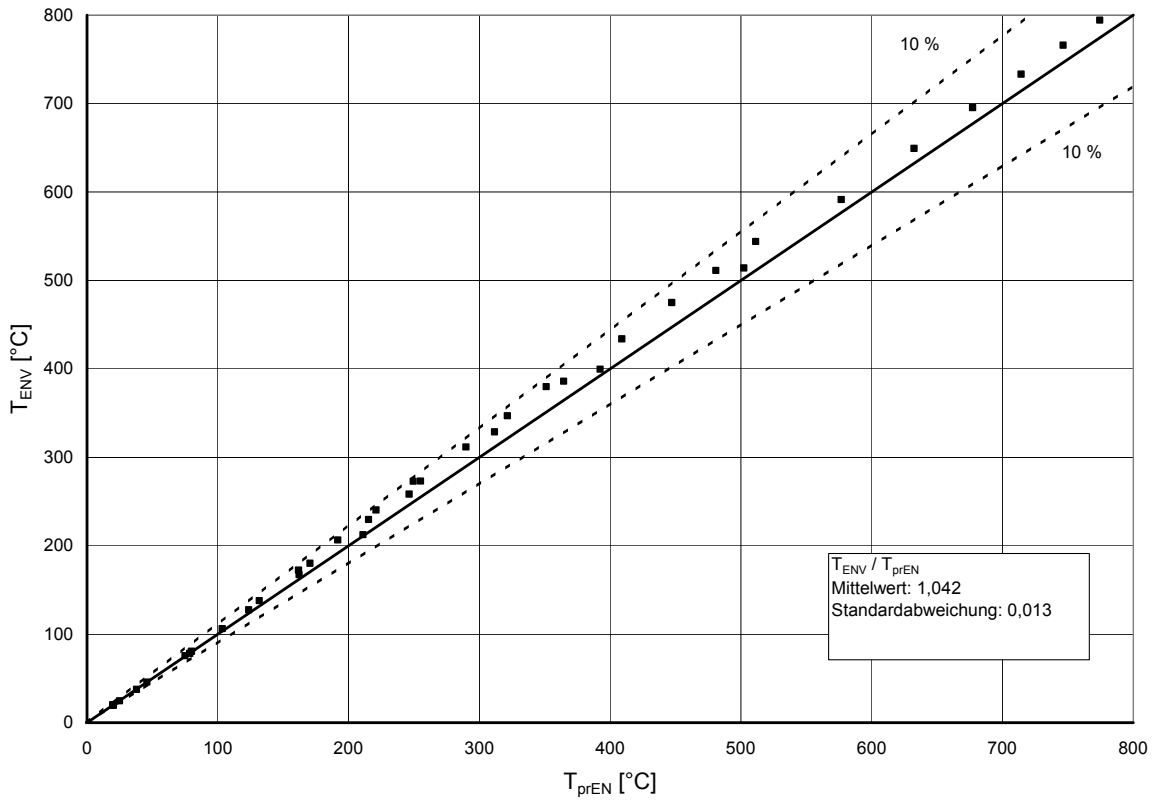


Bild 4.3: Vergleich der nach ENV- und prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen in der Durchlaufplatte

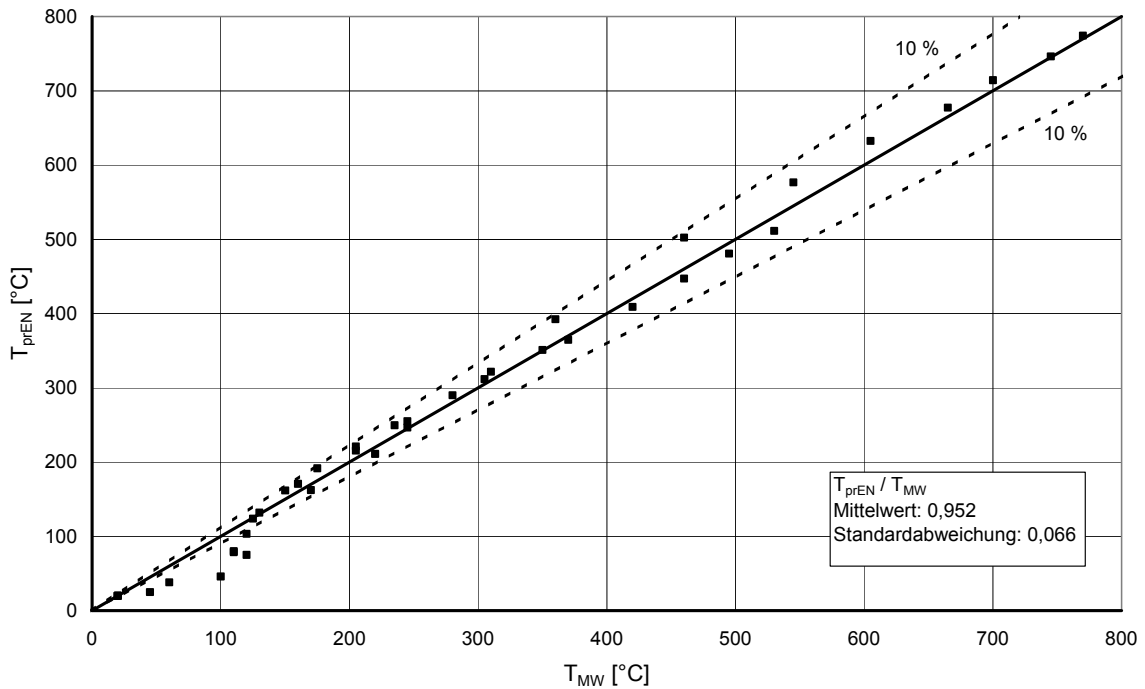


Bild 4.4: Vergleich der gemessenen und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen in der Durchlaufplatte

4.3.3 Balken b/d = 20/40 cm

Die Temperatur-Zeit-Verläufe für den Balken 20/40 werden im Anhang B-1 in den Diagrammen B.5 – B.18, die dazugehörigen Auswertungen im Anhang C-1 in den Tabellen C.5 – C.18 und die Lage der Messpunkte im Balkenquerschnitt in Bild 2.4 dargestellt.

Die Bilden 4.5 – 4.7 und die Tabelle 4.2 zeigen die größten Temperaturunterschiede zwischen ENV 1992-1-2 und prEN 1992-1-2 in einer Bauteiltiefe von 2 cm bis 7 cm. Der größte berechnete Temperaturunterschied beträgt 34,6 °C (ENV: 491,3 °C / prEN: 456,7 °C) und tritt nach 90 Minuten in einer Tiefe von 5 cm auf.

Tabelle 4.2: Temperaturdifferenzen im Balken 20/40 cm

		Branddauer [min]		
		30	60	90
ENV - prEN	max. ΔT [°C]	17,7	27,8	34,6
	Mittelwert [°C]	10,0	20,3	28,2
MW - prEN	max. ΔT [°C]	97,2	65,0	42,3
	Mittelwert [°C]	45,6	33,9	22,1

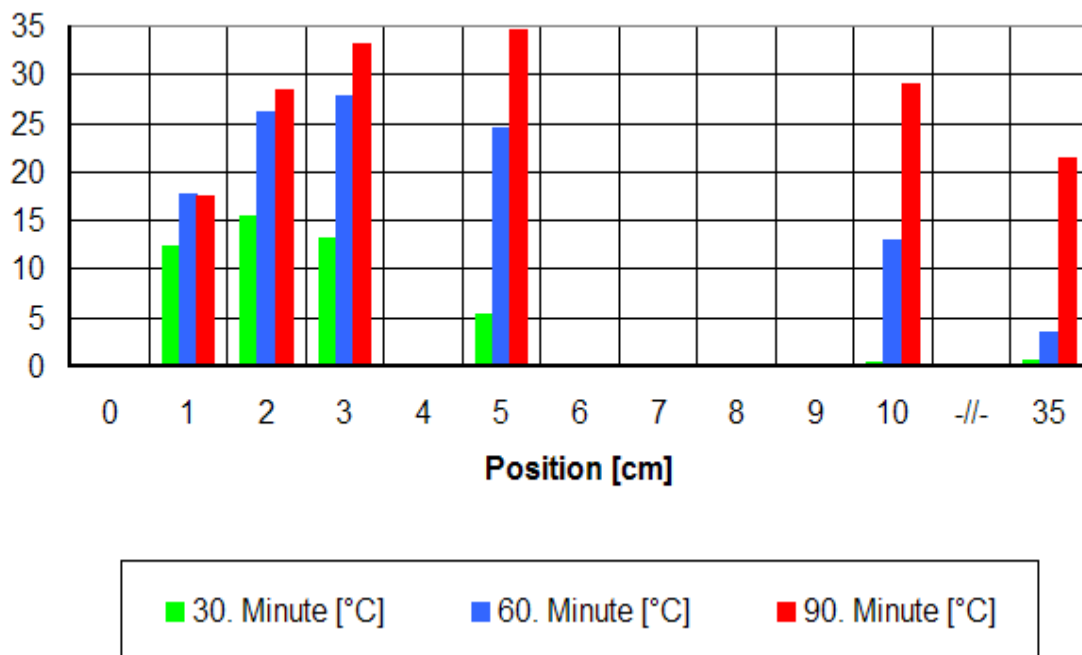


Bild 4.5: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 1 – 6 im Balken 20/40 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammtter Bauteiloberfläche)

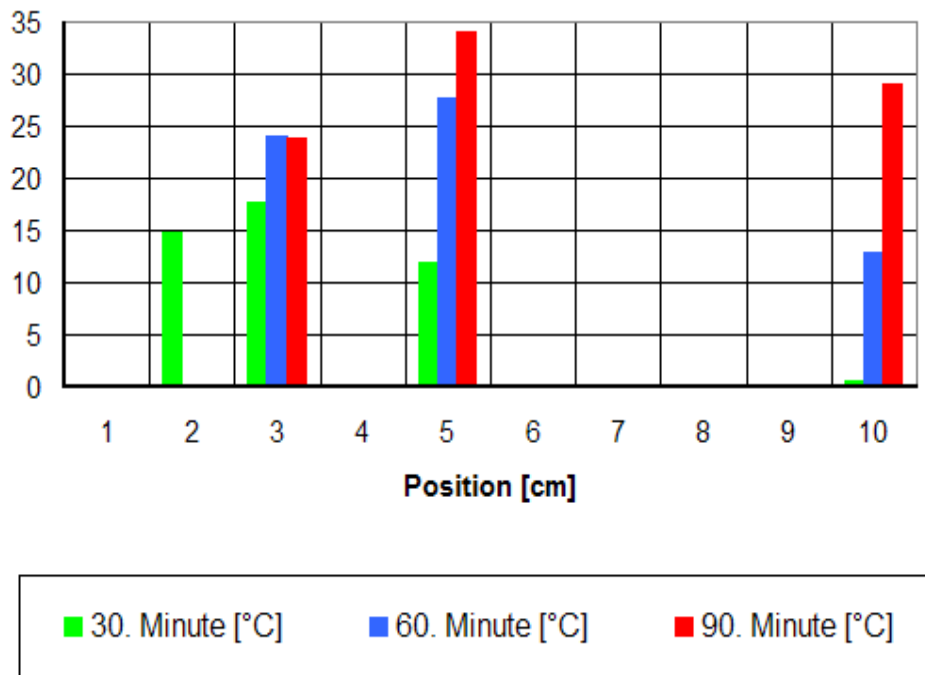


Bild 4.6: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 7 – 9 und 5 im Balken 20/40 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammter Bauteiloberfläche)

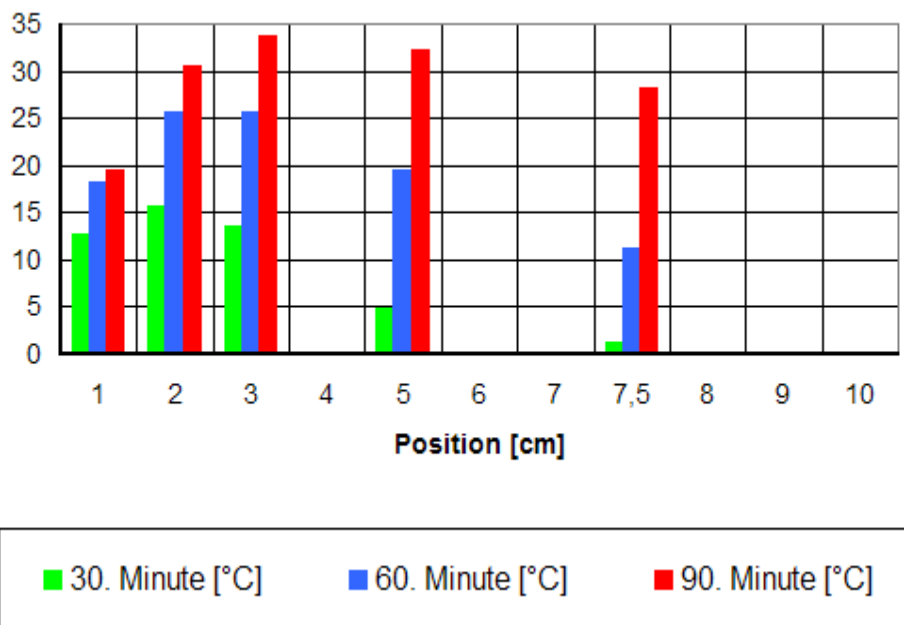


Bild 4.7: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 10 – 14 im Balken 20/40 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammter Bauteiloberfläche)

In Bild 4.8 und 4.9 sind alle nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen den nach ENV 1992-1-2 berechneten und den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

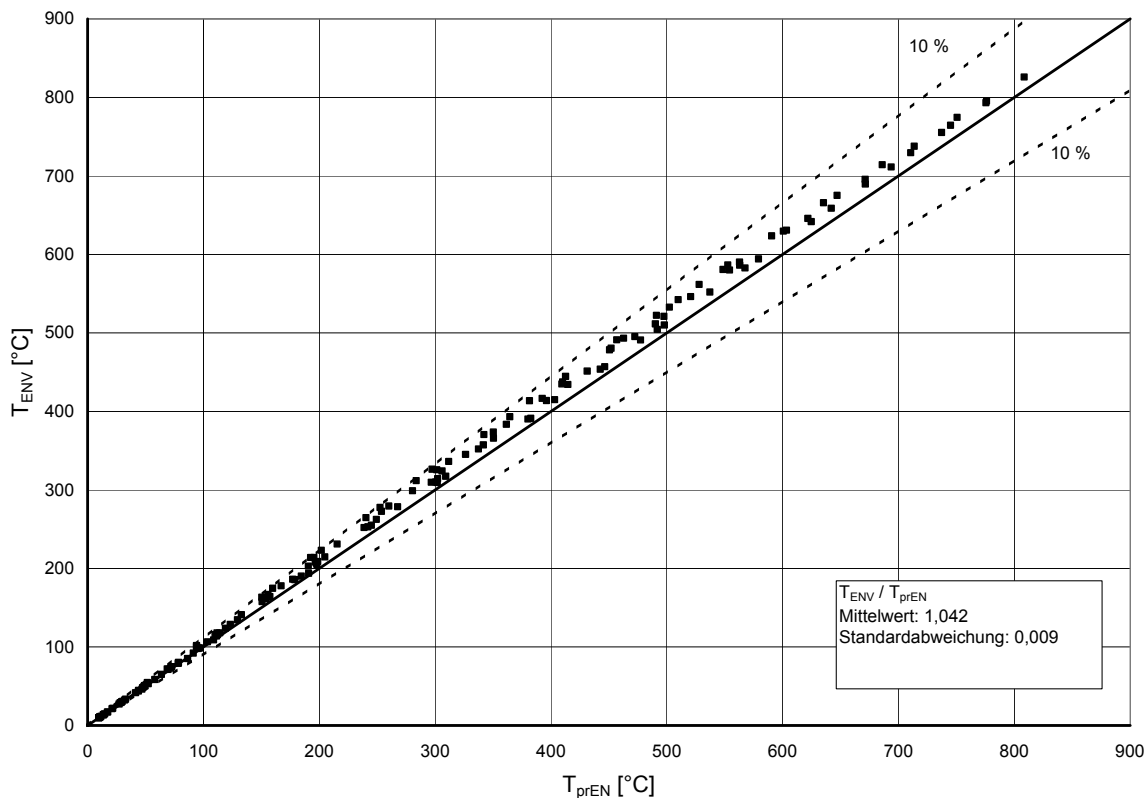


Bild 4.8: Vergleich der nach ENV- und prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Balken 20/40 cm

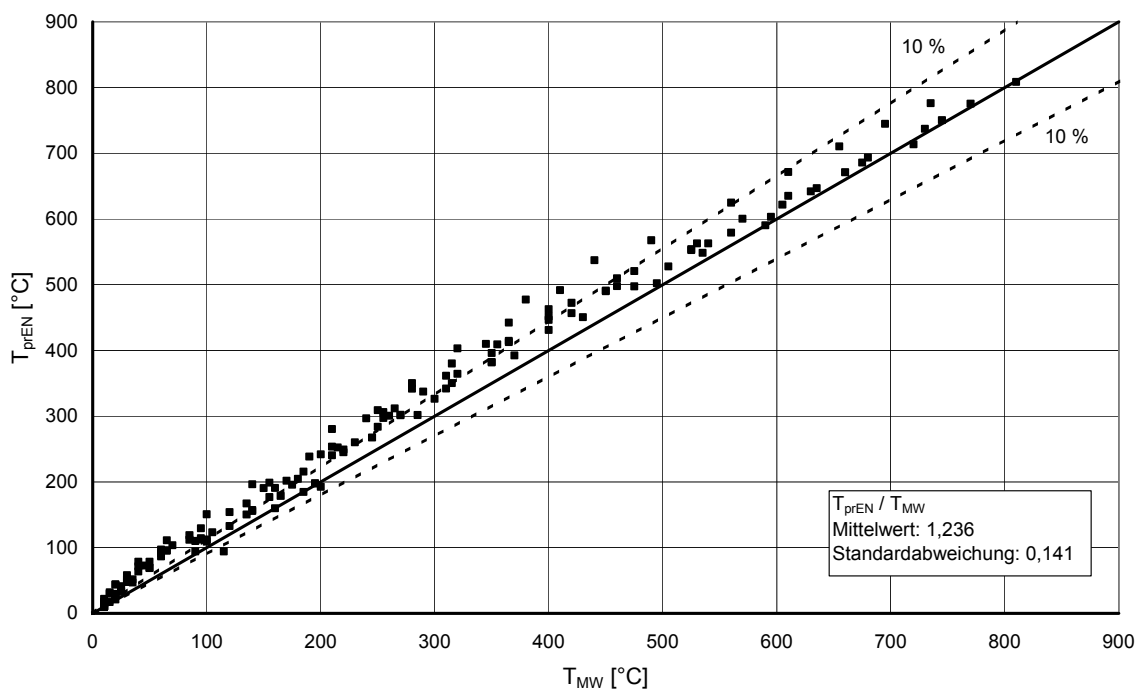


Bild 4.9: Vergleich der gemessenen und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Balken 20/40 cm

4.3.4 Balken b/d = 10/40 cm

Im Anhang B-1 (Diagramme B.19 – B.30) werden die Temperatur-Zeit-Verläufe für den Balken 10/40 cm, die dazugehörigen Auswertungen werden im Anhang C-1 den Tabellen C.19 – C.30 und die Lage der Messpunkte im Balkenquerschnitt in Bild 2.4 dargestellt.

Die Bilden 4.10 – 4.12 und Tabelle 4.3 verdeutlichen, dass die größten berechneten Temperaturdifferenzen zwischen der ENV 1992-1-2 und der prEN 1992-1-2 in einer Bauteiltiefe von 5 cm bis 13 cm vorkommen. Der größte berechnete Temperaturunterschied liegt in 5 cm Tiefe und tritt nach 60 Minuten auf. Er beträgt 29,4 °C (ENV: 526,0°C / prEN: 496,6°C).

Tabelle 4.3: Temperaturdifferenzen im Balken 10/40 cm

		Branddauer [min]	
		30	60
ENV - prEN	max. ΔT [°C]	19,6	29,4
	Mittelwert [°C]	16,4	22,7
MW - prEN	max. ΔT [°C]	48,8	33,3
	Mittelwert [°C]	16,0	16,2

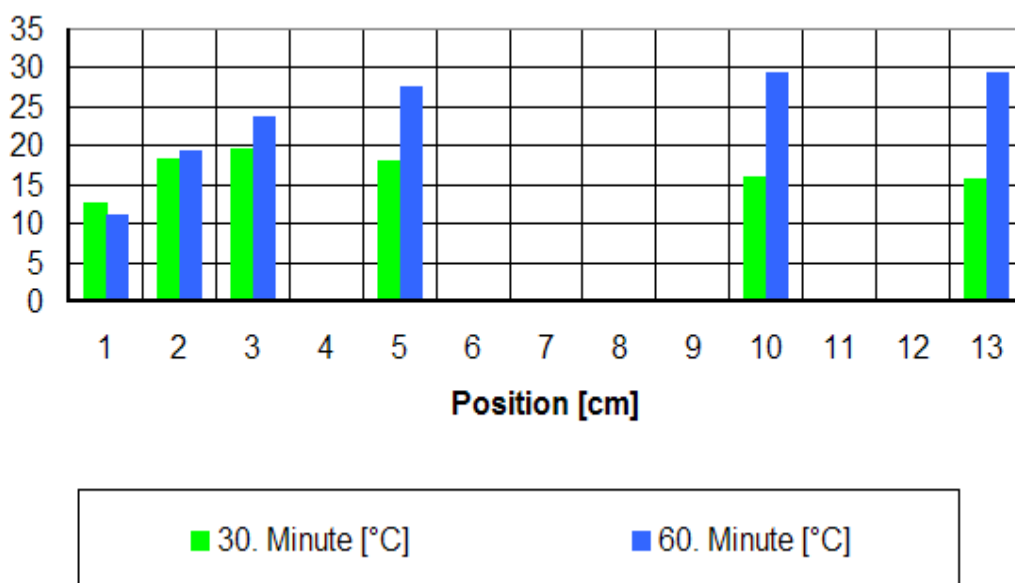


Bild 4.10: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 1 – 6 im Balken 10/40 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammtter Bauteiloberfläche)

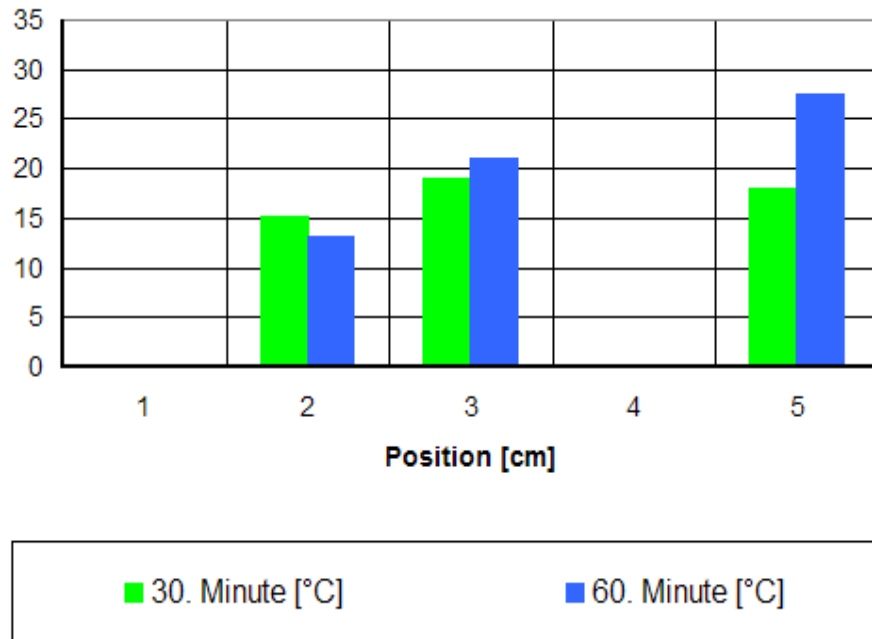


Bild 4.11: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 7, 8 und 4 im Balken 10/40 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammtter Bauteiloberfläche)

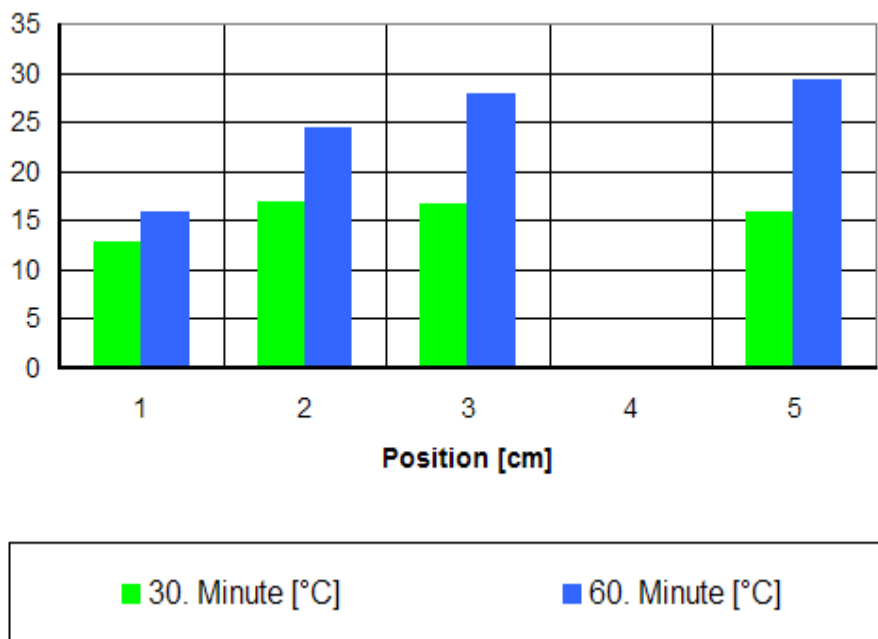


Bild 4.12: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 9 – 12 im Balken 10/40 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammtter Bauteiloberfläche)

In Bild 4.13 und 4.14 sind alle nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen den nach ENV 1992-1-2 berechneten und den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

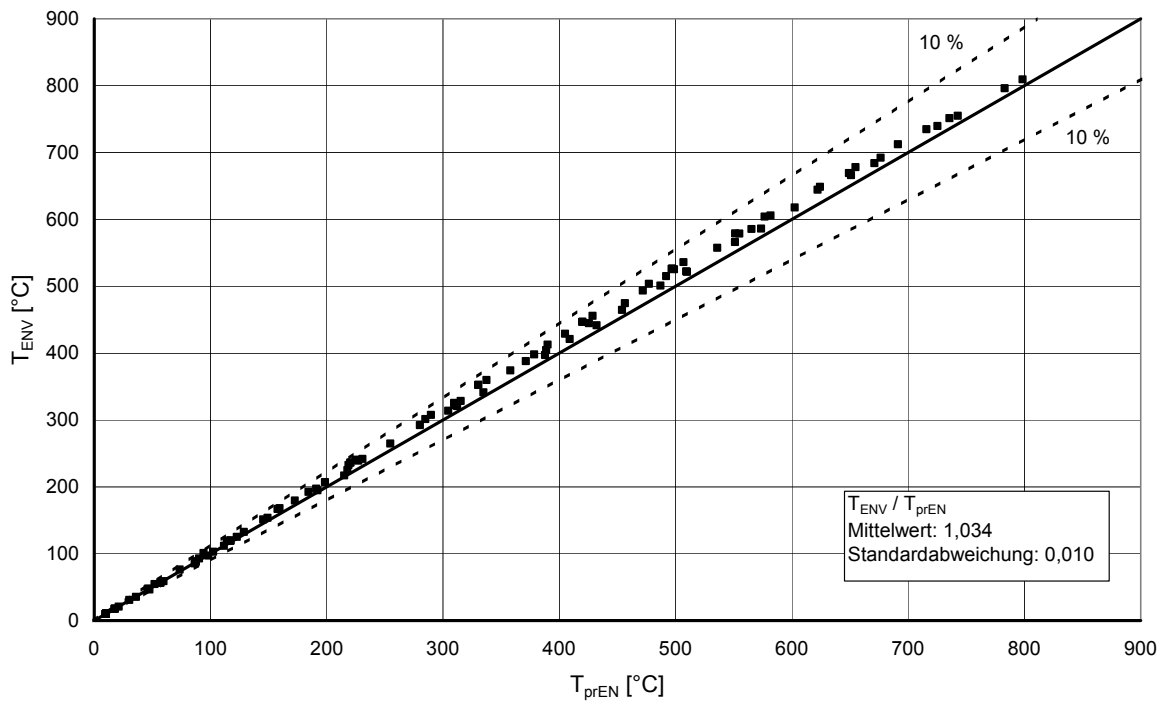


Bild 4.16: Vergleich der nach ENV 1992-1-2 und nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Balken 10/40 cm

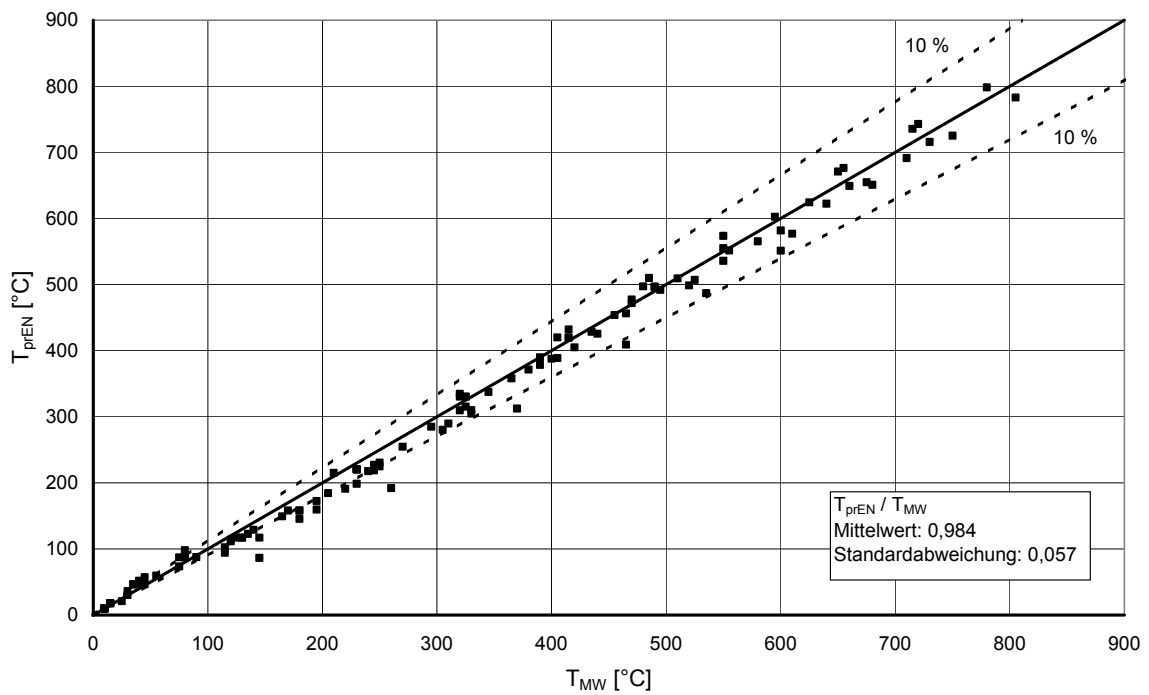


Bild 4.17: Vergleich der gemessenen und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Balken 10/40 cm

4.3.5 Stütze b/d = 30/30 cm

Die Temperatur-Zeit-Verläufe der Stütze 30/30 cm werden im Anhang B-1 in den Diagrammen B.31 – B.39, die dazugehörigen Auswertungen im Anhang C-1 in den Tabellen C.31 – C.39 und die Lage der Messpunkte im Stützenquerschnitt in Bild 2.5 dargestellt.

Die Bilden 4.15 und 4.16 und Tabelle 4.4 zeigen, dass die größten Temperaturunterschiede in den äußeren 5 cm des Querschnitts auftreten. Die maximal berechnete Temperaturdifferenz beträgt nach 90 Minuten 33,4 °C (ENV: 559,0 °C / prEN: 525,6 °C), sie wird in 3 cm Bauteiltiefe gemessen.

Tabelle 4.4: Temperaturdifferenzen in der Stütze 30/30 cm

		Branddauer [min]		
		30	60	90
ENV - prEN	max. ΔT [°C]	12,1	25,7	33,4
	Mittelwert [°C]	7,0	14,9	20,4
MW - prEN	max. ΔT [°C]	67,6	69,1	32,0
	Mittelwert [°C]	37,6	36,2	22,5

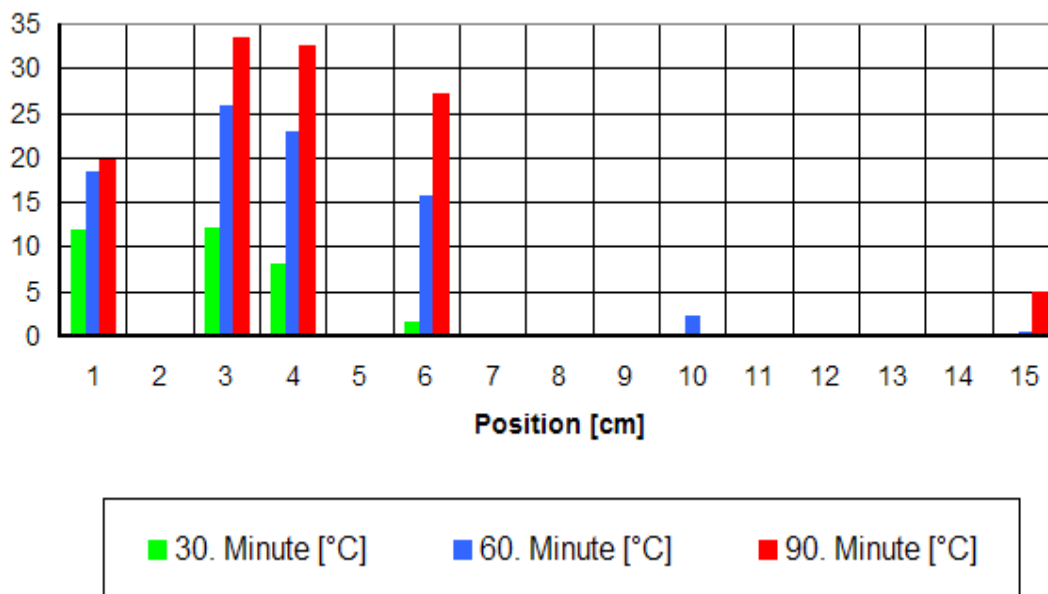


Bild 4.15: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 2 – 6 und 9 in der Stütze 30/30 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammtter Bauteiloberfläche)

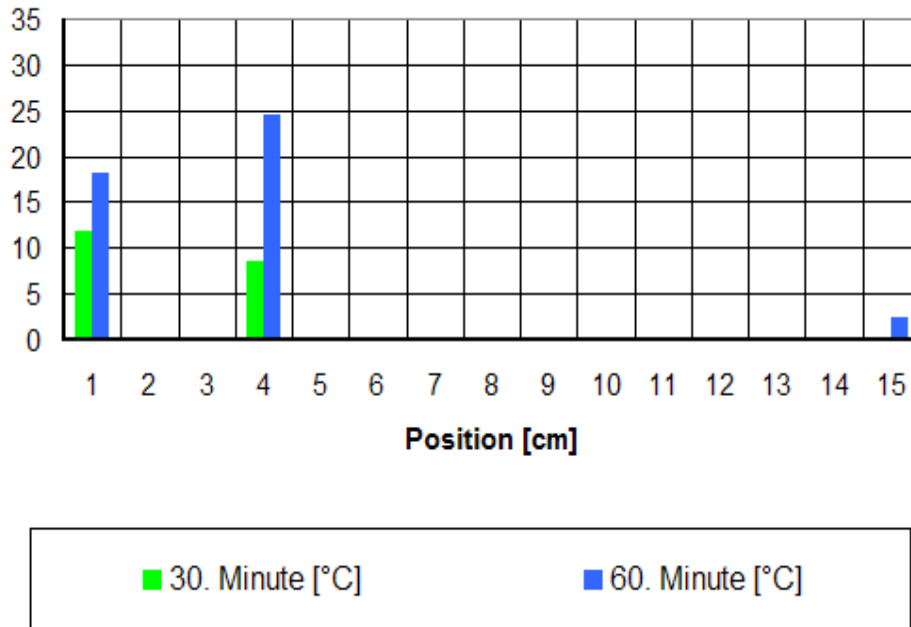


Bild 4.16: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 7 – 9 in der Stütze 30/30 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammtter Bauteiloberfläche)

In Bild 4.17 und 4.18 sind alle nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen den nach ENV 1992-1-2 berechneten und den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

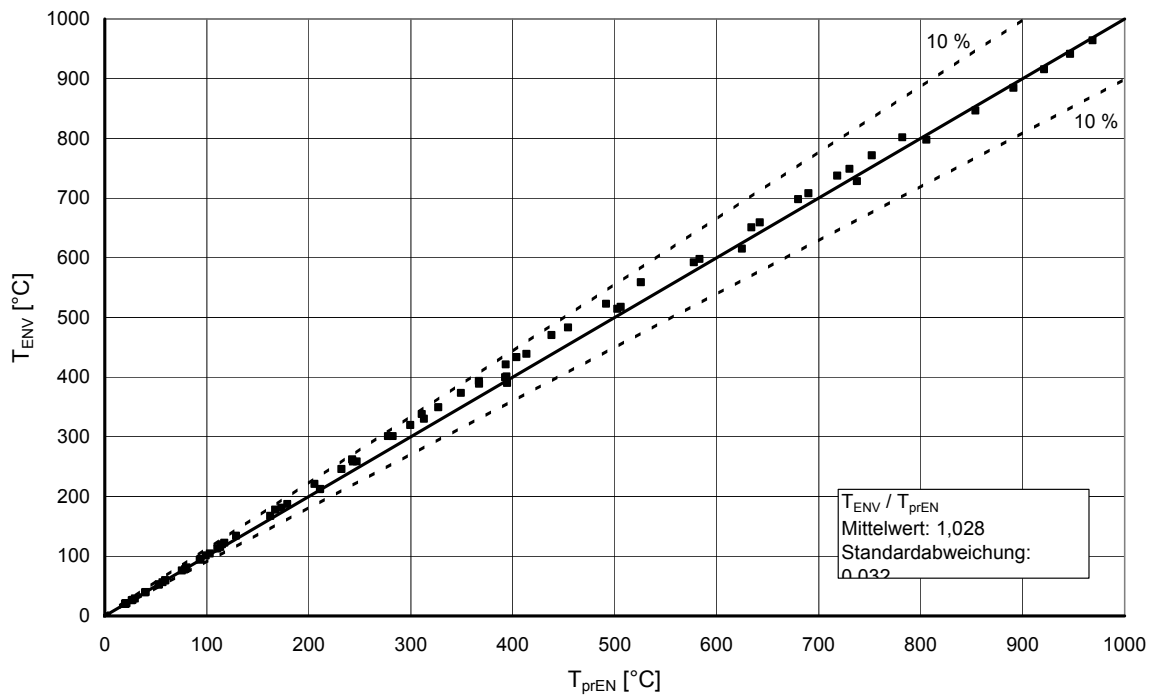


Bild 4.17: Vergleich der nach ENV 1992-1-2 und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Stützenquerschnitt 30/30 cm

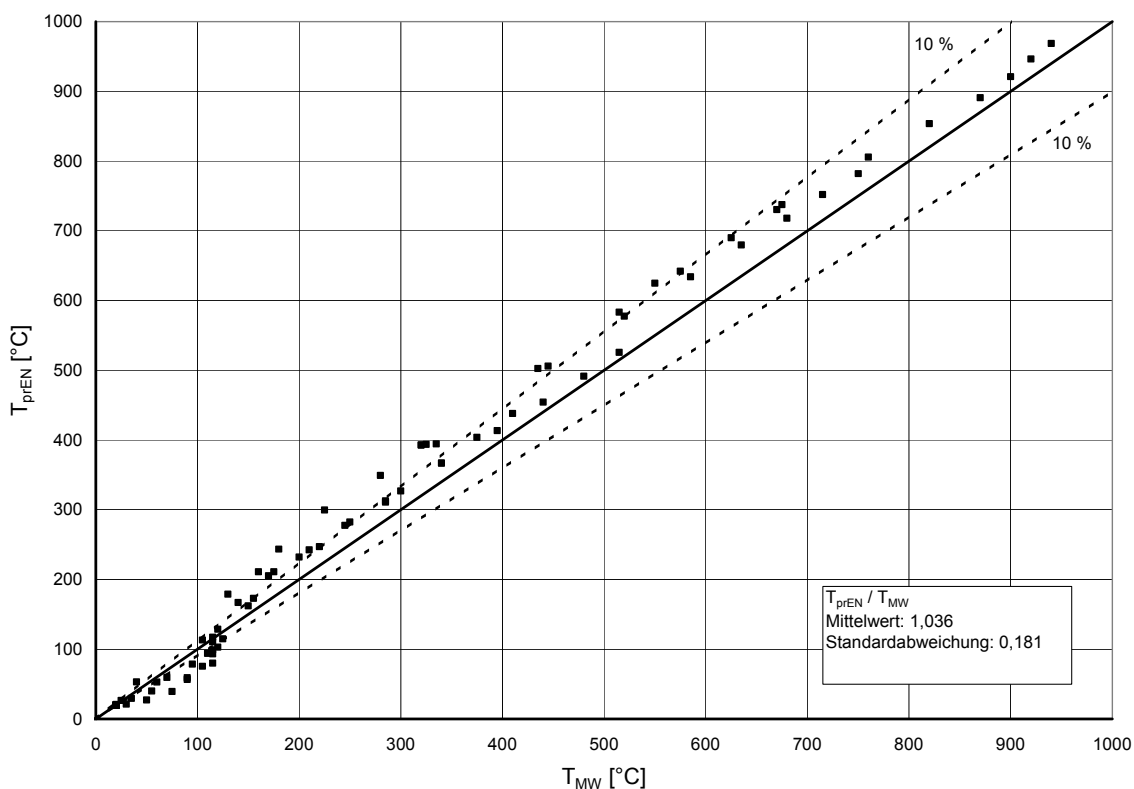


Bild 4.18: Vergleich der gemessenen und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Stützenquerschnitt 30/30 cm

4.3.6 Stütze b/d = 20/20 cm

Die Temperatur-Zeit-Diagramme für die Stütze 20/20 werden im Anhang B-1 (Diagramme B.40 – B.42), die dazugehörigen Auswertungen im Anhang C-1 (Tabellen C.40 – C.42) und die Lage der Messpunkte im Stützenquerschnitt in Bild 2.5 (rechts) dargestellt.

Nach Bild 4.20 und Tabelle 4.5 treten die größten Temperaturunterschiede zwischen ENV 1992-1-2 und prEN 1992-1-2 in einer Bauteiltiefe von ca. 3 cm nach 60 Minuten mit 28,2 °C (ENV: 490,0 °C / prEN 461,8 °C) auf.

Tabelle 4.5: Temperaturdifferenzen in der Stütze 20/20 cm

		Branddauer [min]	
		30	60
ENV - prEN	max. ΔT [°C]	12,7	28,2
	Mittelwert [°C]	7,4	26,1
MW - prEN	max. ΔT [°C]	78,8	81,8
	Mittelwert [°C]	47,4	70,8

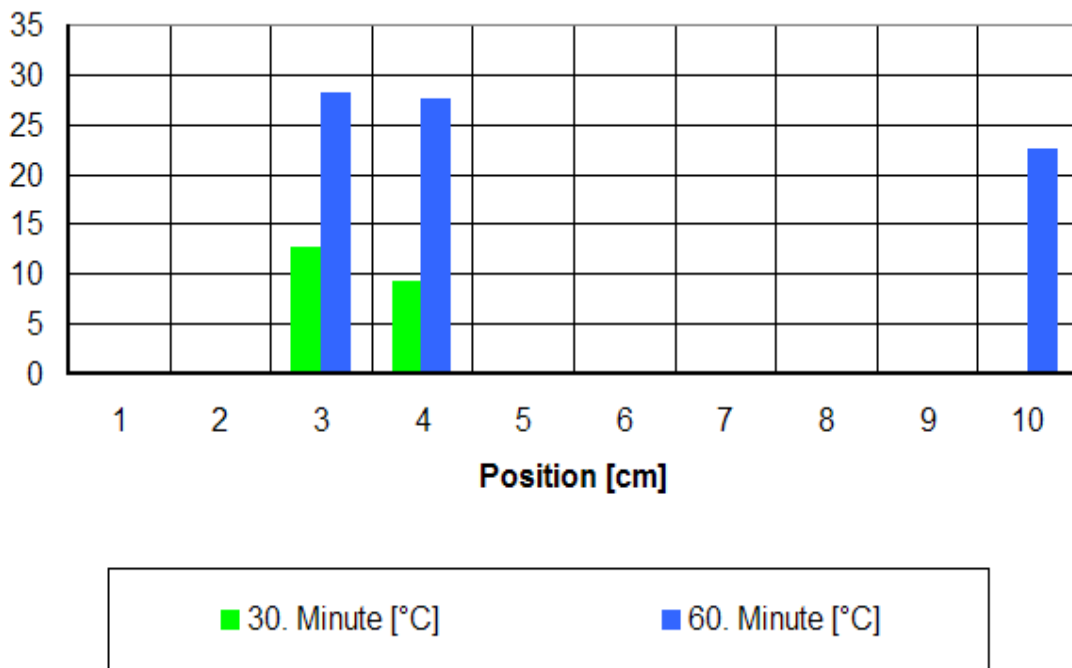


Bild 4.19: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 1 – 3 in der Stütze 20/20 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammteter Bauteiloberfläche)

In Bild 4.20 und 4.21 sind alle nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen den nach ENV 1992-1-2 berechneten und den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

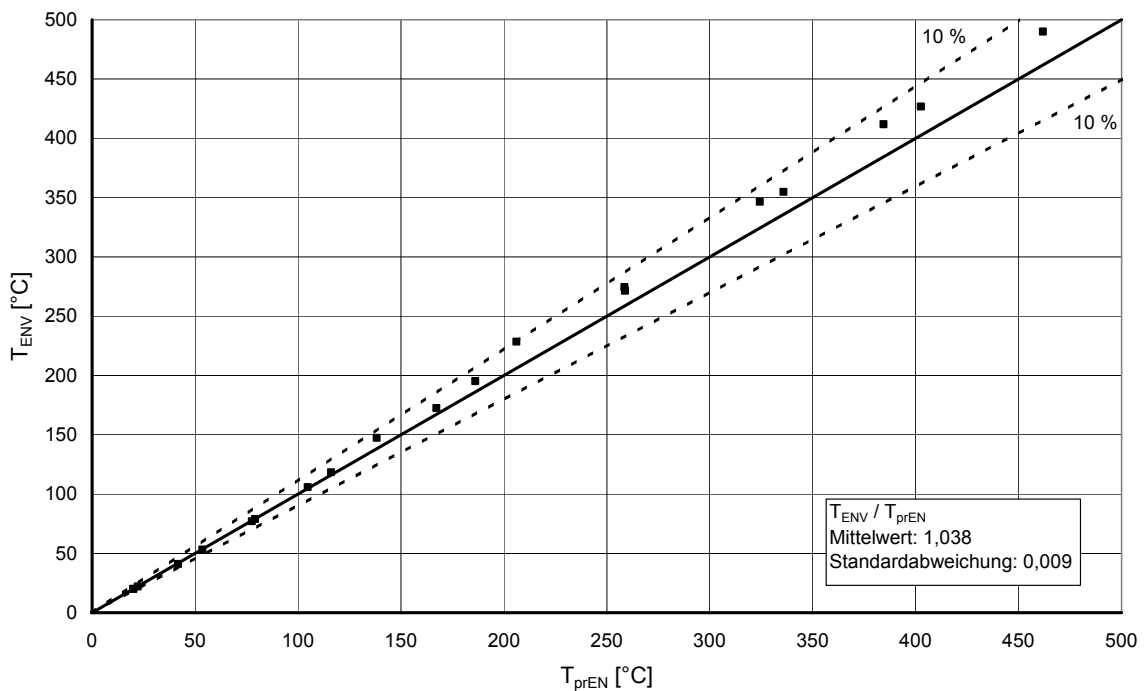


Bild 4.25: Vergleich der nach ENV 1992-1-2 und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Stützenquerschnitt 20/20 cm

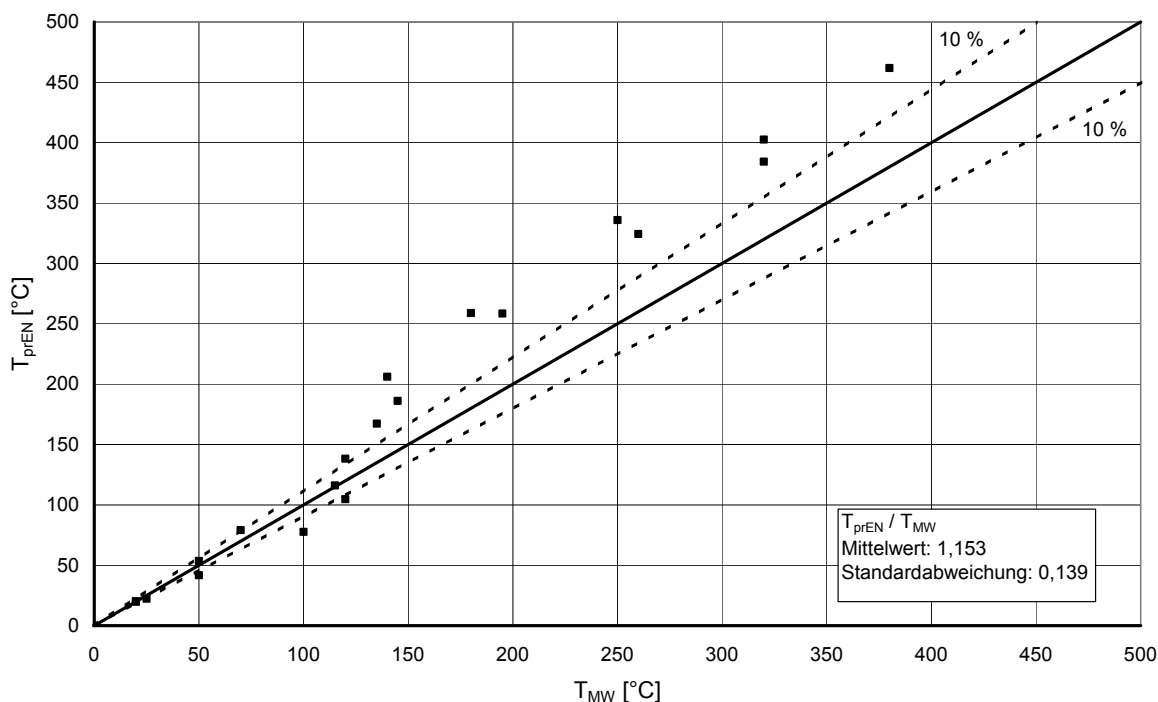


Bild 4.26: Vergleich der gemessenen und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Stützenquerschnitt 20/20 cm

4.3.7 Balken b/d = 20/40 cm („trocken“)

Für den Balken 20/40 cm „trockenen“ sind die Ergebnisse der Auswertungen im Anhang C-2 in den Tabellen C.43 – C.48 und die Temperatur-Zeit-Diagramme im Anhang B-2 (Diagramme B.43 – B.48) zusammengestellt. Die Lage der Messpunkte im Balkenquerschnitt ist in Bild 2.4 (links) dargestellt.

Bild 4.22 und Tabelle 4.6 zeigen den größten Temperaturunterschied von 32,0°C (ENV: 518,2 °C / prEN: 486,2 °C) für die Bauteiltiefe von 5 cm.

Tabelle 4.6: Temperaturdifferenzen in dem „trockenen“ Balken 20/40

		Branddauer [min]		
		30	60	90
ENV - prEN	max. ΔT [°C]	14,0	25,7	32,0
	Mittelwert [°C]	7,6	19,0	25,2
MW - prEN	max. ΔT [°C]	79,5	131,5	137,0
	Mittelwert [°C]	59,7	69,2	50,4

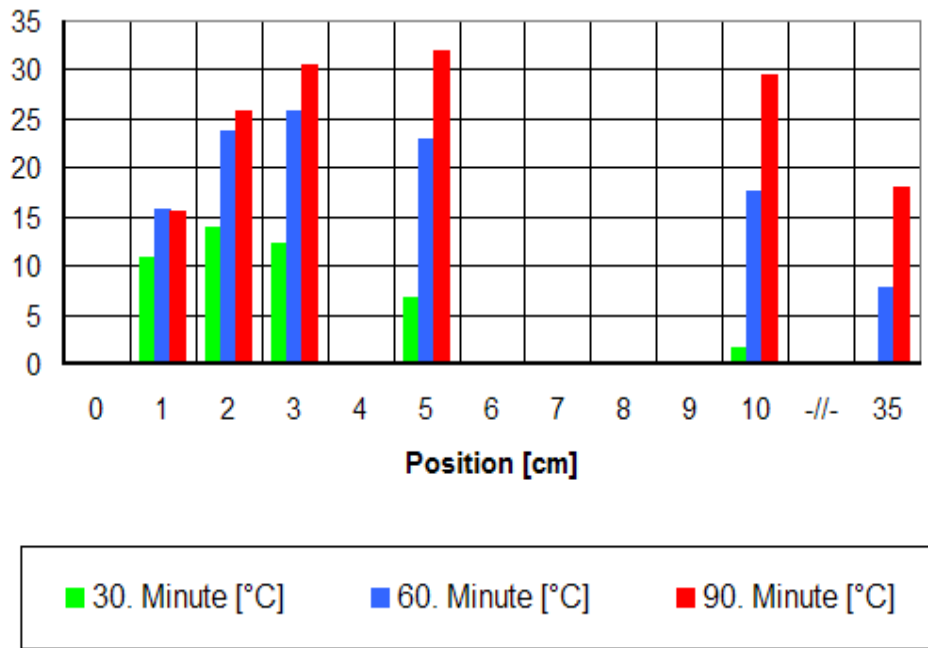


Bild 4.22: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 1 – 6 im Balken 20/40 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammteter Bauteiloberfläche)

In Bild 4.20 und 4.21 sind alle nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen den nach ENV 1992-1-2 berechneten und den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

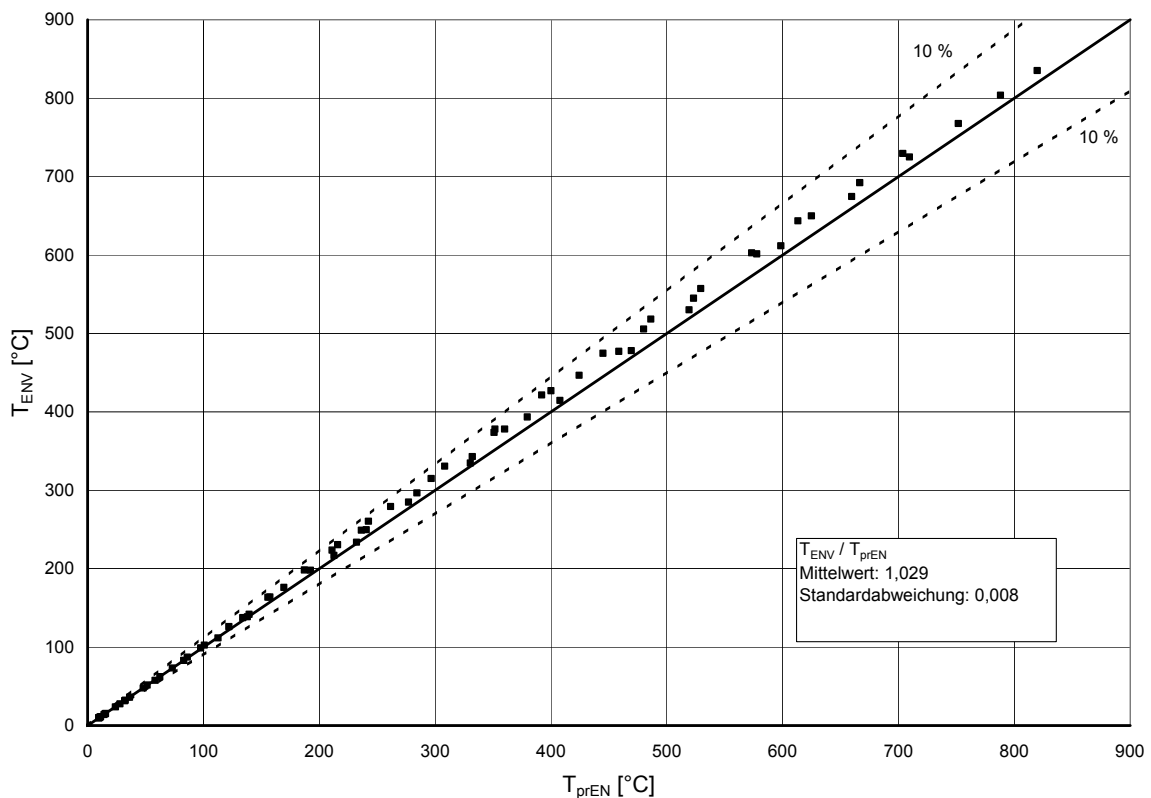


Bild 4.23: Vergleich der nach ENV 1992-1-2 und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Balkenquerschnitt 20/40 cm („trocken“)

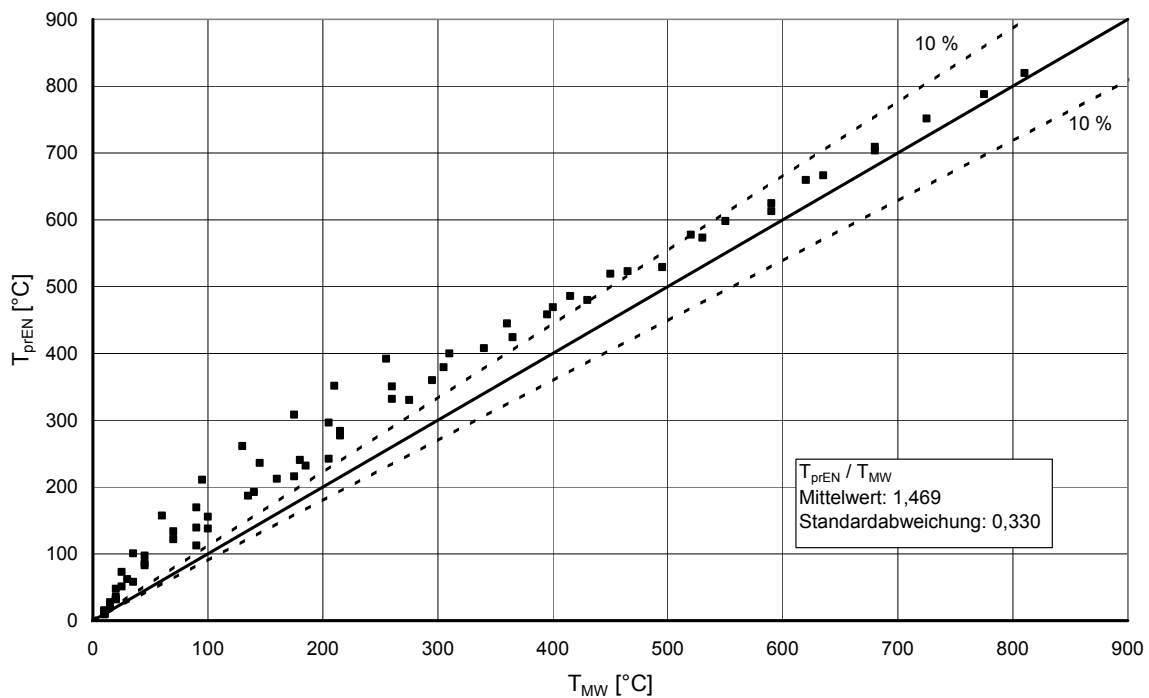


Bild 4.24: Vergleich der gemessenen und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Balkenquerschnitt 20/40 cm („trocken“)

4.3.8 Balken b/d = 10/40 cm („trocken“)

Die Ergebnisse der Auswertungen für den „trockenen“ Balken 10/40 sind im Anhang C-2 (Tabellen C.49 – C.54), die dazugehörigen Temperatur-Zeit-Diagramme im Anhang B-2 (Diagramme B.49 – B.54) und die Lage der Messpunkte im Balkenquerschnitt in Bild 2.4 (rechts) dargestellt.

Bild 4.25 und Tabelle 4.7 zeigen als maximale Temperaturdifferenz in 10 cm Bauteiltiefe nach 60 Minuten Branddauer $26,4^{\circ}C$ (ENV: $555,5^{\circ}C$ / prEN: $529,1^{\circ}C$).

In Bild 4.26 und 4.27 sind alle nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen den nach ENV 1992-1-2 berechneten und den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

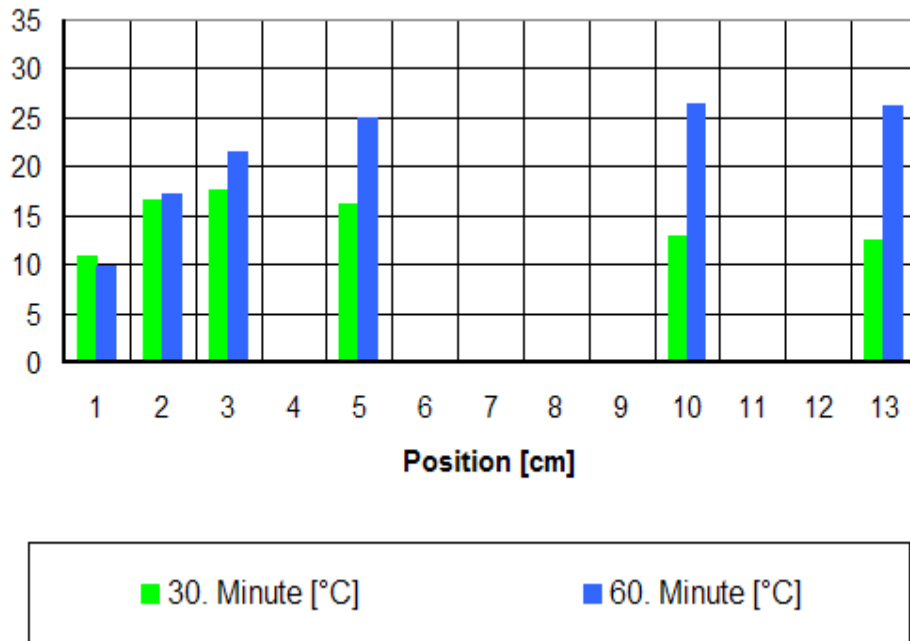


Bild 4.24: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte 1 – 6 im Balken 10/40 cm (Position bezeichnet den kleinsten Abstand zwischen Querschnittspunkt und beflammteter Bauteiloberfläche)

Tabelle 4.7: Temperaturdifferenzen in dem „trockenen“ Balken 10/40 cm

		Branddauer [min]	
		30	60
ENV - prEN	max. ΔT [°C]	17,6	26,4
	Mittelwert [°C]	14,4	21,0
MW - prEN	max. ΔT [°C]	48,0	40,2
	Mittelwert [°C]	29,8	17,4

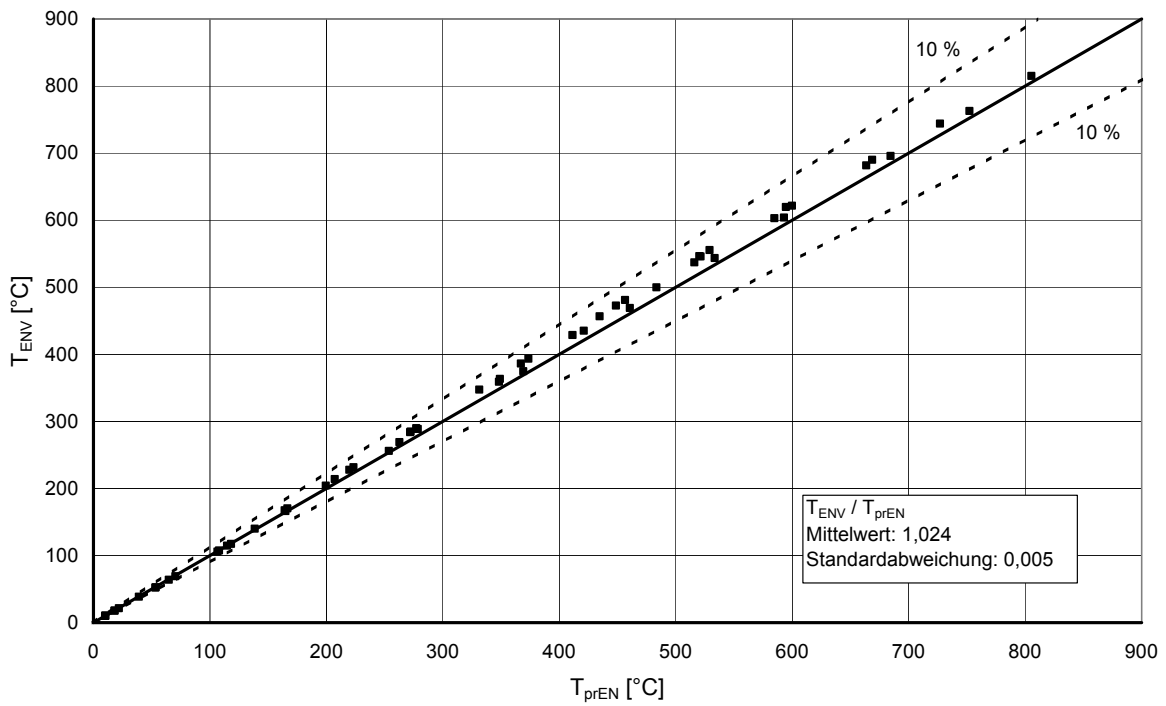


Bild 4.26: Vergleich der nach ENV 1992-1-2 und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Balkenquerschnitt 10/40 cm („trocken“)

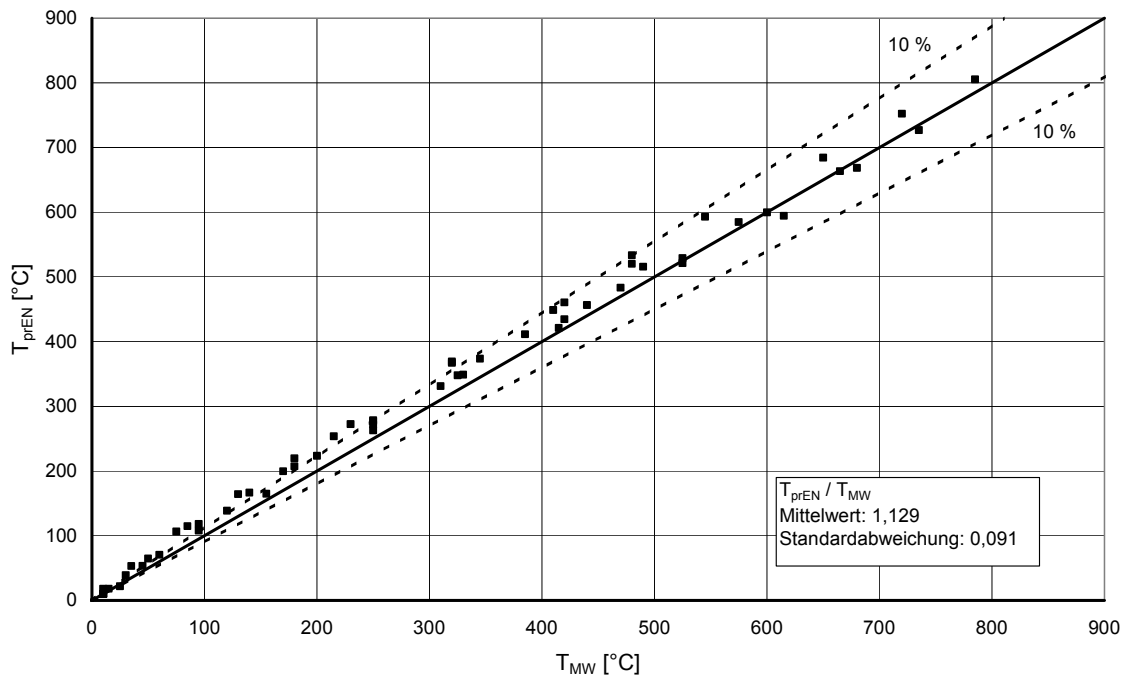


Bild 4.27: Vergleich der gemessenen und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Balkenquerschnitt 10/40 cm („trocken“)

4.3.9 Wand d = 10 cm

Für die 10cm dicke Wand sind die Temperatur-Zeit-Diagramme im Anhang B-3 in den Diagrammen B.55 – B.59 und die Auswertungen im Anhang C-3 in den Tabellen C.55 – C.59 zusammengefasst. Bild 2.6 (links) zeigt die Lage der Messpunkte im Wandquerschnitt.

In Bilden 4.28 und Tabelle 4.8 sind die berechneten Temperaturdifferenzen aufgetragen. Der größte Temperaturunterschied zwischen ENV- und prEN-Berechnung ergibt sich in 4 cm Bauteiltiefe nach 180 Minuten zu 40,5°C (ENV: 648,6°C / prEN: 608,1°C) (Tabellen C.55 – C.59 im Anhang C-3).

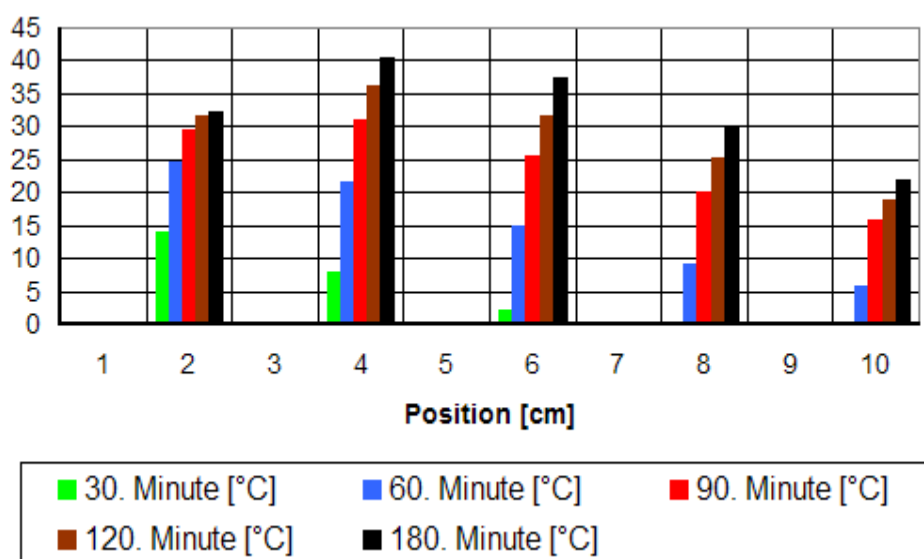


Bild 4.28: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte in der 10cm dicken Wand

Tabelle 4.8: Temperaturdifferenzen in der 10cm dicken Wand

		Branddauer [min]				
		30	60	90	120	180
ENV - prEN	max. ΔT [°C]	14,0	24,7	30,9	36,2	40,5
	Mittelwert [°C]	4,9	15,3	20,3	28,0	32,6
MW - prEN	max. ΔT [°C]	58,8	73,3	40,1	43,4	91,9
	Mittelwert [°C]	15,8	37,1	25,8	25,1	36,8

In Bild 4.29 und 4.30 sind alle nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen den nach ENV 1992-1-2 berechneten und den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

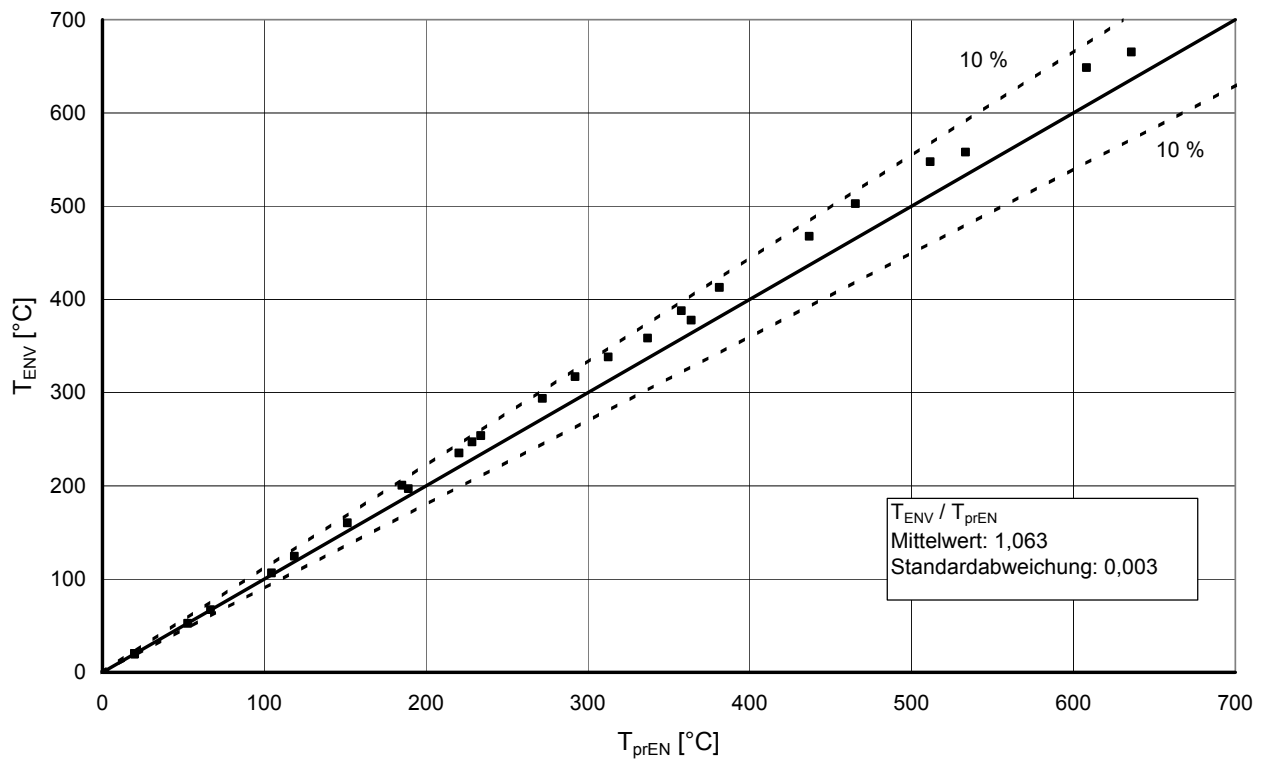


Bild 4.29: Vergleich der nach ENV 1992-1-2 und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Wandquerschnitt $d = 10\text{ cm}$

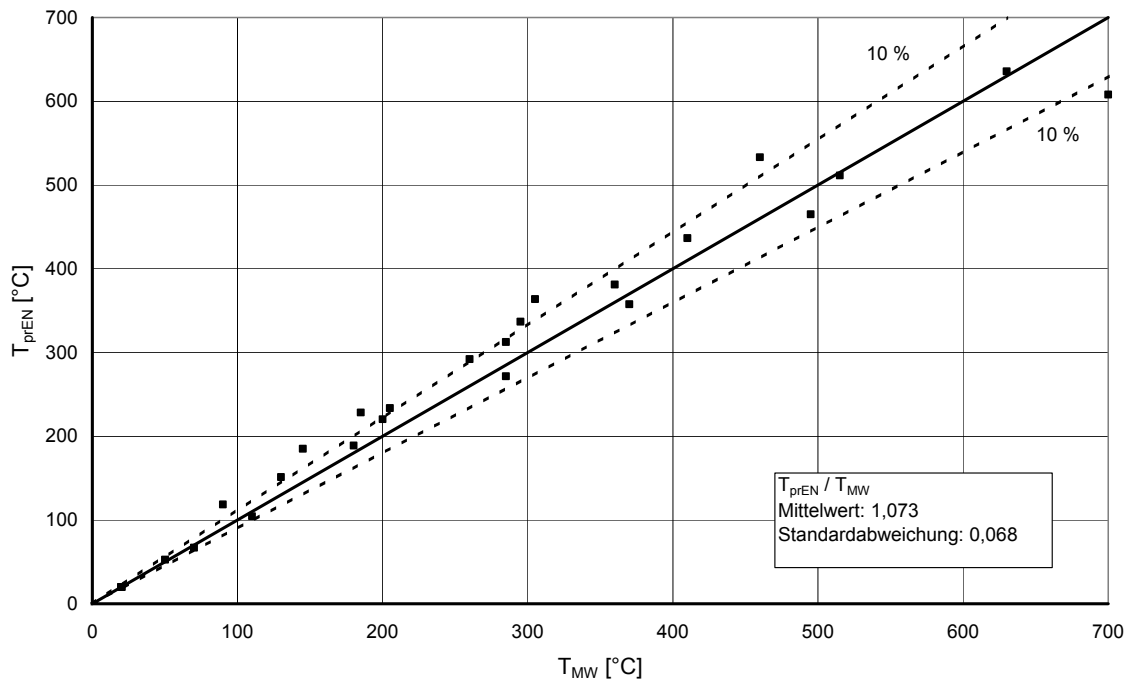


Bild 4.30: Vergleich der gemessenen und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Wandquerschnitt $d = 10\text{ cm}$

4.3.10 Wand d = 15 cm

Die Auswertungen der Temperaturberechnungen für die 15cm dicke Wand sind im Anhang C-3 (Tabellen C.60 – C.67) zusammengestellt. Die dazugehörigen Temperatur-Zeit-Diagramme sind im Anhang B-3 (Diagramme B.60 – B.67) dargestellt. Bild 2.6 (rechts) zeigt die Lage der Messpunkte im Wandquerschnitt.

Nach Bild 4.31 und Tabelle 4.9 tritt die größte Temperaturdifferenz zwischen ENV 1992-1-2 und prEN 1992-1-2 in der Bauteiltiefe von 4 cm nach 180 Minuten mit 42,5 °C (ENV: 637,2 °C / prEN: 594,7 °C) auf.

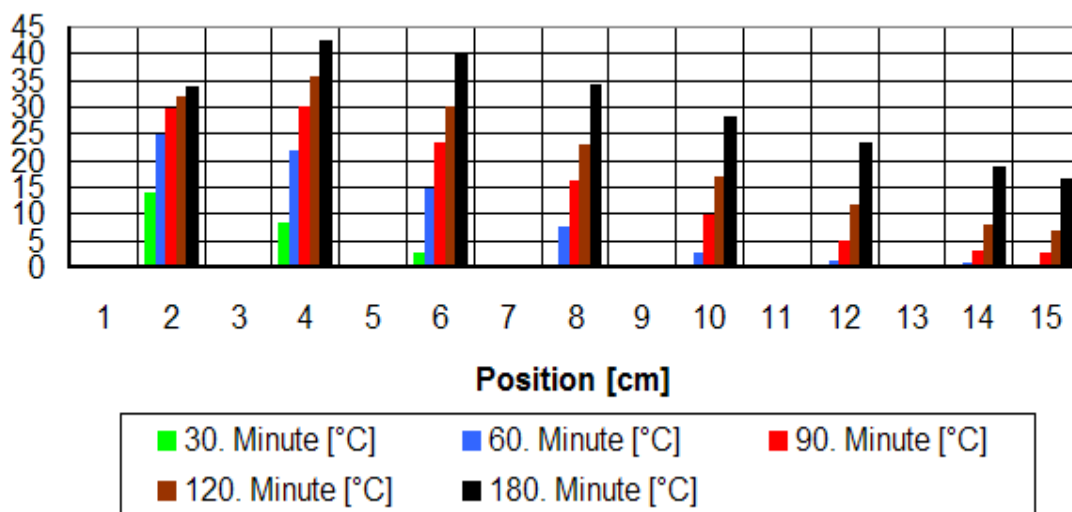


Bild 4.31: Temperaturdifferenz aus ENV- und prEN 1992-1-2 Berechnung für die Querschnittspunkte in der 15 cm dicken Wand

Tabelle 4.9: Temperaturdifferenzen in der 15cm dicken Wand

		Branddauer [min]				
		30	60	90	120	180
ENV - prEN	max. ΔT [°C]	14,0	24,9	30,0	35,6	42,5
	Mittelwert [°C]	3,2	9,2	15,0	18,8	29,0
MW - prEN	max. ΔT [°C]	58,5	80,0	22,7	33,2	105,3
	Mittelwert [°C]	12,9	18,8	14,1	19,6	32,0

In Bild 4.32 und 4.33 sind alle nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen den nach ENV 1992-1-2 berechneten und den gemessenen Temperaturen gegenübergestellt.

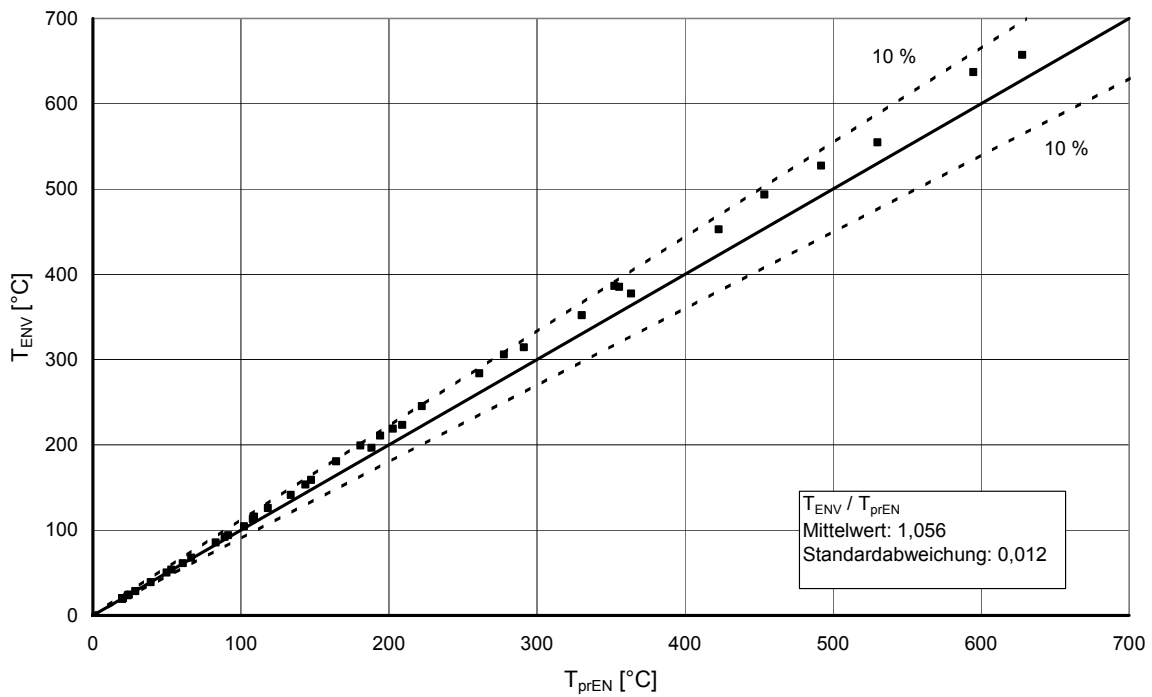


Bild 4.32: Vergleich der nach ENV 1992-1-2 und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Wandquerschnitt $d = 15\text{ cm}$

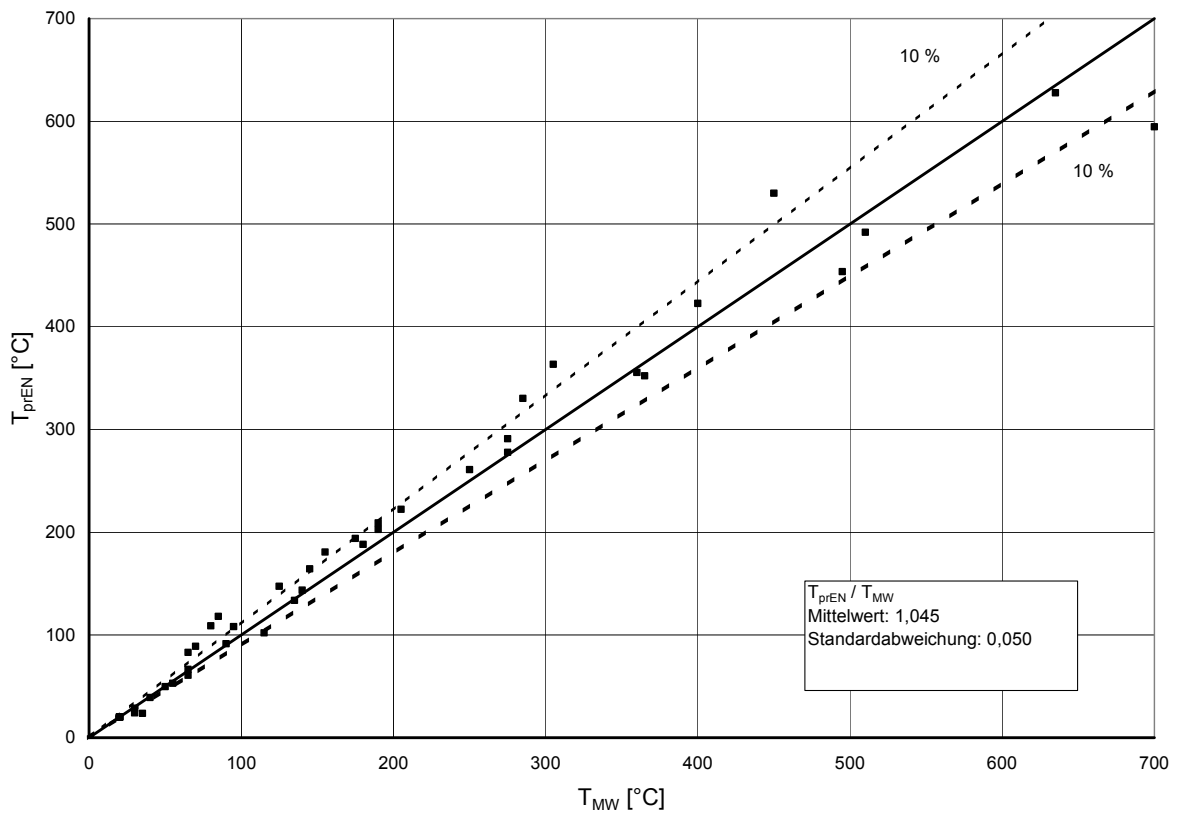


Bild 4.33: Vergleich der gemessenen und der nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen im Wandquerschnitt $d = 15\text{ cm}$

4.4 Zusammenfassung

Im Anhang B zeigen die Bilder B1 bis B.67 die Temperaturentwicklung in den unterschiedlichen Bauteilquerschnitten in Form gemessener und berechneter Temperaturen über der Branddauer. Die Auswertung der Temperaturen, insbesondere hinsichtlich der maximalen Differenz zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen wurde im Abschnitt 4.3 und Anhang C vorgenommen.

In den Tabellen 4.10 bis 4.12 werden die Ergebnisse aus Abschnitt 4.3 und Anhang C zusammengefasst. Dabei werden die Ergebnisse nach Bauteilfeuchtigkeit geordnet. Tabelle 4.10 gilt für Bauteile mit 3 Gew.-% Feuchte, Tabelle 4.11 für Bauteile mit 0 Gew.-% Feuchte und Tabelle 4.12 für Bauteile mit 1,5 Gew.-% Feuchte. Für die Temperaturwerte $T_{prEN}/T_{Messwert}$, $T_{ENV}/T_{Messwert}$ und T_{ENV}/T_{prEN} werden Mittelwert x und Standardabweichung s angegeben. Alle Temperaturen T_{prEN} wurden mit dem oberen Grenzwert für die Wärmeleitfähigkeit ermittelt (Bild 3.2).

Tabelle 4.10 Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen für Bauteile mit 3,0 Gew.-% Feuchte

Bauteil	T_{prEN}/T_{MW}		T_{ENV}/T_{MW}		T_{ENV}/T_{prEN}	
	x	s	x	s	x	s
Durchlaufplatte	0,952	0,066	0,995	0,058	1,042	0,013
Balken 20/40	1,236	0,141	1,286	0,146	1,042	0,009
Balken 10/40	0,984	0,057	1,017	0,061	1,034	0,010
Stütze 30/30	1,036	0,181	1,068	0,200	1,028	0,032
Stütze 20/20	1,153	0,139	1,203	0,149	1,038	0,009

Tabelle 4.11 Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen für Bauteile mit 0 Gew.-% Feuchte

Bauteil	T_{prEN}/T_{MW}		T_{ENV}/T_{MW}		T_{ENV}/T_{prEN}	
	x	s	x	s	x	s
Balken 20/40	1,469	0,330	1,509	0,345	1,029	0,008
Balken 10/40	1,129	0,091	1,154	0,092	1,024	0,005

Tabelle 4.12 Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen für Bauteile mit 1,5 Gew.-% Feuchte

Bauteil	T_{prEN}/T_{MW}		T_{ENV}/T_{MW}		T_{ENV}/T_{prEN}	
	x	s	x	s	x	s
Wand 10cm	1,073	0,068	1,141	0,066	1,063	0,003
Wand 15cm	1,045	0,050	1,105	0,042	1,056	0,012

Der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen zeigt, dass die mit der prEN-Fassung berechneten Temperaturen T_{prEN} im Durchschnitt geringfügig über den Messwerten T_{MW} und im Durchschnitt etwas unter den mit der ENV-Fassung berechneten Temperaturen T_{ENV} liegen. Eine Ausnahme bilden die Temperaturen T_{prEN} in der Durchlaufplatte und im Balken 10/40 cm mit 3,0 Gew.-% Feuchte. Für diese beiden Bauteile liegen die mit der prEN-Fassung berechneten Temperaturen T_{prEN} geringfügig unter den gemessenen Temperaturen T_{MW} (Tab. 4.10). Bei der Durchlaufplatte beträgt diese Differenz im Bereich der kritischen Stahltemperatur $T_{krit} \approx 500^\circ\text{C}$ ($u = 3$ cm) $T_{prEN} - T_{MW} = |511,3 - 530| \approx 20$ K (Anhang C-1, Tab. C.2). Sie liegt damit im Bereich der Messgenauigkeit der Thermolemente (Abschnitt 2.1). Beim Balken 10/40 betragen die Differenzen im Bereich der kritischen Stahltemperatur $T_{krit} \approx 500^\circ\text{C}$ (3 cm $\leq u \leq 5$ cm) $|T_{prEN} - T_{MW}| < 22$ K (Anhang C-1, Tab. C.21, C.22 und C.26). Sie liegen damit, wie bei der Durchlaufplatte, im Bereich der Messgenauigkeit der Thermolemente (Abschnitt 2.1).

Zusammenfassend zeigen die Temperaturen T_{prEN} , die mit den thermischen Materialkennwerten der prEN 1992-1-2, unter Verwendung des oberen Grenzwertes für die Wärmeleitfähigkeit, berechnet wurden, im Durchschnitt eine geringfügig bessere Übereinstimmung mit den Messwerten T_{MW} , als die Temperaturen T_{ENV} , die mit thermischen Materialkennwerten der ENV 1992-1-2 berechnet wurden. Im gesamten Spektrum von 586 untersuchten Temperaturen liegen die Temperaturen T_{prEN} im Durchschnitt ca. 14 % (Bild 4.34) und die Temperaturen T_{ENV} ca. 19 % über den Messwerten T_{MW} (Bild 4.35). Die geringfügig höheren Temperaturen T_{ENV} im Vergleich mit T_{prEN} werden auch aus Bild 4.36 mit einem Mittelwert von $x = T_{ENV} / T_{prEN} = 1,036$ deutlich.

Im Rahmen einer brandschutztechnischen Bemessung liegen die Temperaturen T_{prEN} auf der „sicheren“ Seite, weil der damit berechnete Bauteilwiderstand kleiner ist als der im Brandversuch vorhandene Bauteilwiderstand und dadurch das rechnerische Bauteilversagen im Allgemeinen früher erreicht wird als das Versagen im Brandversuch.

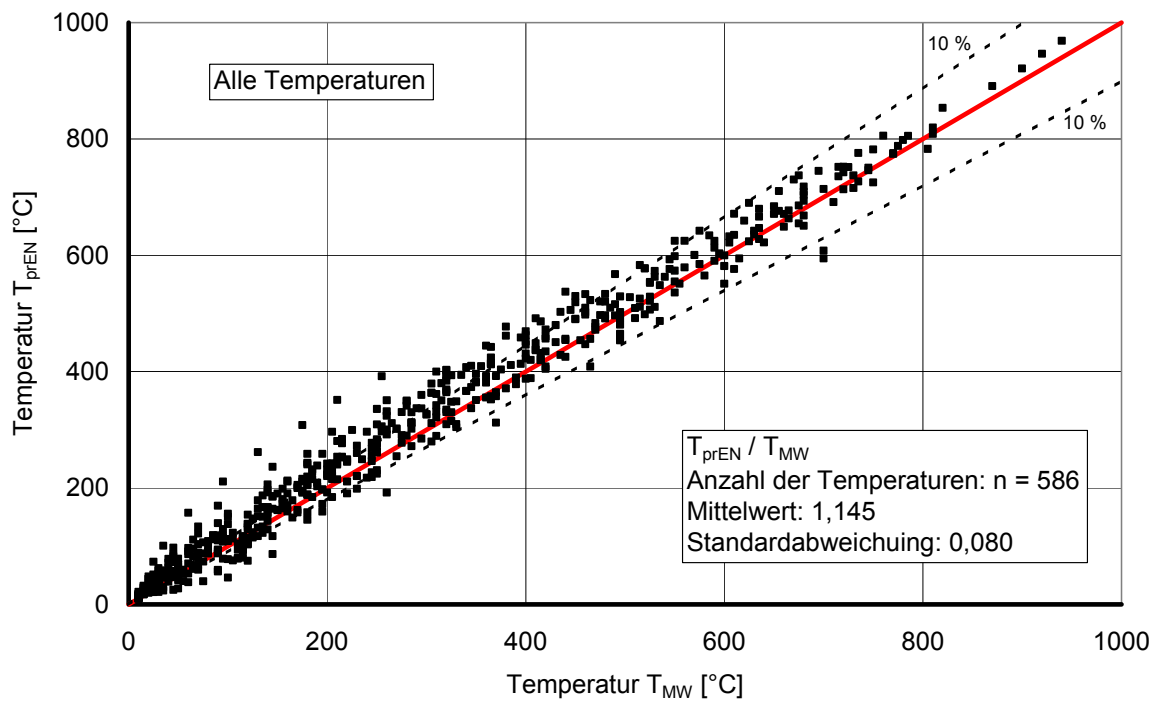


Bild 4.34: Vergleich aller gemessenen und aller nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen

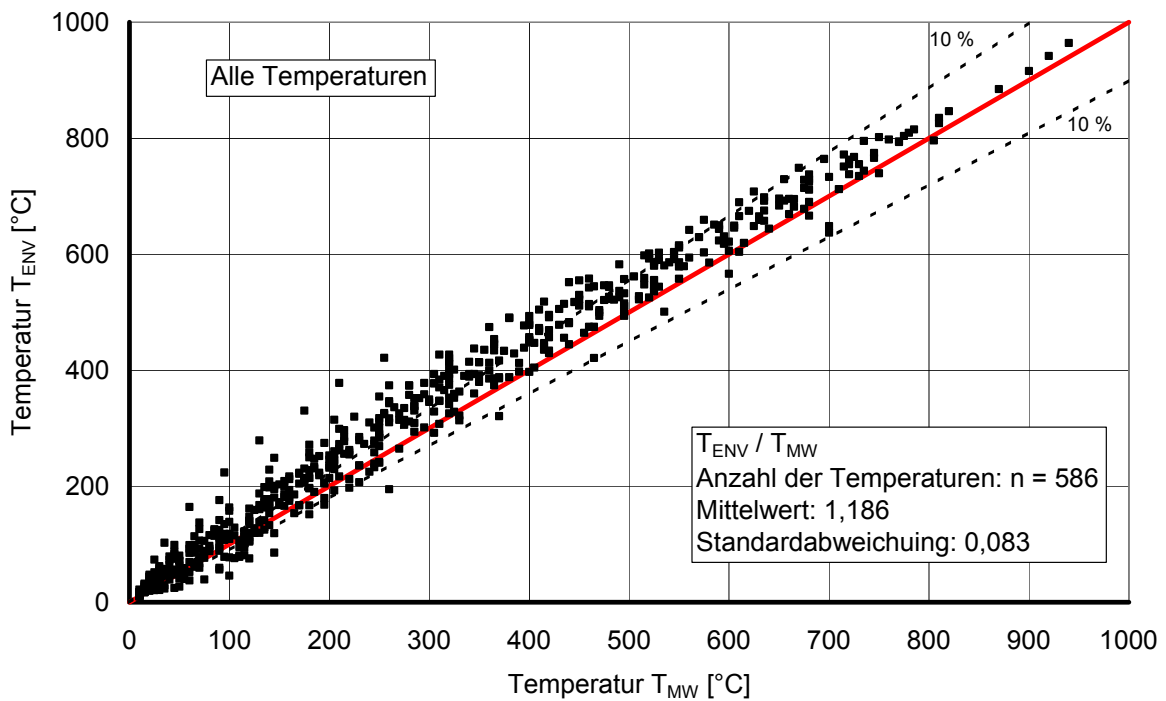


Bild 4.35: Vergleich aller gemessenen und aller nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen

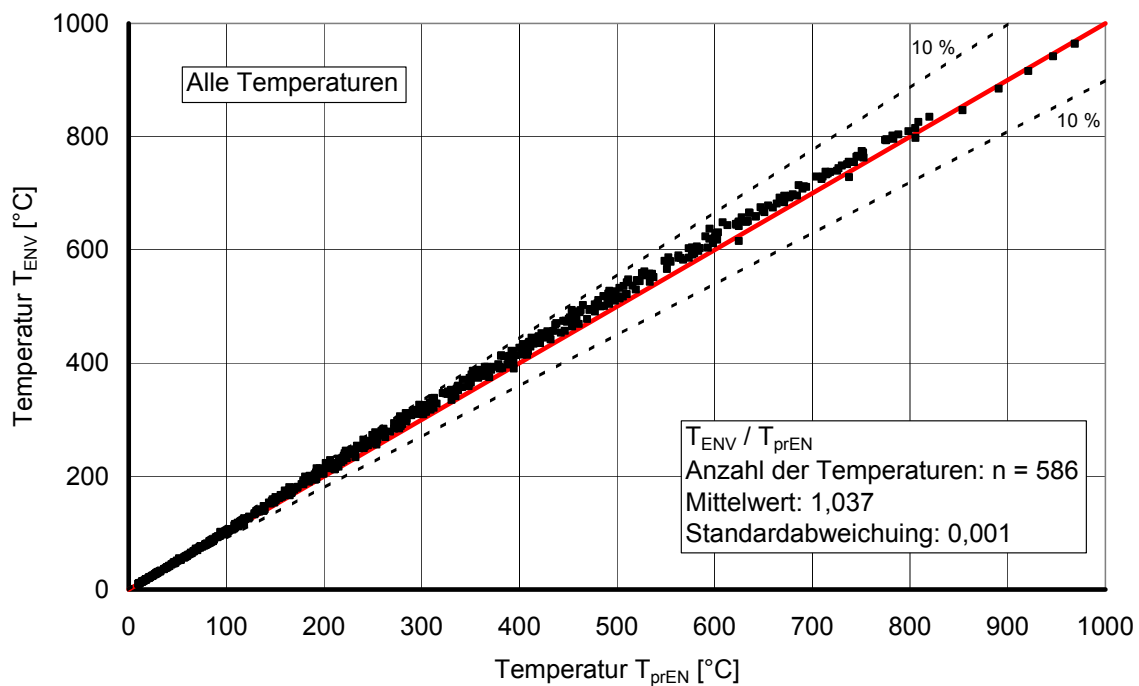


Bild 4.36: Vergleich aller nach ENV 1992-1-2 und aller nach prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen

5 BRANDSCHUTZTECHNISCHE BEMESSUNG

5.1 Vorbemerkungen

In diesem Abschnitt wird das Trag- und Verformungsverhalten von hochbautypischen Bauteilen berechnet. Dabei werden die thermischen Materialkennwerten nach der ENV- und der prEN-Fassung 1992-1-2, bei der prEN-Fassung in Verbindung mit dem oberen Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit, berücksichtigt. Die berechneten Ergebnisse werden anschließend mit Messwerten verglichen.

5.2 STABA-F

Nach dem Bemessungskonzept der ENV- und prEN-Fassung 1992-1-2 kann die brandschutztechnische Bemessung von Stahlbetonbauteilen auf rechnerischem Weg durchgeführt werden. In der vorliegenden Forschungsarbeit wird das Tragverhalten der Bauteile mit dem Programm STABA-F [12] berechnet, wobei das Erwärmungsverhalten mit dem darin implementierten Modul FIRES-T [16] erfolgt.

Das Programmpaket STABA-F stellt nach der ENV- und prEN-Fassung 1992-1-2 ein allgemeines Rechenverfahren dar, das aus thermischer und mechanischer Analyse besteht. In der thermischen Analyse wird – wie im Abschnitt 3 und 4 gezeigt – die Entwicklung und Verteilung der Bauteiltemperaturen berechnet. In der mechanischen Analyse wird das Tragwerks- und Bauteilverhalten unter Berücksichtigung der mechanischen Einwirkungen, der geometrischen Imperfektionen, der Wärmeeinwirkungen auf die temperaturabhängigen thermo-mechanischen Werkstoffeigenschaften und der geometrischen nichtlinearen Effekte (Theorie II. Ordnung) ermittelt.

5.3 Berechnung der Feuerwiderstandsdauer

5.3.1 Allgemeines

Es wird die Feuerwiderstandsdauer von vier Stahlbetonstützen und zwei Stahlbetonbalken berechnet. Außerdem wird für zwei Wandquerschnitte (Abschnitt 4.3.9 und 4.3.10) die Erwärmung auf der brandabgewandten Seite berechnet und die Temperaturen mit dem Wärmedämmkriterium der DIN 4102 Teil 2 verglichen.

5.3.2 Stützen

In [14] sind Ergebnisse von 20 Brandversuchen mit Stahlbetonstützen enthalten. Daraus werden mit dem Computerprogramm STABA-F vier Stützen nachgerechnet. Bild 5.1 zeigt die Querschnitte der berechneten Stützen und Tabelle 5.1 fasst die Randbedingungen der Brandversuche zusammen.

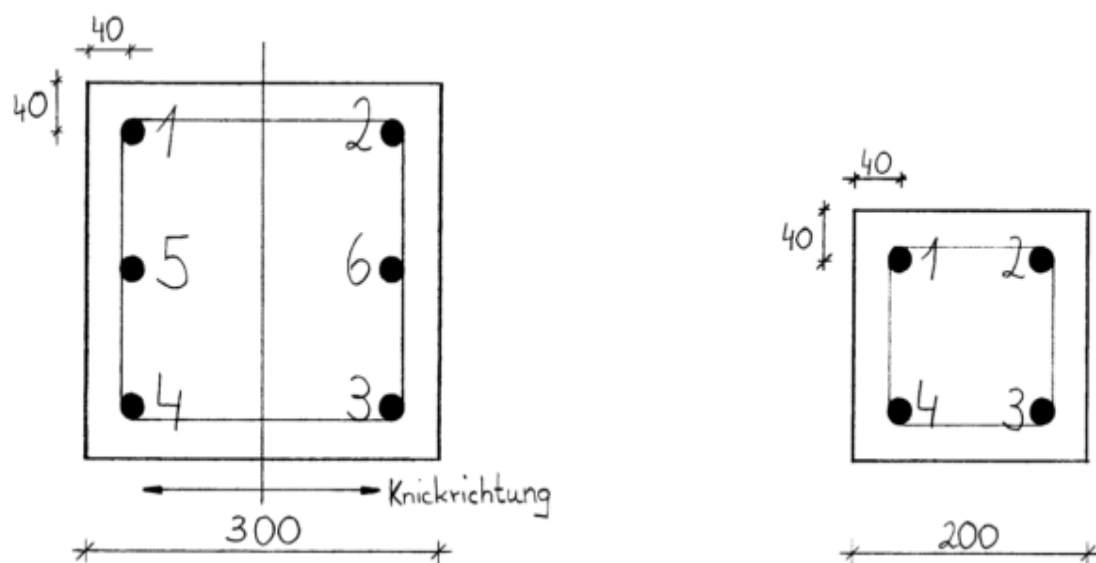


Bild 5.1: Stützenquerschnitte (nach [14]), links Stütze 1 und 2, rechts Stütze 3 und 4

Tabelle 5.1: Beschreibung der Versuchsrandbedingungen [14]

	Stütze 1 (2)*	Stütze 2 (4)*	Stütze 3 (14)*	Stütze 4 (16)*
Querschnitt [mm]	300/300		200/200	
Stützenlänge [m]	3,8	4,8	3,8	4,8
Schlankheit λ	44	55	66	83
Belastung N [kN]	930	880	420	340
Ausmitte	0			
Beton	B 25			
Dichte [kg/m ³]	2345			
Feuchtigkeit [Gew.-%]	2,0 - 6,0			
Zuschlag	quarzhaltig			
Längsbewehrung	6 \varnothing 20 BSt 420/500 RU		4 \varnothing 20 BSt 420/500 RU	
Brandraumtemperatur	ETK			
Lagerung im Brand	beidseitig rotationsbehindert			

* () : Versuchsnummer in [14]

Für die Berechnungen wurde die Betonfeuchte zu 3,0 Gew.-% angenommen. Außerdem wurde eine spannungslose, parabelförmige Vorverformung mit dem Scheitelwert $l/2000$ angenommen [17]. Dadurch werden in der Rechnung die versuchstechnisch bedingten Imperfektionen, zum Beispiel eine geringe ungewollte Abweichung bei der Lasteinleitung, berücksichtigt. Tabelle 5.2 stellt die berechneten und gemessenen Feuerwiderstandsdauern gegenüber.

Tabelle 5.2: Feuerwiderstandsdauern der Stützen

Feuerwiderstandsdauer [min]	Stütze 1	Stütze 2	Stütze 3	Stütze 4
mit ENV 1992-1-2	108	98	54	52
mit prEN 1992-1-2	119	108	59	55
Brandversuch [14, Tab. 7]	138	108	66	48

Erwartungsgemäß liegen die Feuerwiderstandsdauern, die mit der prEN-Fassung berechnet wurden, etwas über den Feuerwiderstandsdauern der ENV-Fassung und - bis auf eine Ausnahme - unter den Feuerwiderstandsdauern der Brandversuche. Die Ausnahme betrifft Stüt-

ze 4 mit der Schlankheit $\lambda \approx 83$. Bei dieser Schlankheit wirken sich versuchstechnisch bedingte Imperfektionen deutlich auf die im Brandversuch erreichte Feuerwiderstandsdauer aus. In [17] wird über starke Streuungen bei den Versuchsergebnisse von planmäßig mittig belasteten Stahlbetonstützen berichtet. Im Allgemeinen führt die bei der Berechnung angenommene Vorverformung $l/2000$ dazu, dass die berechneten Versagenszeiten im Durchschnitt kleiner sind als die im Brandversuch ermittelten Versagenszeiten. „Ausreißer“, wie beispielsweise Stütze 4, werden dadurch aber nicht abgedeckt.

In Tabelle 5.3 werden die Temperaturen der Bewehrung zur Versagenszeit wiedergegeben. Außerdem werden die im Versuch ermittelten Temperaturen aus [15, S. 63, 66, 74, 75] angegeben. Tabelle 5.3 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den nach ENV- und prEN-Fassung 1992-1-2 berechneten Temperaturen. Die Abweichungen zu den gemessenen Temperaturen sind nach [14] dadurch zu erklären, dass die Bewehrungsstäbe von ihrer planmäßigen Lage abwichen [14, Tabelle 9] und/oder eine nicht ausreichende Befestigung der Thermoelemente zu Temperaturdifferenzen von annähernd 200°C an vergleichbaren Messstellen führte [14, S.11].

Tabelle 5.3: Temperaturen in der Bewehrung zum Versagenszeitpunkt

Bewehrungsnummer		Temperatur [°C]			
		Stütze 1	Stütze 2	Stütze 3	Stütze 4
1, 2, 3, 4	ENV 1992-1-2	753	723	541	528
	prEN 1992-1-2	755	725	545	523
	Brandversuch	720 787 i. M. 780 700 747	640 i. M. 677 659	463 i. M. 487 488 493 507	360 i. M. 380 387 387 420
5, 6	ENV 1992-1-2	548	517	---	---
	prEN 1992-1-2	545	514	---	---
	Brandversuch	660	440 i. M. 467 454	---	---

5.3.3 Balken

In [11] wird über Brandversuche an statisch bestimmt gelagerten Balken berichtet. Die Versuche dienten als Grundlage für die Neufassung der DIN 4102. Es werden zwei Brandversuche mit den thermischen Materialgesetzen nach ENV 1992-1-2 und prEN 1992-1-2 – oberer Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit - nachgerechnet. In Bild 5.2 werden die Balkenquerschnitte und in Bild 5.3 wird das statische System und die Lastanordnung dargestellt. Tabelle 5.4 enthält die Versuchsrandbedingungen. Mit dem Balkenquerschnitt $b/d = 150/350$ mm wurden zwei Brandversuche durchgeführt, die sich lediglich dadurch unterschieden, dass im zweiten Brandversuch eine Schutzbewehrung zur Sicherung der 50 mm dicken Betondeckung angeordnet war.

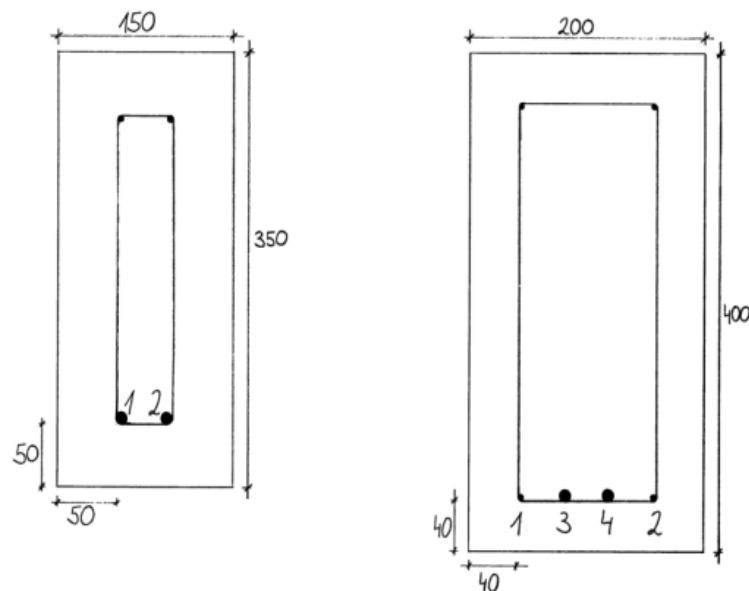


Bild 5.2: Balkenquerschnitte (nach [11]), links Balken 1 und rechts Balken 2

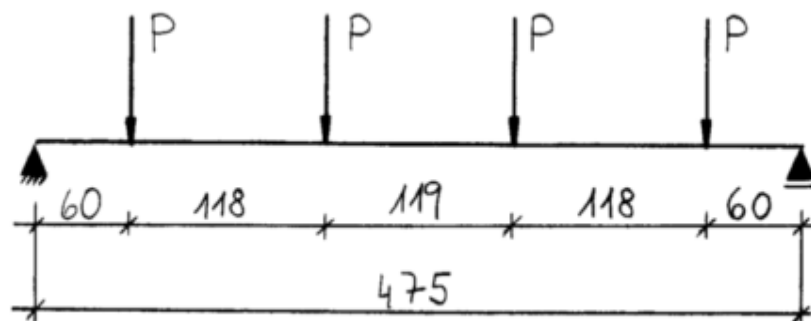


Bild 5.3: Statisches System und Lastanordnung (nach [11])

Tabelle 5.4: Beschreibung der Versuchsrandbedingungen (nach [11])

	Balken 1 (1,2)*		Balken 2 (3)*
Querschnitt [mm]	150/350		200/400
Stützweite [m]	4,75		
Belastung P [kN]	6,6		13,2
Beton B 300, β_w [N/mm ²]	38	44	52
Feuchtigkeitsgehalt [Gew.-%]	4,0		2,8
Zuschlag	Rheinkies		
Zugbewehrung St III b (~ BSt 420/500)			
1 und 2	Ø16 und Ø14		Ø10
3 und 4	---		Ø16
Brandbeanspruchung	ETK		
Lagerung	statisch bestimmt		

*(): Versuchsnummer in [11]

Balken 1 wurde mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 4 Gew.-% und Balken 2 mit 3 Gew.-% berechnet. Für beide Balken betrug die Rohdichte 2300 kg/m³. Tabelle 5.5 stellt die berechneten und die im Brandversuch ermittelten Feuerwiderstandsdauern [11, Tafel 14, S.105] gegenüber. Die Brandversuche wurden beendet, „als aufgrund der Durchbiegungszunahme deutlich zu erkennen war, dass das Versagen kurz bevorstand“ [11, S.103]. In den Berechnungen wurde der Zeitpunkt des Bauteilversagens unter Verwendung der temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für kaltverformten und naturharten Betonstahl aus ENV 1992-1-2 bestimmt. Dadurch enthält Tabelle 5.5 jeweils zwei Werte für die berechnete Feuerwiderstandsdauer, die als untere und obere Schranke die im Brandversuch beim Erreichen der kritischen Durchbiegegeschwindigkeit δ/δ_c gemessene Feuerwiderstandsdauer einschließen.

Interessant ist, dass im Brandversuch 1 und 2 mit dem Balkenquerschnitt $b/d = 150/350$ mm die kritische Durchbiegegeschwindigkeit δ/δ_c jeweils nach 92 Minuten Branddauer erreicht wurde, obwohl die Temperaturen in der Bewehrung stark unterschiedlich anstiegen. Bild 5.4 zeigt, dass nach 90 Minuten Branddauer im Brandversuch 1 die Temperaturen zwischen 420 °C und 460 °C und im Brandversuch 2 zwischen 450 °C und 580 °C lagen. Die mit den thermischen Materialkennwerten aus prEN 1992-1-2 berechneten Temperaturen $cal T_{prEN}$ stimmen annähernd mit den Messwerten aus dem Brandversuch 2 überein. Die Temperaturen $cal T_{ENV}$, die mit den thermischen Materialkennwerten aus ENV 1992-1-2 berechnet wur-

den, liegen geringfügig oberhalb der Messwerte des Brandversuchs 2. Die gleiche Tendenz gilt auch für die Temperaturen in der Bewehrung im Balken 2 mit dem Querschnitt $b/d = 200/400$ mm (Bild 5.5). Die beste Übereinstimmung zwischen Mess- und Rechenwerten wird für die im Eckbereich angeordneten Bewehrungsstäbe 1 und 2 mit den thermischen Materialkennwerten aus prEN 1992-1-2 erreicht, größere Abweichungen treten für die innen angeordneten Bewehrungsstäbe 3 und 4 auf.

Tabelle 5.5: Feuerwiderstandsdauern

Feuerwiderstandsdauer [min]	Balken 1	Balken 2
ENV 1992-1-2	85 ÷ 90	92 ÷ 100
prEN 1992-1-2	92 ÷ 98	102 ÷ 112
Brandversuch mit $\frac{\delta f}{\delta t} \approx \frac{l^2}{9000 \cdot h}$	92 ^{*)}	112

*) In Brandversuch 1 und 2 wurde die kritische Durchbiegungsgeschwindigkeit $\delta f/\delta t$ nach 92 Minuten Branddauer erreicht

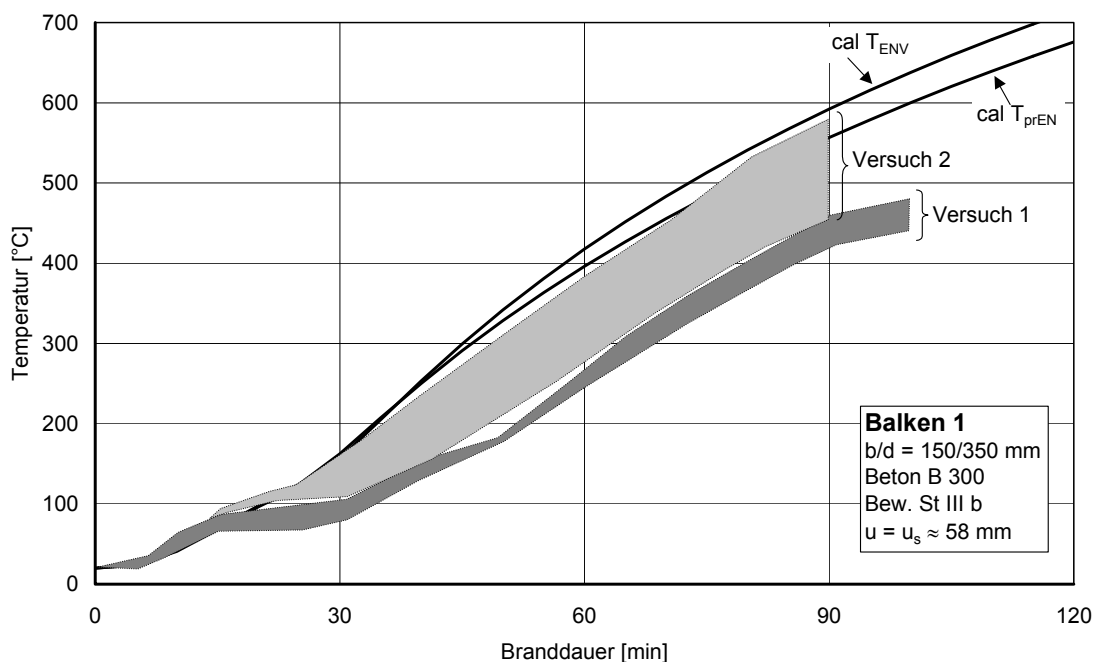


Bild 5.4 Gemessene und berechnete Temperaturen an der Bewehrung im Balken 1

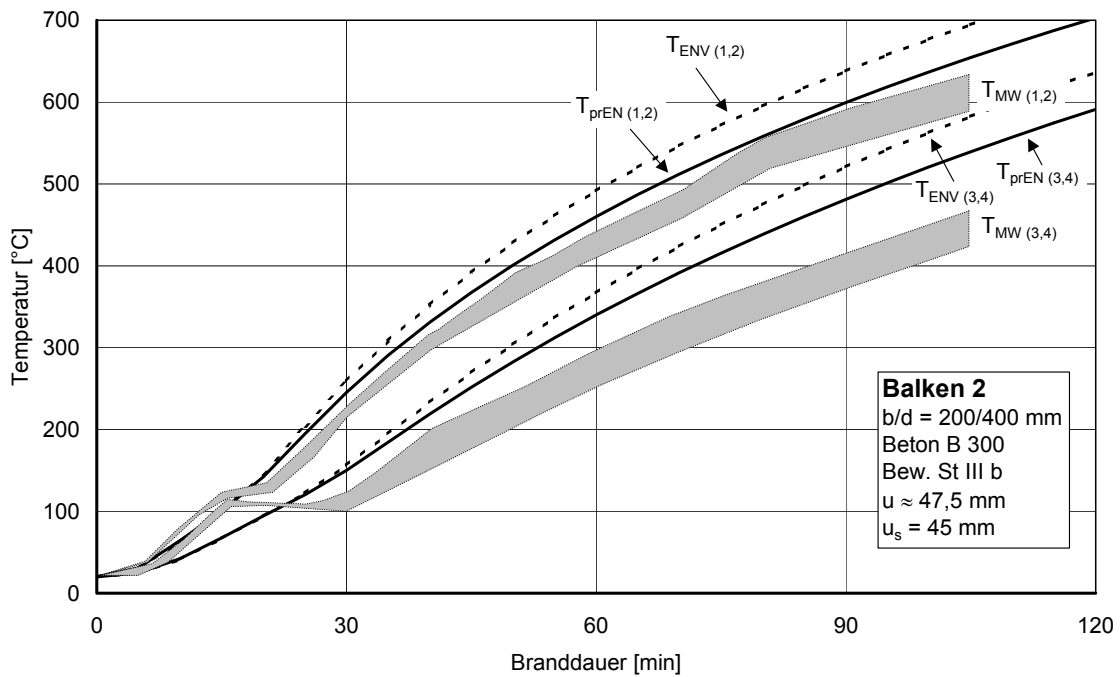


Bild 5.5 Gemessene und berechnete Temperaturen an der Bewehrung im Balken 2

In Tabelle 5.6 sind die zum Versagenszeitpunkt gemessenen und berechneten Bewehrungstemperaturen zusammengestellt. Die im Brandversuch ermittelten Bewehrungstemperaturen wurden aus [11, Tafel 14, S.105 und Anlage 2 und 4, S.109 u. S.111] entnommen.

Tabelle 5.6: Temperaturen in der Bewehrung zum Versagenszeitpunkt

Bewehrungsnummer		Temperatur [°C]	
		Balken 1	Balken 2
1, 2	ENV 1992-1-2	567 ÷ 593	646 ÷ 677
	prEN 1992-1-2	565 ÷ 592	644 ÷ 678
	Brandversuch	450 / 515 ^{*)}	640
3, 4	ENV 1992-1-2	---	530 ÷ 563
	prEN 1992-1-2	---	528 ÷ 564
	Brandversuch	---	480

*) mittlere Temperatur in der Bewehrung im Brandversuch 1 und 2

5.3.4 Raumabschluss

Nach ENV 1992-1-2 Abschnitt 1.4.14 ist die raumabschließende Funktion eines Bauteils seine Fähigkeit, „die Brandweiterleitung aufgrund von Flammen und heißen Gasen (Raumabschluss) oder das Entzünden auf der brandabgewandten Seite (Wärmedämmung) während der maßgebenden Brandbeanspruchung zu verhindern.“ Die raumabschließende Funktion eines Bauteils wird in das Nachweiskriterium „E“ – Raumabschluss (Durchgang von Flammen und heißen Gasen) und in das Nachweiskriterium „I“ – Wärmedämmung (Wärmedurchgang) unterteilt.

Zum Nachweis des Raumabschlusses wird im Brandversuch der Wattebauschtest durchgeführt. Dieser Nachweis kann auf rechnerischem Weg nicht erbracht werden.

Der Nachweis der Wärmedämmung ist im Brandversuch erfüllt, wenn die Temperaturerhöhung auf der feuerabgekehrten Seite im Mittel nicht mehr als 140 K und an keiner Stelle mehr als 180 K beträgt. Für die beiden Wände $d = 10$ cm und $d = 15$ cm (vgl. Abschnitt 4.4.9 und 4.4.10) wird der Nachweis $\Delta T \leq 140$ K auf rechnerischem Weg mit den thermischen Materialkennwerten der prEN 1992-1-2 geführt und mit den Temperaturwerten aus [9] verglichen. In den Bildern 5.6 und 5.7 sind die Rechenergebnisse und die Temperaturwerte aus [9] dargestellt.

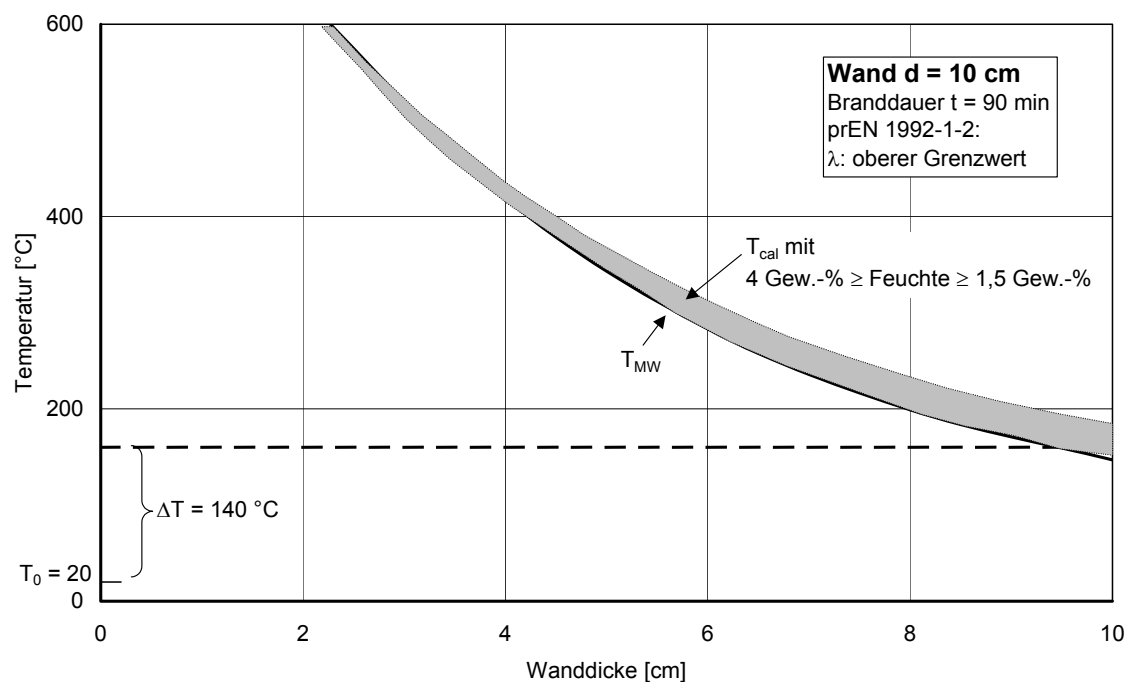


Bild 5.6 Vergleich der berechneten T_{cal} und der in [9] angegebenen Temperaturverteilung T_{MW} in der Wand $d = 10$ cm nach 90 Minuten Branddauer

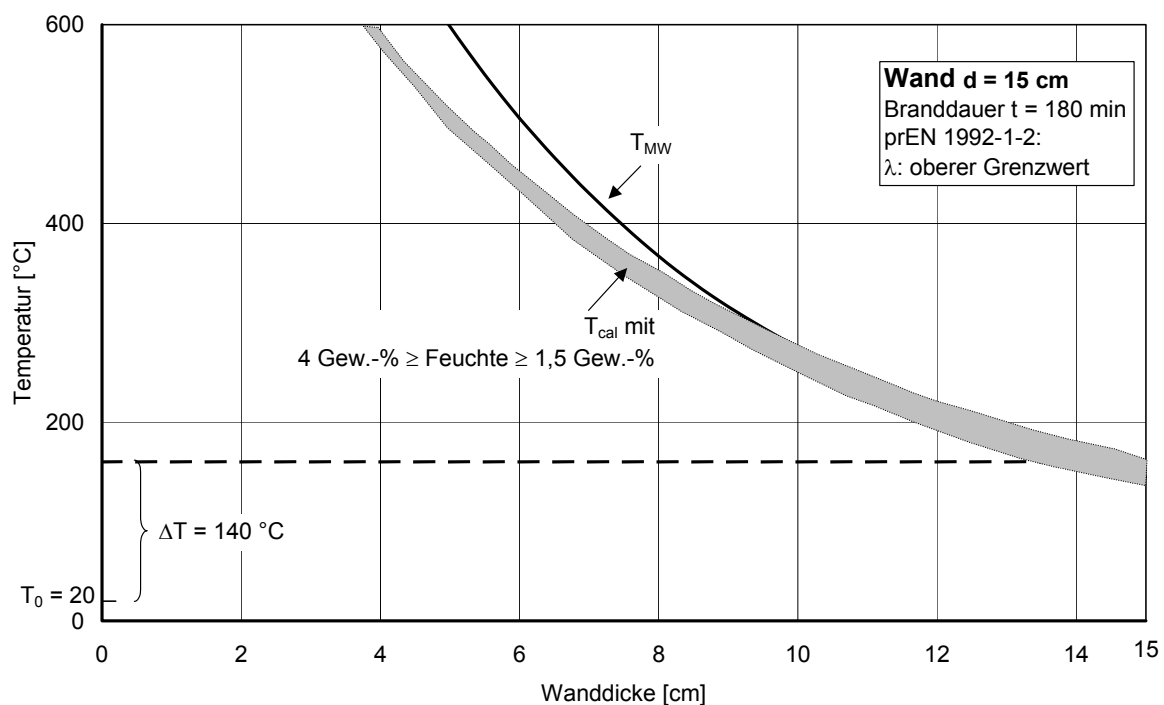


Bild 5.7 Vergleich der berechneten T_{cal} und der in [9] angegebenen Temperaturverteilung T_{MW} in der Wand $d = 15 \text{ cm}$ nach 180 Minuten Branddauer

Bei der Wand $d = 10 \text{ cm}$ wird die Temperaturdifferenz $\Delta T = 140 \text{ K}$ auf der brandabgewandten Seite nach annähernd 90 Minuten Branddauer, bei der Wand $d = 15 \text{ cm}$ nach annähernd 180 Minuten Branddauer erreicht. Für beide Wände stimmt die mit den thermischen Materialkennwerten der prEN 1992-1-2 berechnete Temperaturverteilung gut mit der in [9] angegebenen Temperaturverteilung überein.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Entwurfsarbeiten für die prEN-Fassung wurden die Rechengrundlagen für die thermische Analyse, d.h. für die Ermittlung der Temperaturentwicklung im Bauteilquerschnitt, überarbeitet. Die Funktionen zur Beschreibung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärmekapazität) und der Emissionswert zur Erfassung der Wärmestrahlung wurden im Schlusssentwurf prEN 1992-1-2 (Fassung Oktober 2002) anders formuliert, als in der Vornorm ENV 1992-1-2: 1995. Dabei wurden für die Wärmeleitfähigkeit von Beton eine obere und eine untere Grenzfunktion genannt, zwischen denen eine national anzuwendende Funktion definiert werden muss.

In umfangreichen Vergleichsrechnungen wurden die Temperaturen in Wand-, Balken- und Stützenquerschnitten mit den thermischen Materialkennwerten und dem Emissionswert aus dem Schlusssentwurf der prEN 1992-1-2 bei ein-, drei- und vierseitiger Normbrandbeanspruchung und Betonfeuchtigkeiten zwischen 0 Gew.-% und 3 Gew.-% berechnet und mit den im Brandversuch gemessenen Temperaturen verglichen. Aus dem Vergleich zwischen den Messergebnissen und den berechneten Temperaturen wurde ein Vorschlag für die national anzuwendende Funktion für die Wärmeleitfähigkeit abgeleitet. Mit dieser Funktion für die Wärmeleitfähigkeit wurden hochbautypische Stahlbetonbauteile (Stützen, Balken und Wände) hinsichtlich ihres Tragverhaltens und ihrer Feuerwiderstandsdauer berechnet und mit Versuchswerten verglichen. Für alle Bauteile wurde eine befriedigende Übereinstimmung zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Feuerwiderstandsdauern erzielt.

Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen Mess- und Rechenergebnissen hinsichtlich der Bauteiltemperaturen und der Versagenszeiten wird für Betontemperaturen Θ_c zwischen $20^\circ\text{C} \leq \Theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$ die obere Grenzfunktion für die Wärmeleitfähigkeit aus dem Schlusssentwurf prEN 1992-1-2

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 (\Theta_c / 100) + 0,0107 (\Theta_c / 100)^2 \quad [\text{W}/(\text{mK})]$$

als national anzuwendende Funktion für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton vorgeschlagen.

7 LITERATUR

- [1] **Breuer, H.:** *Atlas zur Chemie*. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1991
- [2] **Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.):** *Brandschutzbemessung: Eurocode 1 bis 6 und Eurocode 9; Normen; Nationale Anwendungsdokumente (NAD)*. Bauen in Europa. Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [3] **Ehm, H.:** *Rechnerische Ermittlung der Erwärmungsvorgänge von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen*. Bericht in: *Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 230, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1975, S.43-93
- [4] **Hosser, D.:** *Vorbeugender baulicher Brandschutz – Brandschutzanforderungen, Brandschutzentwurf*. Vorlesungsumdruck Sommersemester. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, 1999
- [5] **Hosser, D.:** *Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes: Erläuterungen und Anwendungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 6*. Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [6] **Klingsohr, K.:** *Vorbeugender baulicher Brandschutz*. 5., überarbeitete Auflage, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 1997
- [7] **Kordina, K.; Ehm, H.; Postel v., R.:** *Experimentelle Untersuchungen über Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung*. Bericht in: *Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 230, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1975, S.1-42
- [8] **Kordina, K.; Wesche, J.:** *Stahlbeton-Durchlaufkonstruktionen unter Feuerangriff bei Variierung von Stahlart und -güte der Biegezugbewehrung im Stützenbereich*. Bericht im Auftrage des Innenministeriums des Landes Nordrhein-Westfalen (Az. VB1 – 72.02 Nr. 40/73). Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, 1979
- [9] **Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.:** *Beton Brandschutz Handbuch*. 2. Auflage, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf, 1999
- [10] **Polthier, K.:** *Lexikon Brand- und Explosionsschutz*. Brand- und Explosionsschutz; Band 8. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 1996

- [11] **Postel v., R.:** *Brandversuche an statisch bestimmt aufgelagerten Stahlbetonplatten und -balken mit Rechteck- und Plattenbalkenquerschnitt.* Bericht in: *Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung.* Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 230, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1975, S.94-118
- [12] **Quast, U.; Hass, R.; Rudolph, K.:** *STABA-F – Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens von einachsig gespannten Bauteilen unter Feuerangriff.* Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, 1984
- [13] **Schneider, U.; Lebeda, C.:** *Baulicher Brandschutz.* Brand- und Explosionsschutz; Band 4. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2000
- [14] **Walter, R.:** *Brandversuche an Stahlbetonstützen ohne Längsdehnungsbehinderung.* Bericht aus dem Sonderforschungsbereich 148 „Brandverhalten von Bauteilen“ der Technischen Universität Braunschweig. Institutsinterner Arbeitsbericht, Braunschweig, 1977
- [15] 13. Anhang zu: *Brandversuche an Stahlbetonstützen ohne Längsdehnungsbehinderung.* Bericht aus dem Sonderforschungsbereich 148 „Brandverhalten von Bauteilen“ der Technischen Universität Braunschweig, 1977
- [16] **Becker, J.; Bizri, H.; Bresler, B.:** *FIRES-T, A Computer Program for the Fire response of Structural-Thermal.* Report No. USB FRG 74-1, Fire Research Group, department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1974.
- [17] **Hass, R.:** *Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton.* Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, Heft 69, 1986

ANHÄNGE

Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Beton aus dem Schlusssentwurf prEN 1992-1-2 Fassung 10/02 durch Vergleich von berechneten und gemessenen Temperaturen

Inhalt

Anhang A Gemessene Temperaturen

Anhang B Berechnete Temperaturen

Anhang C Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen

Anhang D Temperaturfelder

Die Anhänge A bis D sind in einem gesonderten Berichtsband zusammengestellt.

ANHANG

zum Schlussbericht

Ermittlung der Wärmenleitfähigkeit von Beton aus dem Schlusssentwurf prEN 1992-1-2 Fassung 10/02 durch Vergleich von berechneten und gemessenen Temperaturen

Anhang A – Gemessene Temperaturen

- A.1 Gemessene Temperaturen in der Stahlbetondurchlaufplatte
- A.2 Gemessene Temperaturen im Balken 20/40, feucht (Punkt 1 – 6)
- A.3 Gemessene Temperaturen im Balken 20/40, feucht (Punkt 7 – 14)
- A.4 Gemessene Temperaturen im Balken 10/40, feucht (Punkt 1 – 6)
- A.5 Gemessene Temperaturen im Balken 10/40, feucht (Punkt 7 – 12)
- A.6 Gemessene Temperaturen im Balken 20/40, trocken (Punkt 1 – 6)
- A.7 Gemessene Temperaturen im Balken 10/40, trocken (Punkt 1 – 6)
- A.8 Gemessene Temperaturen in der Stütze 30/30 (Punkt 1 – 6)
- A.9 Gemessene Temperaturen in der Stütze 30/30 (Punkt 7 – 9)
- A.10 Gemessene Temperaturen in der Stütze 20/20 (Punkt 1 – 3)
- A.11 Temperaturverteilung in den zwei Wänden

Anhang B – Berechnete Temperaturen

Anhang B-0: Eingabe für FIRES-T

- B.01 FIRES-T
- B.02 Spitzenwerte der spezifischen Wärmekapazität c
- B.03 Thermische Materialgesetze nach ENV 1992-1-2
- B.04 Thermische Materialgesetze nach prEN 1992-1-2 (obere Grenzfunktion)

Anhang B-1: Feuchtigkeit 3,0 Gew.-%

- B.1 – B. 4 Durchlaufplatte
- B.5 – B.18 Balken 20/40
- B.19 – B.30 Balken 10/40
- B.31 – B.39 Stütze 30/30
- B.40 – B.42 Stütze 20/20

Anhang B-2: Feuchtigkeit 0,0 Gew.-%

- B.43 – B.48 Balken 20/40
 - B.49 – B.54 Balken 10/40
-

Anhang B-3: Feuchtigkeit 1,5 Gew.-%

B.55 – B.59 Wand 10cm

B.60 – B.67 Wand 15cm

Anhang C – Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen

Anhang C-1: Feuchtigkeit 3,0 Gew.-%

C.1 – C.4 Temperaturen in der Durchlaufplatte

C.5 – C.18 Temperaturen im Balken 20/40

C.19 – C.30 Temperaturen im Balken 10/40

C.31 – C.39 Temperaturen in der Stütze 30/30

C.40 – C.42 Temperaturen in der Stütze 20/20

Anhang C-2: Feuchtigkeit 0,0 Gew.-%

C.43 – C.48 Temperaturen im Balken 20/40

C.49 – C.54 Temperaturen im Balken 10/40

Anhang C-3: Feuchtigkeit 1,5 Gew.-%

C.55 – C.59 Temperaturen in der 10cm dicken Wand

C.60 – C.67 Temperaturen in der 15cm dicken Wand

Anhang D – Temperaturfelder

D.1 – D.2 Stütze 1

D.3 – D.4 Stütze 2

D.5 – D.6 Stütze 3

D.7 – D.8 Stütze 4

D.9 – D.10 Balken 1

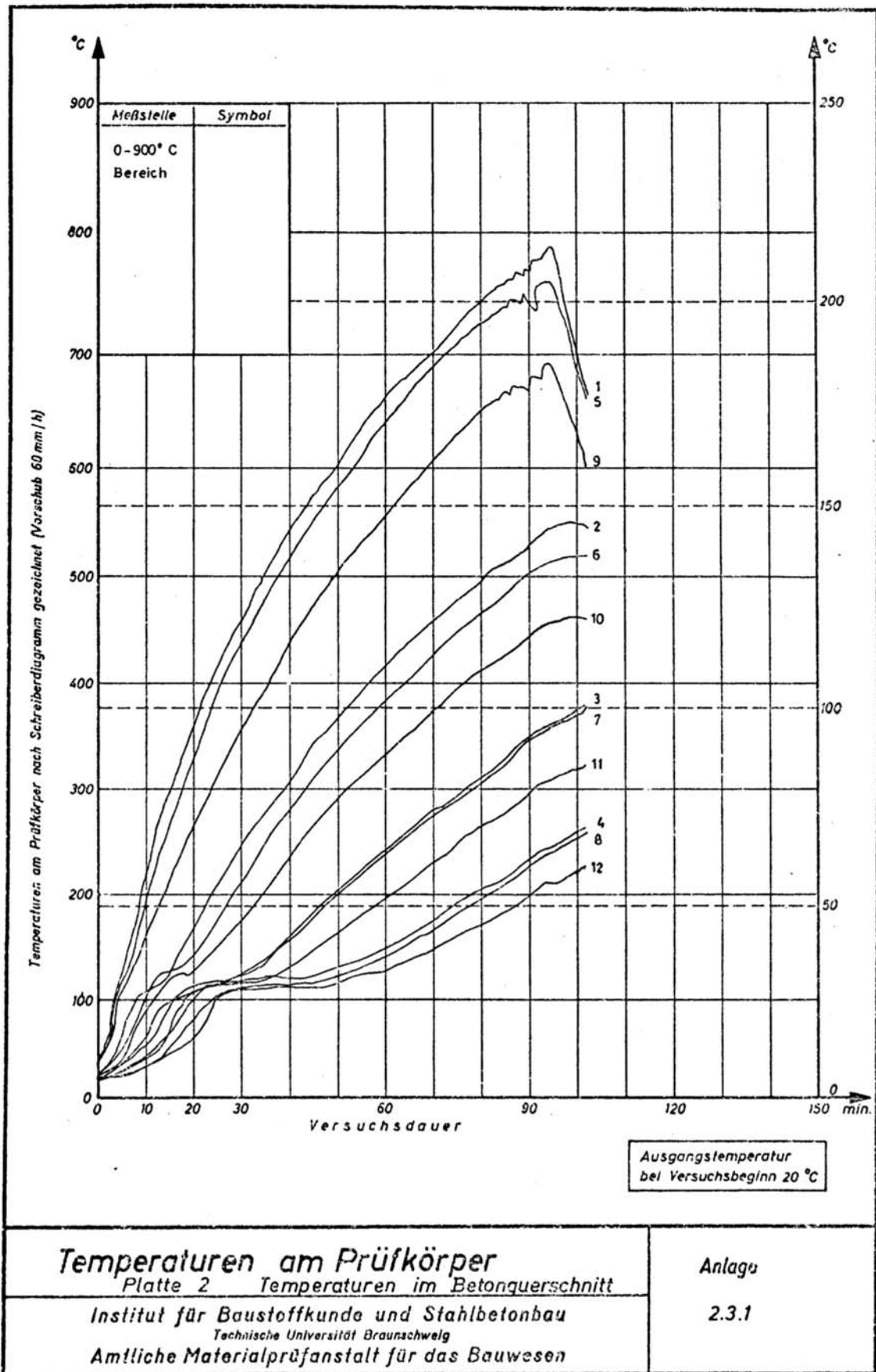
D.11 – D.12 Balken 2

ANHANG A

Gemessene Temperaturen

- A.1 Gemessene Temperaturen in der Stahlbetondurchlaufplatte
 - A.2 Gemessene Temperaturen im Balken 20/40, feucht (Punkt 1 – 6)
 - A.3 Gemessene Temperaturen im Balken 20/40, feucht (Punkt 7 – 14)
 - A.4 Gemessene Temperaturen im Balken 10/40, feucht (Punkt 1 – 6)
 - A.5 Gemessene Temperaturen im Balken 10/40, feucht (Punkt 7 – 12)
 - A.6 Gemessene Temperaturen im Balken 20/40, trocken (Punkt 1 – 6)
 - A.7 Gemessene Temperaturen im Balken 10/40, trocken (Punkt 1 – 6)
 - A.8 Gemessene Temperaturen in der Stütze 30/30 (Punkt 1 – 6)
 - A.9 Gemessene Temperaturen in der Stütze 30/30 (Punkt 7 – 9)
 - A.10 Gemessene Temperaturen in der Stütze 20/20 (Punkt 1 – 3)
 - A.11 Temperaturverteilung in den zwei Wänden
-

A.1: Gemessene Temperaturen in der Stahlbetondurchlaufplatte [8]



A.2: Gemessene Temperaturen im Balken 20/40, feucht (Punkt 1 – 6) [3, S.68]

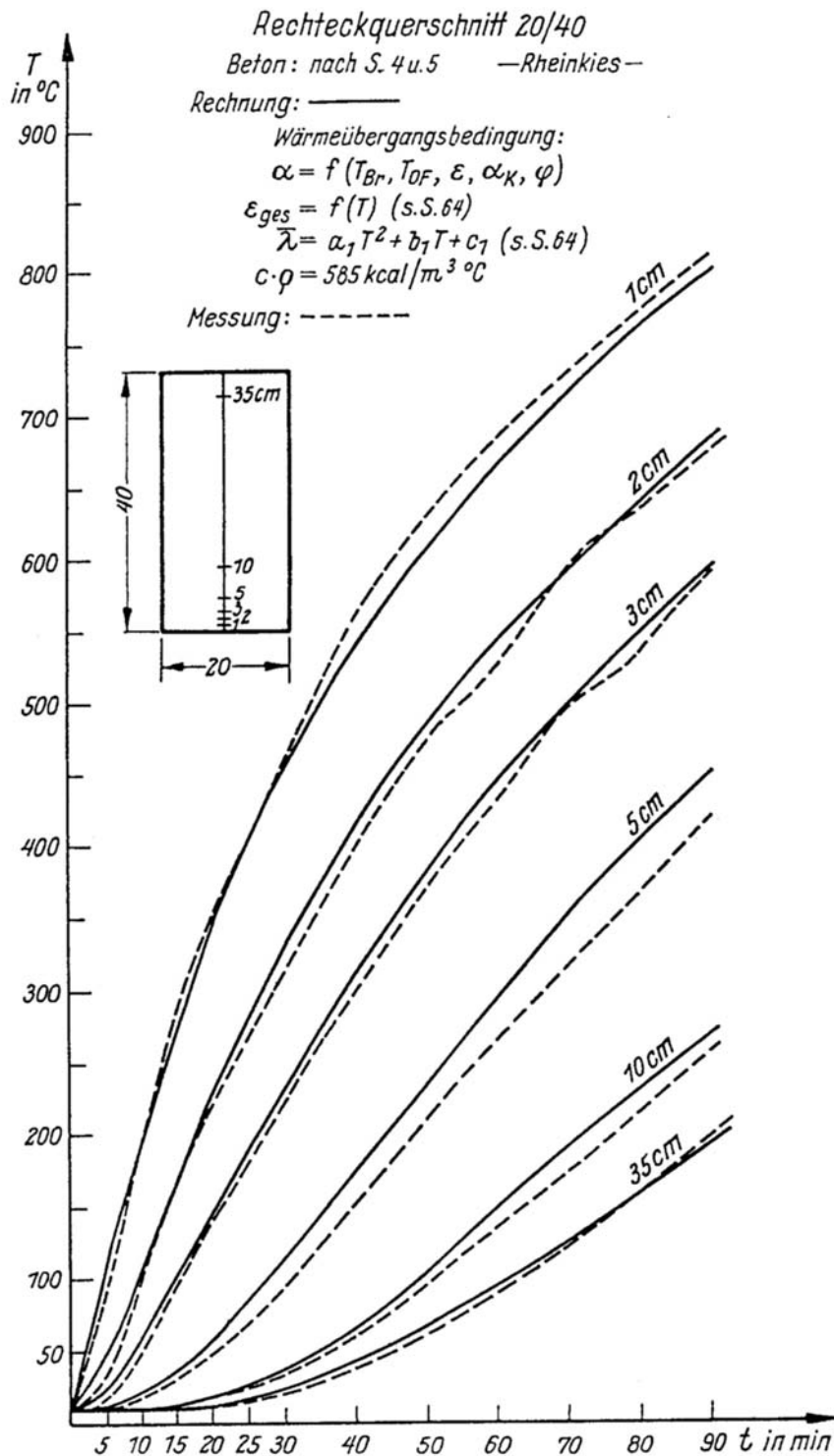


Bild 19

A.3: Gemessene Temperaturen im Balken 20/40, feucht (Punkt 7 – 14) [3, S.69]

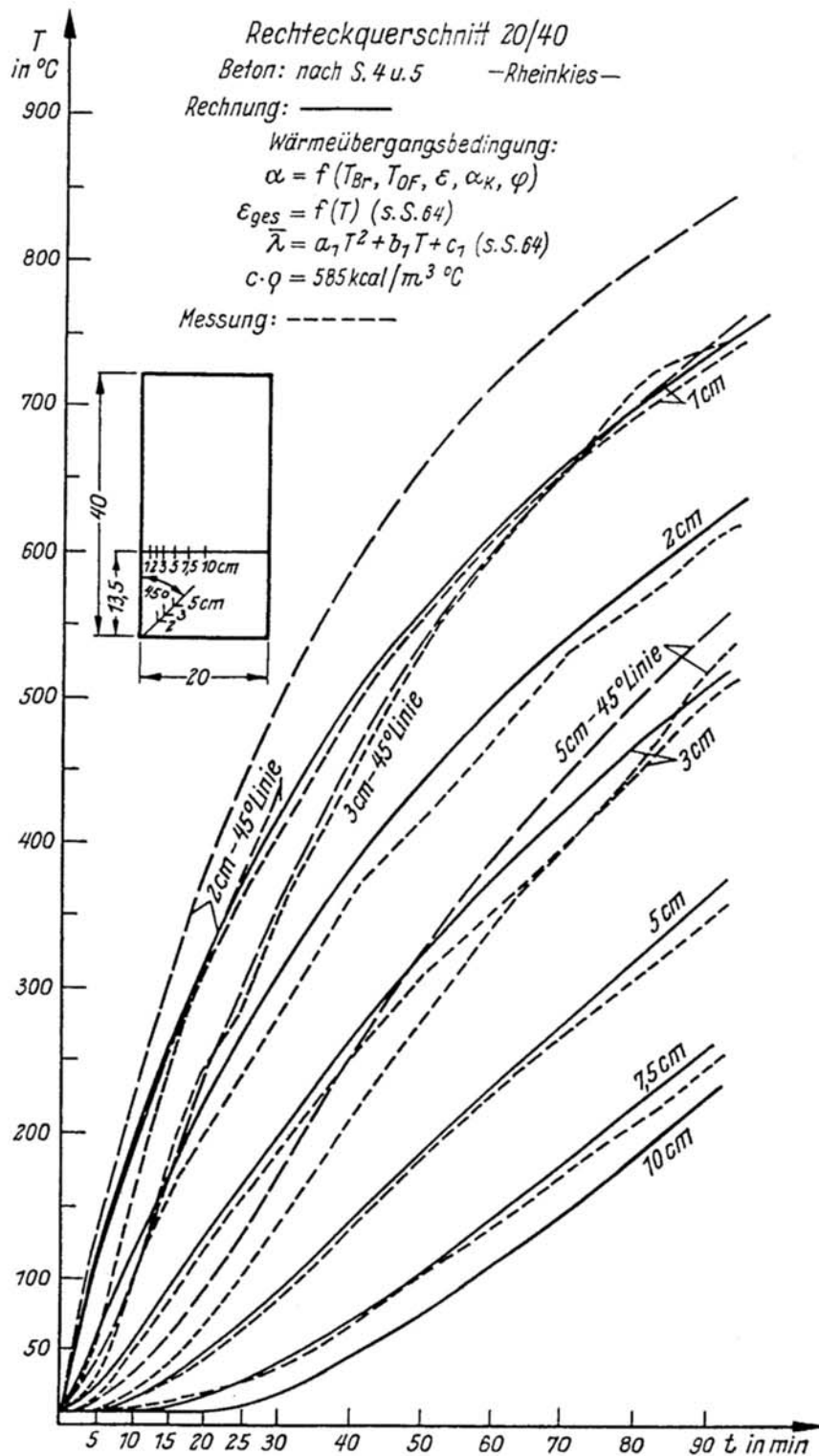


Bild 20

A.4: Gemessene Temperaturen im Balken 10/40, feucht (Punkt 1 – 6) [3, S.71]

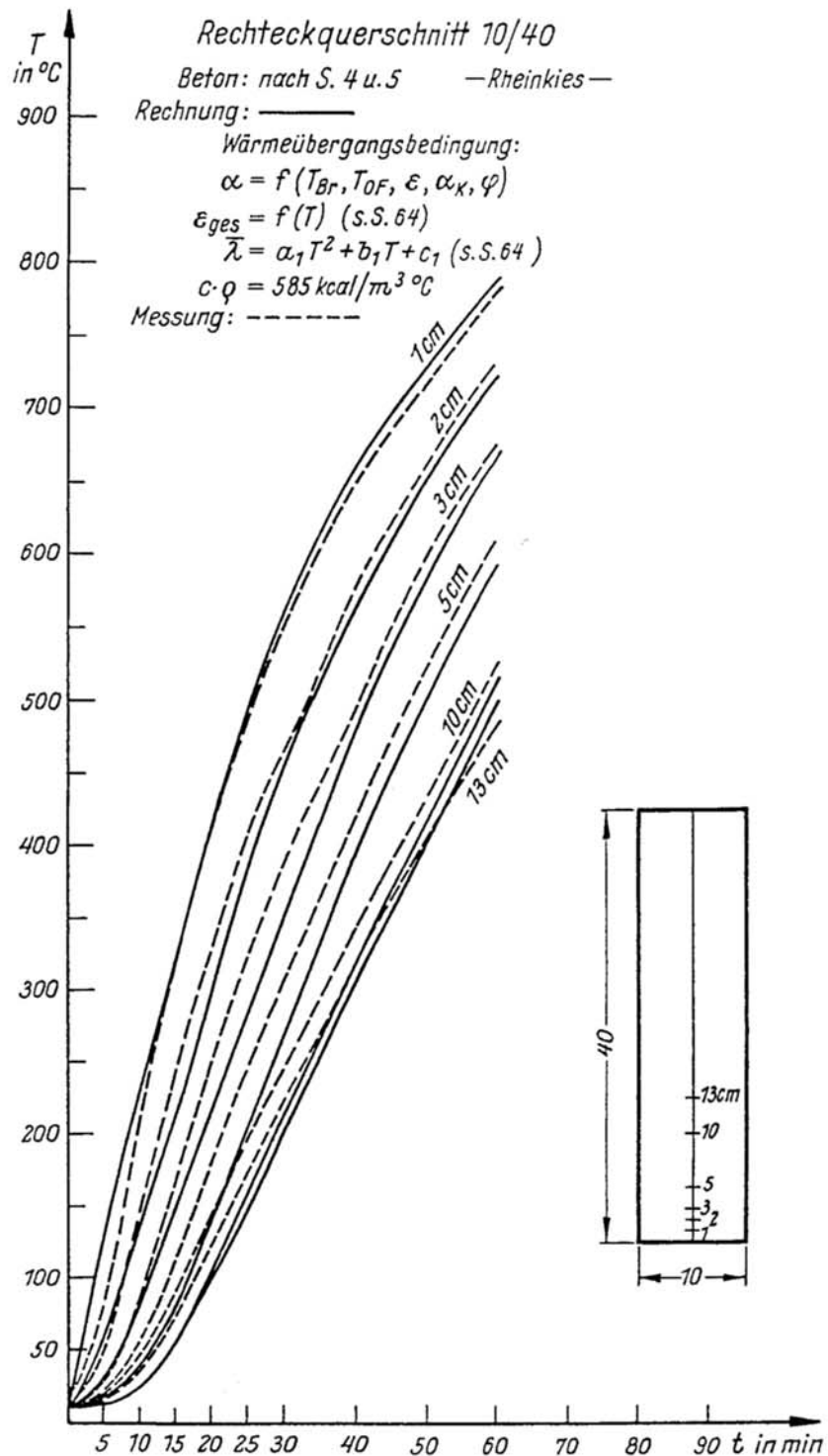
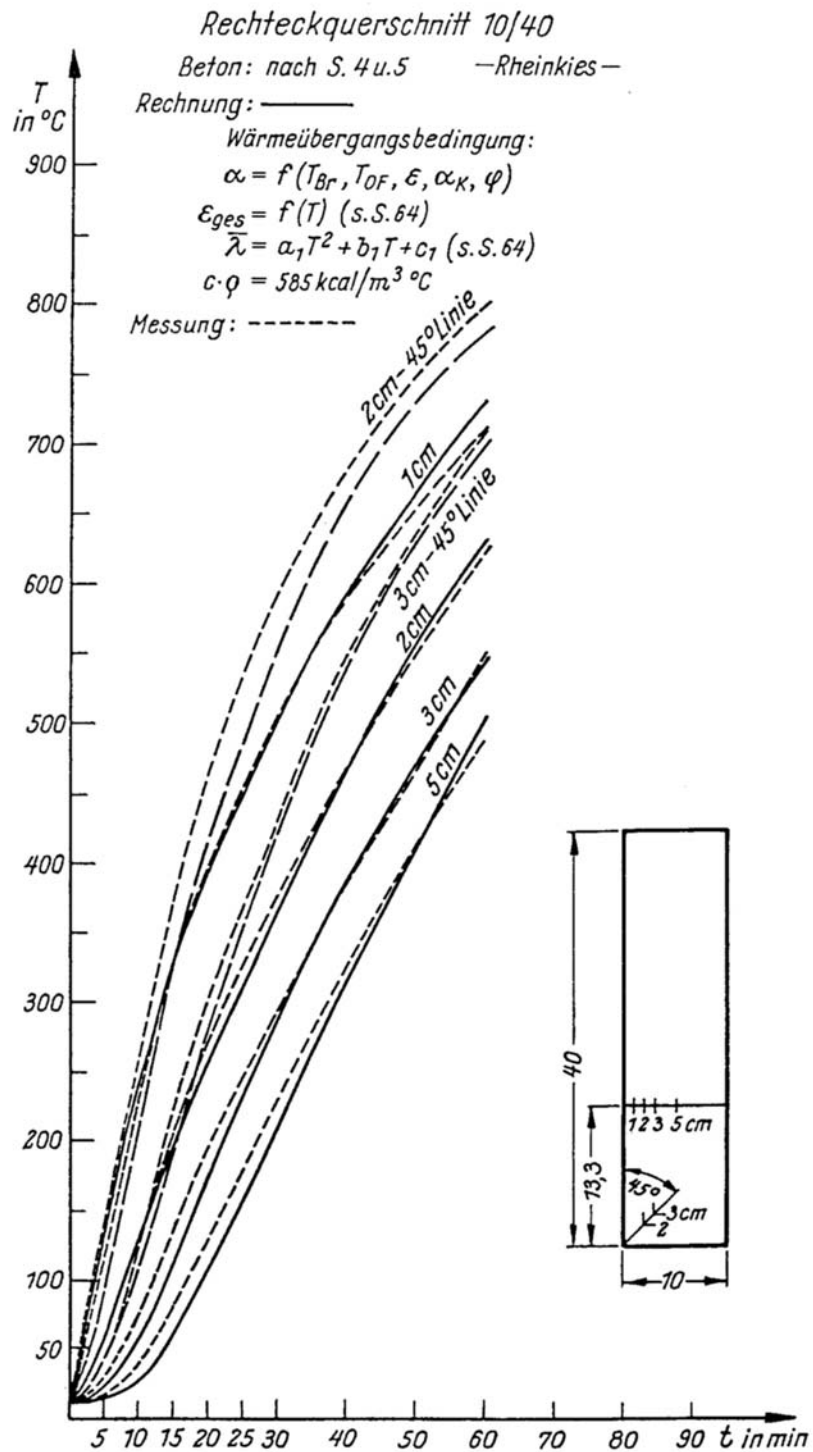
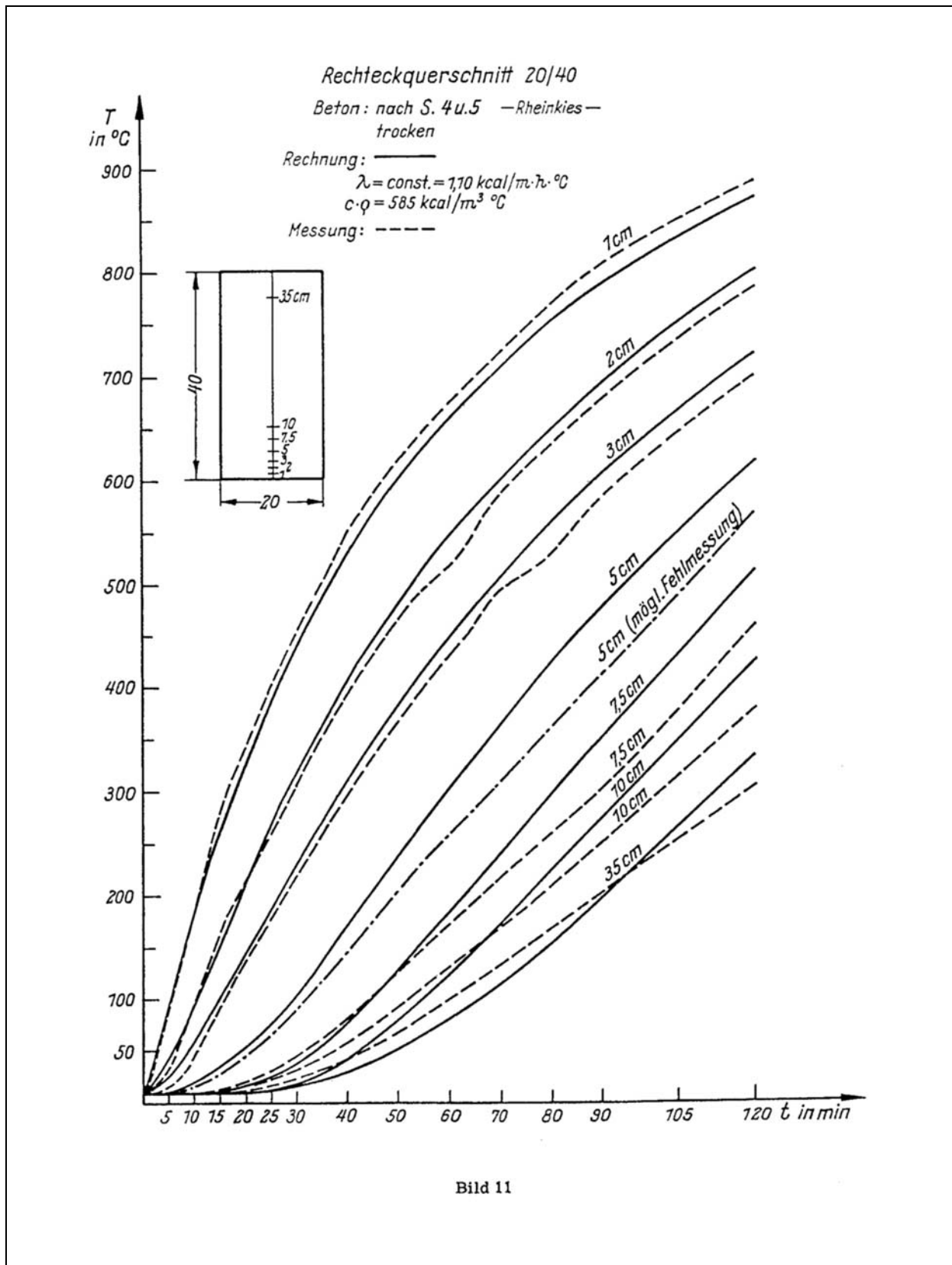


Bild 22

A.5: Gemessene Temperaturen im Balken 10/40, feucht (Punkt 7 – 12) [3, S.72]



A.6: Gemessene Temperaturen im Balken 20/40, trocken (Punkt 1 – 6) [3, S.59]



A.7: Gemessene Temperaturen im Balken 10/40, trocken (Punkt 1 – 6) [3, S.60]

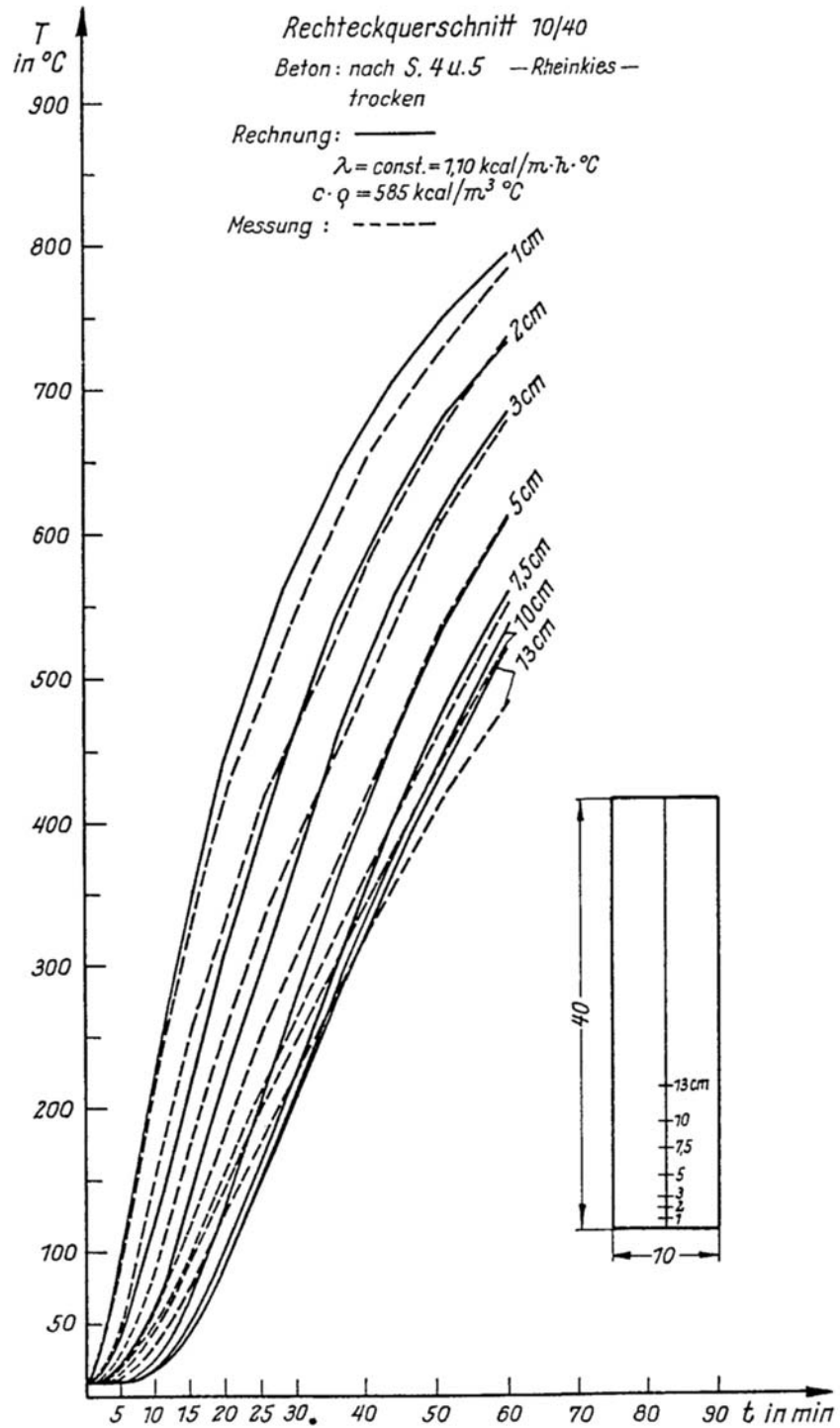
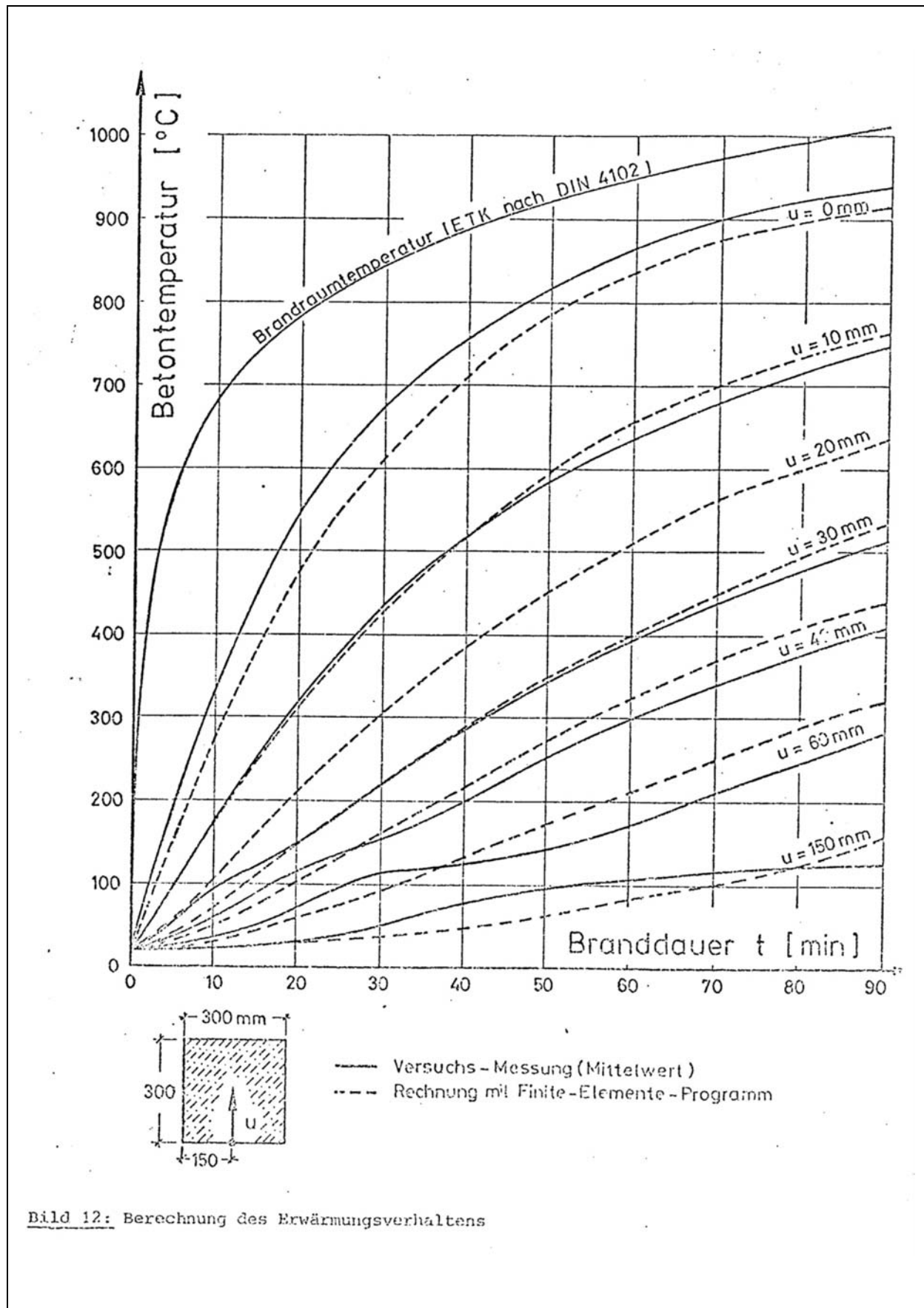
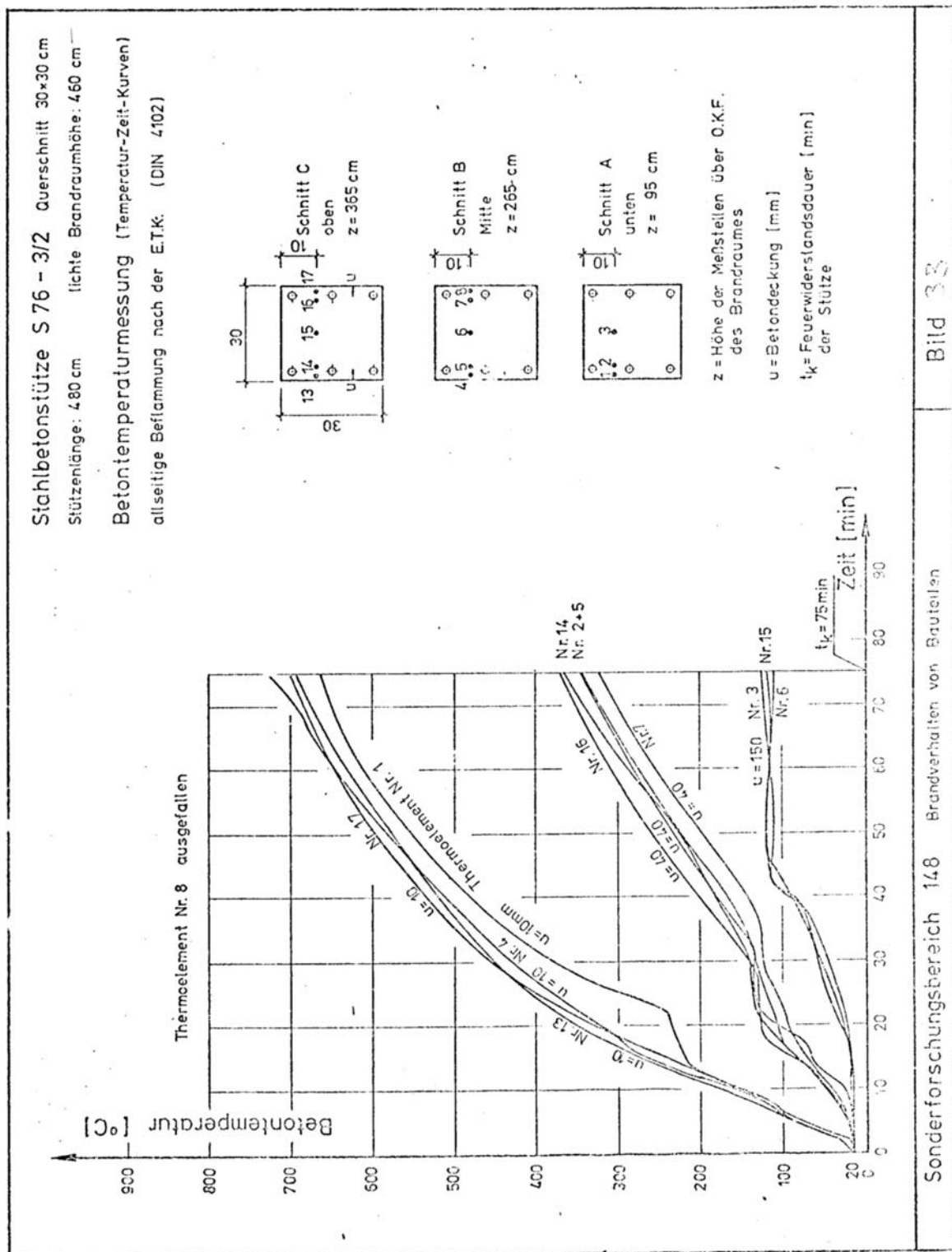


Bild 12

A.8: Gemessene Temperaturen in der Stütze 30/30 (Punkt 1 – 6) [14, S.40]



A.9: Gemessene Temperaturen in der Stütze 30/30 (Punkt 7 – 9) [15, S.84]



A.10: Gemessene Temperaturen in der Stütze 20/20 (Punkt 1 – 3) [14, S.35]

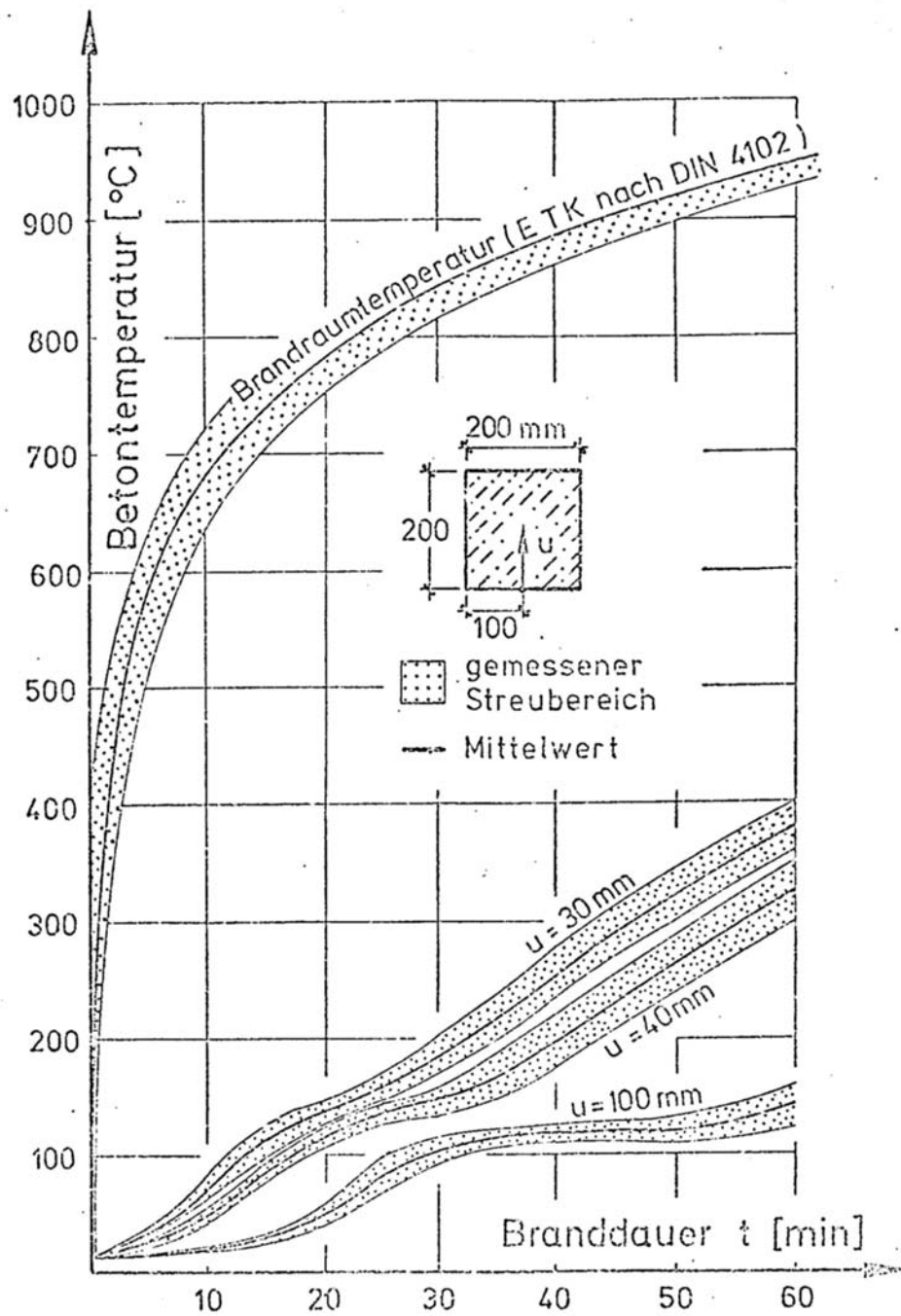
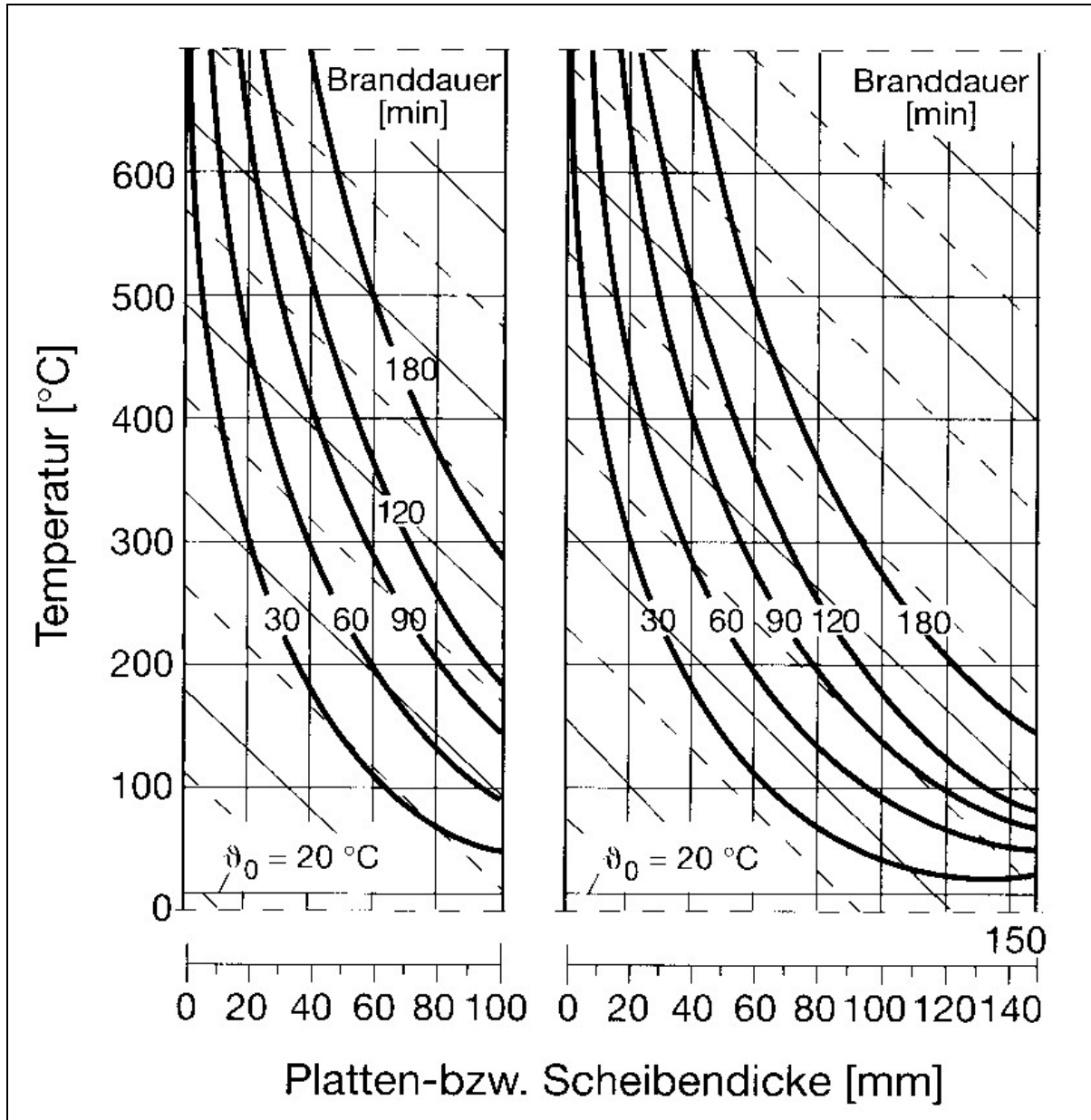


Bild 7: Gemessene Betontemperaturen - Stützenquerschnitt 200 x 200 mm

A.11: „Temperaturverteilung in einseitig nach DIN 4102 Teil 2 (ETK) beanspruchten Platten bzw. Scheiben (Wänden) aus Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag“ [9, S.67]



ANHANG B

Berechnete Temperaturen

Anhang B – Berechnete Temperaturen

Anhang B-0: Eingabe für FIRES-T

- B.01 FIRES-T
- B.02 Spitzenwerte der spezifischen Wärmekapazität c
- B.03 Thermische Materialgesetze nach ENV 1992-1-2
- B.04 Thermische Materialgesetze nach prEN 1992-1-2 (obere Grenzfunktion)

Anhang B-1: Feuchtigkeit 3,0 Gew.-%

- B.1 – B. 4 Durchlaufplatte
- B.5 – B.18 Balken 20/40
- B.19 – B.30 Balken 10/40
- B.31 – B.39 Stütze 30/30
- B.40 – B.42 Stütze 20/20

Anhang B-2: Feuchtigkeit 0,0 Gew.-%

- B.43 – B.48 Balken 20/40
- B.49 – B.54 Balken 10/40

Anhang B-3: Feuchtigkeit 1,5 Gew.-%

- B.55 – B.59 Wand 10cm
 - B.60 – B.67 Wand 15cm
-

ANHANG B-0

Eingabe für FIRES-T

- B.01 FIRES-T
- B.02 Spitzenwerte der spezifischen Wärmekapazität c
- B.03 Thermische Materialgesetze nach ENV 1992-1-2
- B.04 Thermische Materialgesetze nach prEN 1992-1-2 (obere Grenzfunktion)

B.01 FIRES-T

Mit dem Computerprogramm FIRES-T wird die Temperaturverteilung im Querschnitt der Stahlbetonbauteile rechnerisch ermittelt. Als Brandraumtemperaturzeitverlauf wird die Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN 4102-2 vorgegeben. Der Wärmeübergang wird mit folgender Gleichung definiert:

$$Q(A, P, V, AB, E_F, E_S) = A \cdot (T_F - T_S)^P + V \cdot SB \cdot (AB \cdot E_F \cdot AT_F^4 - E_S \cdot AT_S^4)$$

Dabei ist:

A der konvektive Wärmeübergangskoeffizient

P der Exponent für den konvektiven Wärmeübergang [1,0]

V der Konfigurationsfaktor [1,0]

AB der Faktor zur Berücksichtigung der absorbierten Wärmestrahlung [1,0]

E_F die Emissionszahl der Flamme

E_S die Emissionszahl der Oberfläche

T_F die Brandraumtemperatur

T_S die Oberflächentemperatur

SB die Stefan-Boltzmann-Konstante

AT_F die absolute Brandraumtemperatur in Kelvin

AT_S die absolute Oberflächentemperatur in Kelvin

Die Werte für A, E_F und E_S werden nach den Angaben im Schlussbericht, Tabelle 3.3 vorgegeben. Dabei muss darauf geachtet werden, dass für E_F und E_S jeweils der resultierende Emissionswert aus Tabelle 3.3 eingegeben wird (vgl. Gleichung 3.5).

Die Temperaturen im Querschnitt werden dann nach der Differentialgleichung (3.6) aus dem Schlussbericht berechnet [12, S.71]. Die temperaturabhängigen Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und spezifische Wärmekapazität c werden für verschiedene Feuchtigkeitsgehalte in sogenannten „thermischen Materialgesetzen“ zur Verfügung gestellt. Zur Vereinfachung die Dateneingabe werden die Querschnittswerte in cm und min eingelesen, so dass die thermischen Materialgeset-

ze in den Einheiten λ [W/(cm·K)], c [W·min/(K·g)], ρ [g/cm³] beschrieben werden müssen. Die Umrechnung aus den SI-Einheiten erfolgt mit folgenden Gleichungen :

$$1 \text{ [W/(m·K)]} = 10^{-2} \text{ [W/(cm·K)]}$$

$$1 \text{ [J/(kg·K)]} = 1 \text{ [W·s/(kg·K)]} = 1/60 \text{ [W·min/(kg·K)]} = 10^{-3}/60 \text{ [W·min/(g·K)]}$$

$$1 \text{ [kg/m}^3\text{]} = 10^{-3} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

B.02 Tabelle mit den Spitzenwerten für die spezifische Wärmekapazität c

Betonfeuchte [Gew.-%]	c nach ENV		c nach prEN	
	[J/(kgK)]	[10 ⁻² W·min/(g·K)]	[J/(kgK)]	[10 ⁻² W·min/(g·K)]
0,0	963,8	1,6065	900	1,5
1,5	1647,2	2,7453	1470	2,45
3,0	2312,5	3,8542	2020	3,3667

B.03 Tabelle mit den thermischen Materialgesetzen nach ENV 1992-1-2

Temperatur [°C]	Thermische Leitfähigkeit [W/(cm·K)]	Temperatur [°C]	Spezifische Wärmekapazität [W·min/(K·g)]	Temperatur [°C]	Dichte [g/cm ³]
0,0	0,019603	0,0	0,015220	0,0	2,3
20,0	0,019603	20,0	0,015220	20,0	2,3
100,0	0,018083	99,9	0,016065	99,9	2,3
200,0	0,016333	100,1	0,038542	100,1	2,2
300,0	0,014750	200,0	0,017037	1200,0	2,2
400,0	0,013333	300,0	0,017917		
500,0	0,012083	400,0	0,018704		
600,0	0,011000	500,0	0,019398		
700,0	0,010083	600,0	0,020000		
800,0	0,009330	700,0	0,020509		
900,0	0,008750	800,0	0,020926		
1000,0	0,008333	900,0	0,021250		
1100,0	0,008083	1000,0	0,021480		
1200,0	0,008000	1100,0	0,021620		
		1200,0	0,021667		

B.04 Tabelle mit den thermischen Materialgesetzen nach prEN 1992-1-2 (obere Grenzfunktion)

Temperatur [°C]	thermische Leitfähigkeit [W/(cm·K)]	Temperatur [°C]	spezifische Wärmekapazität [W·min/(K·g)]	Temperatur [°C]	Dichte [g/cm ³]
0,0	0,019514	0,0	0,015000	0,0	2,300
20,0	0,019514	20,0	0,015000	20,0	2,300
100,0	0,017656	99,9	0,015000	115,0	2,300
200,0	0,015526	100,1	0,033667	200,0	2,254
300,0	0,013610	115,0	0,033670	400,0	2,185
400,0	0,011908	200,0	0,016667	1200,0	2,024
500,0	0,010420	400,0	0,018333		
600,0	0,009146	1200,0	0,018330		
700,0	0,008086				
800,0	0,007240				
900,0	0,006608				
1000,0	0,006190				
1100,0	0,005986				
1200,0	0,005996				

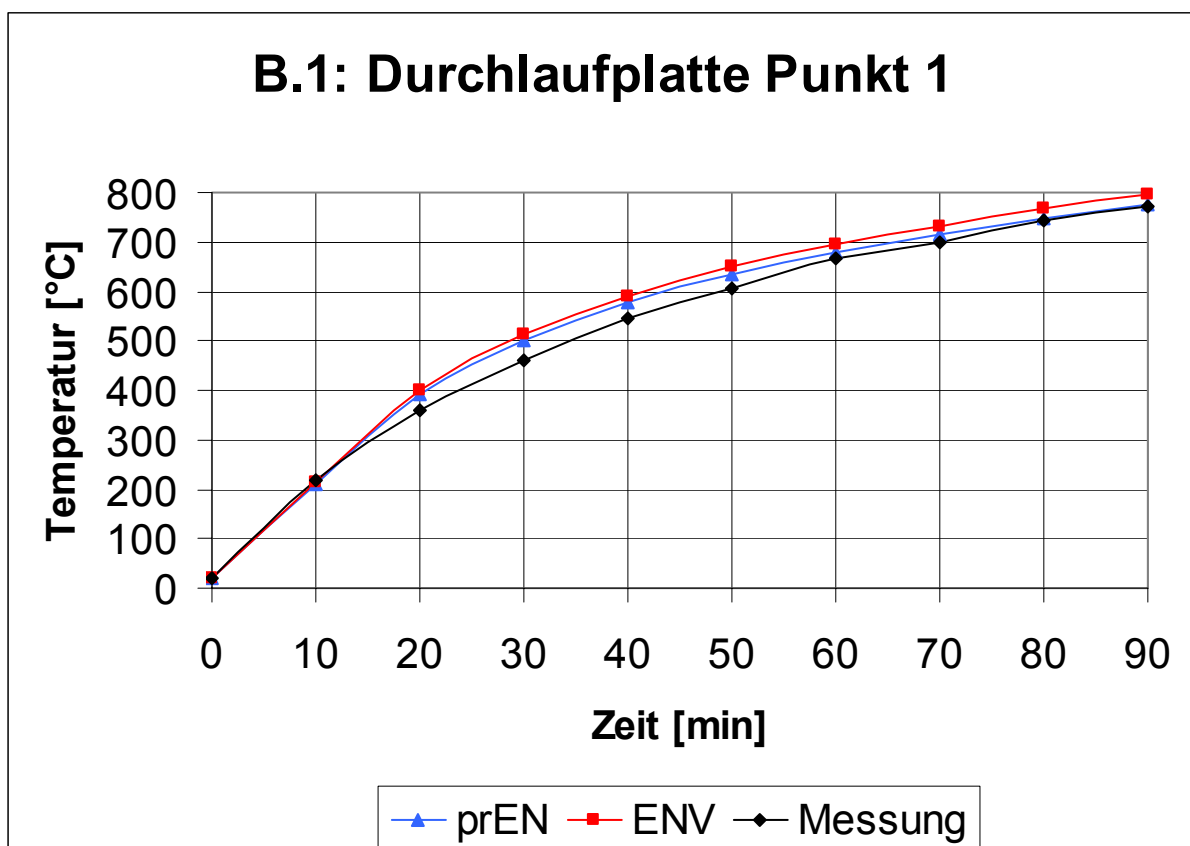
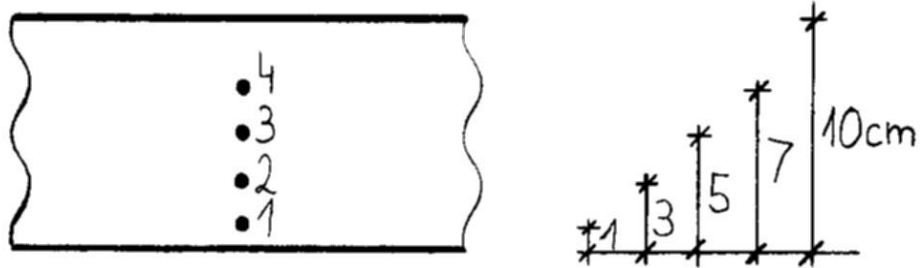
ANHANG B-1

Berechnete Temperaturen

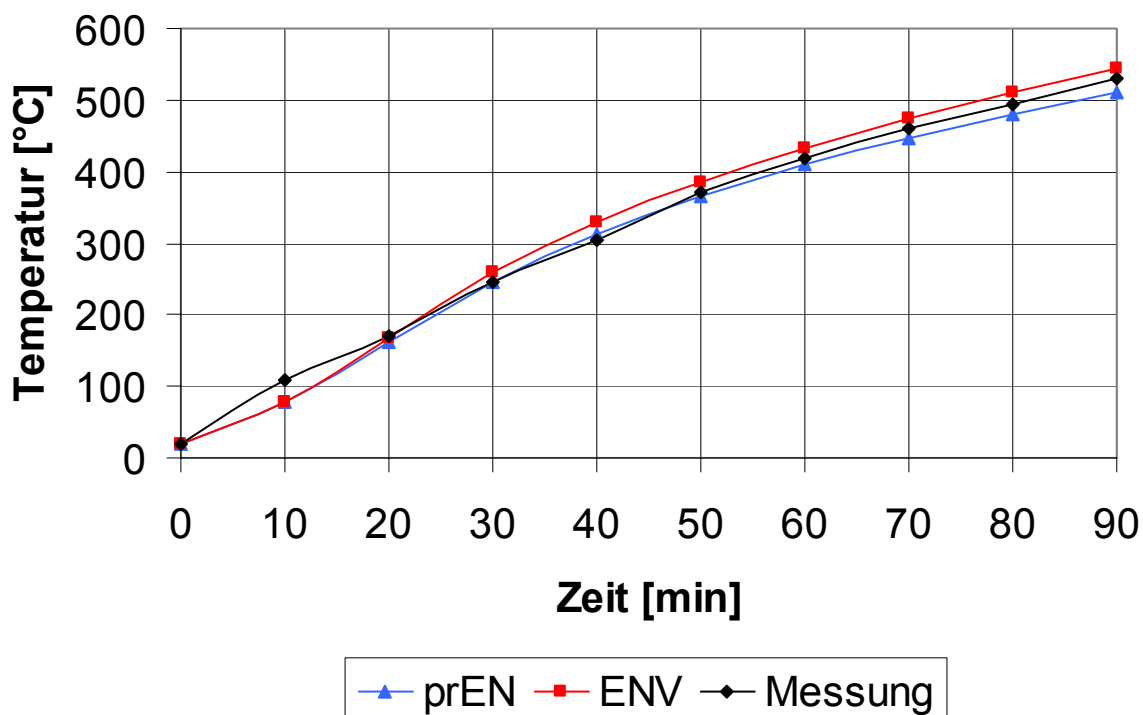
Feuchtigkeit: 3,0 Gew.-%

Zuschlag: quarzhaltig

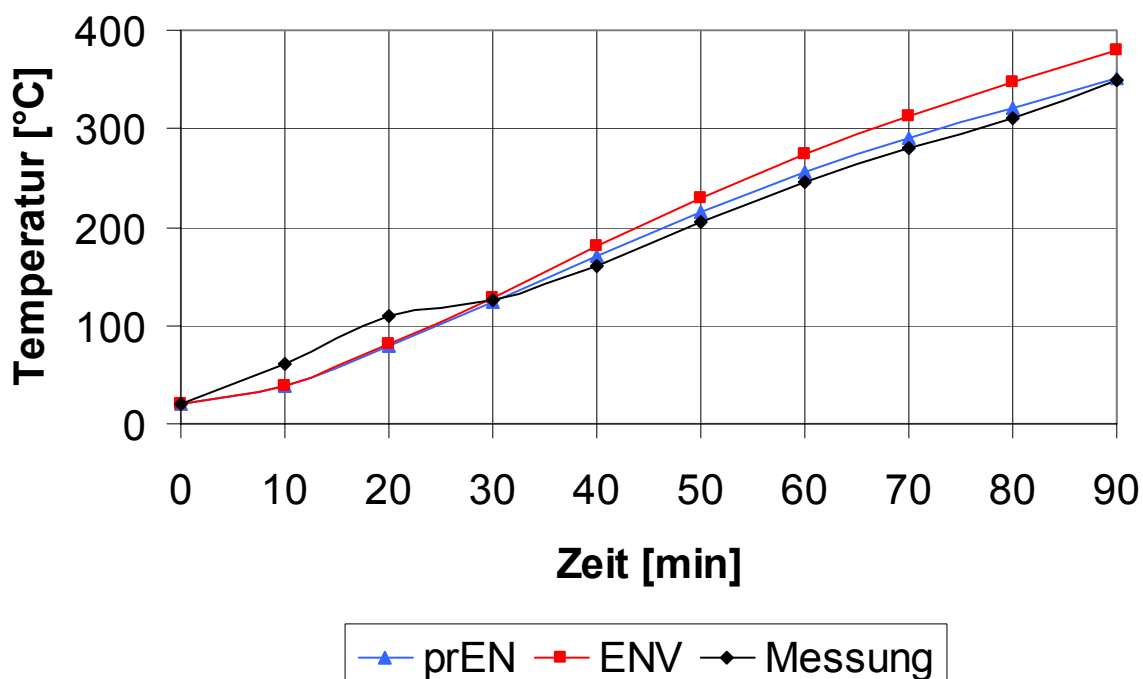
prEN: λ_1 (obere Grenzfunktion)

B.1 – B.4: Durchlaufplatte

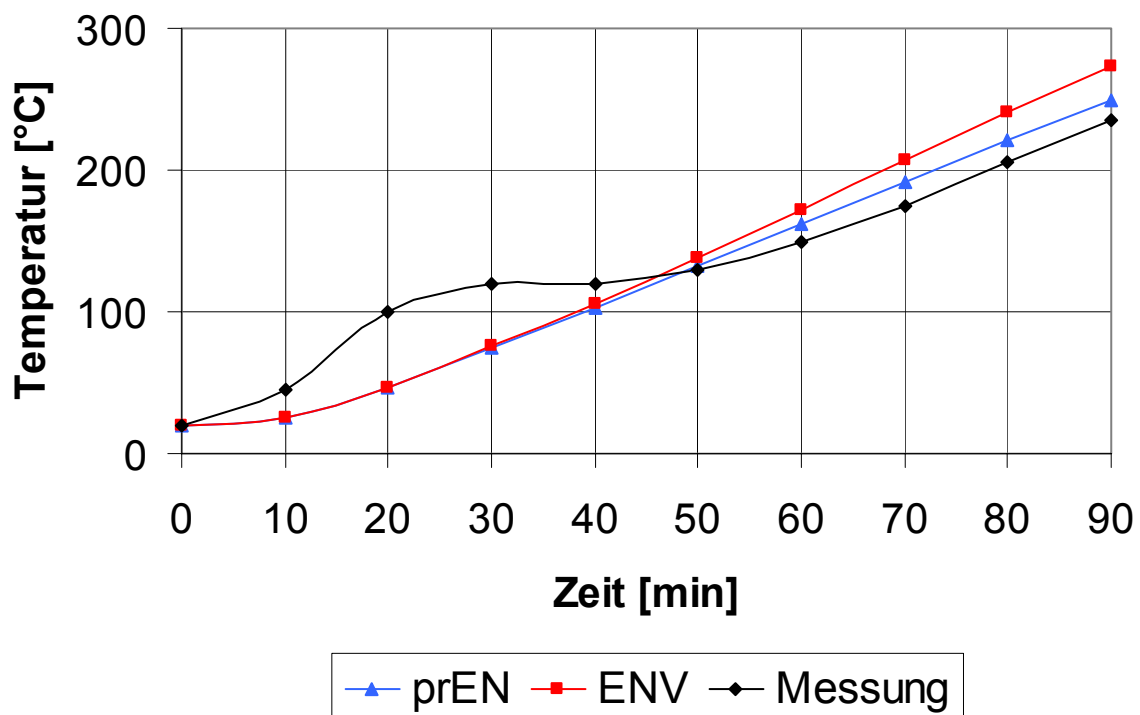
B.2: Durchlaufplatte Punkt 2

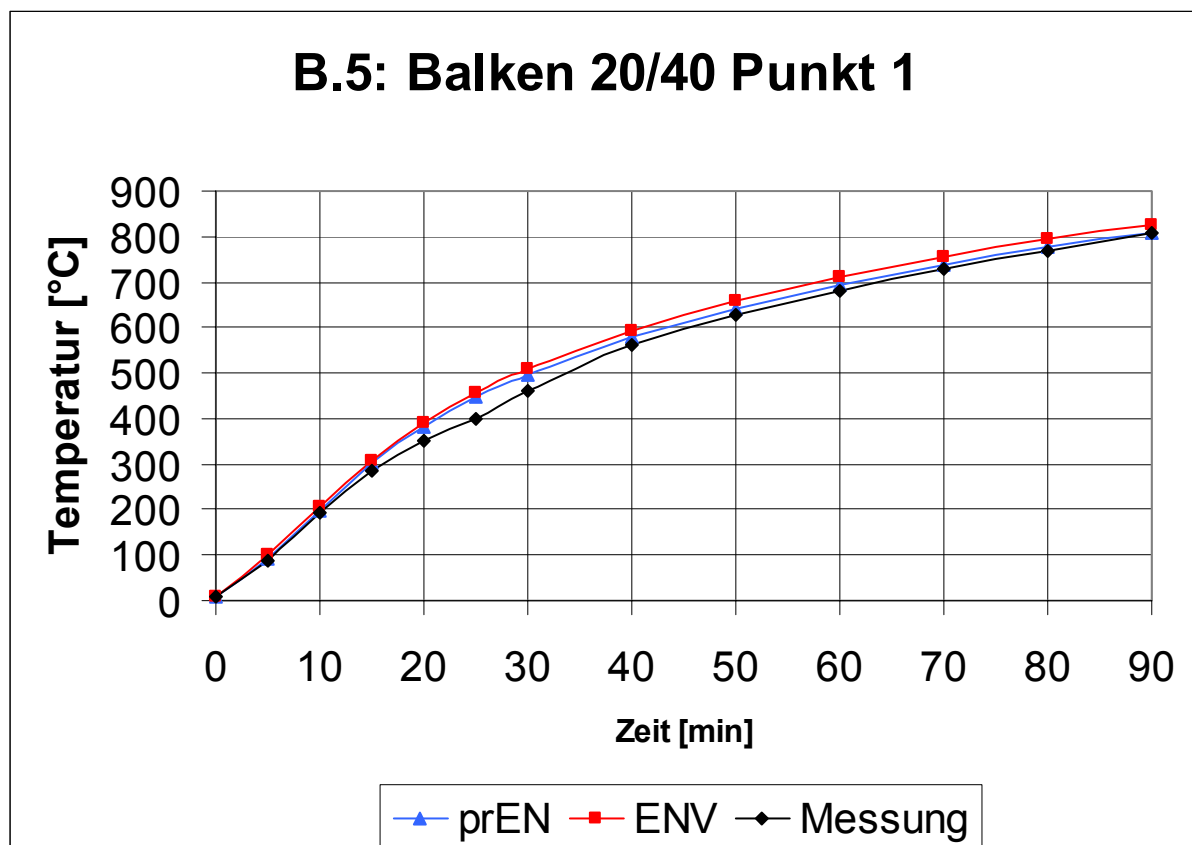
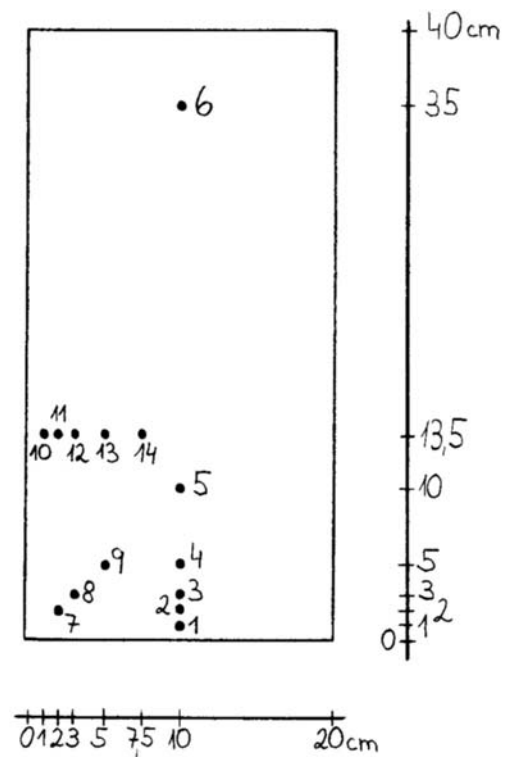


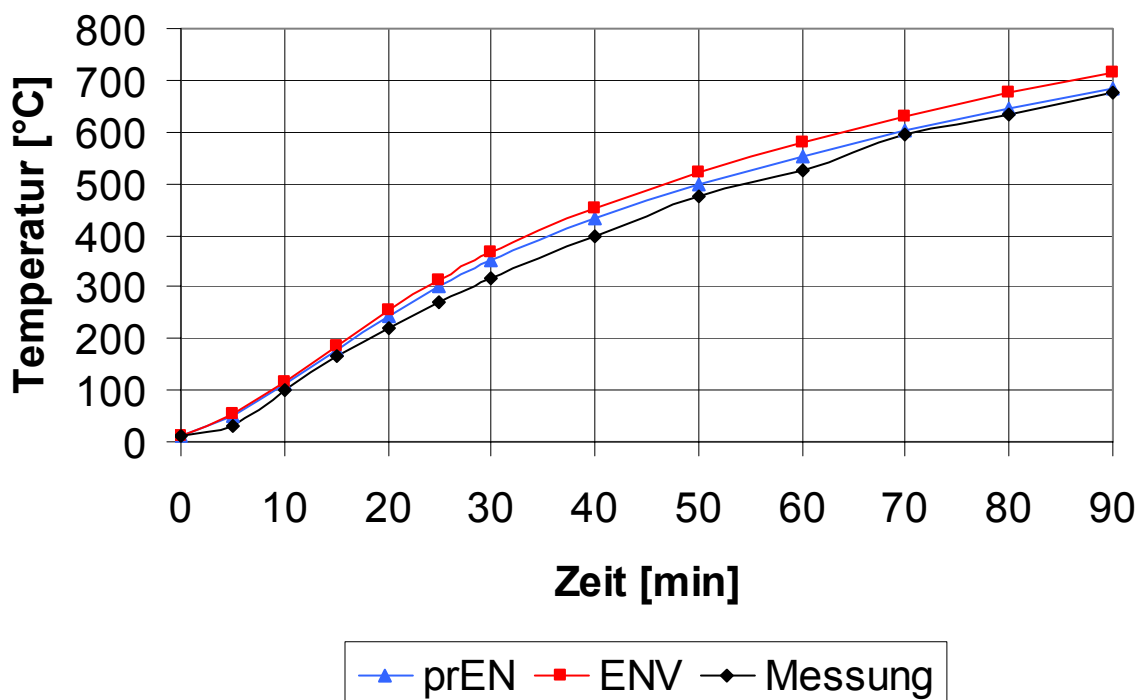
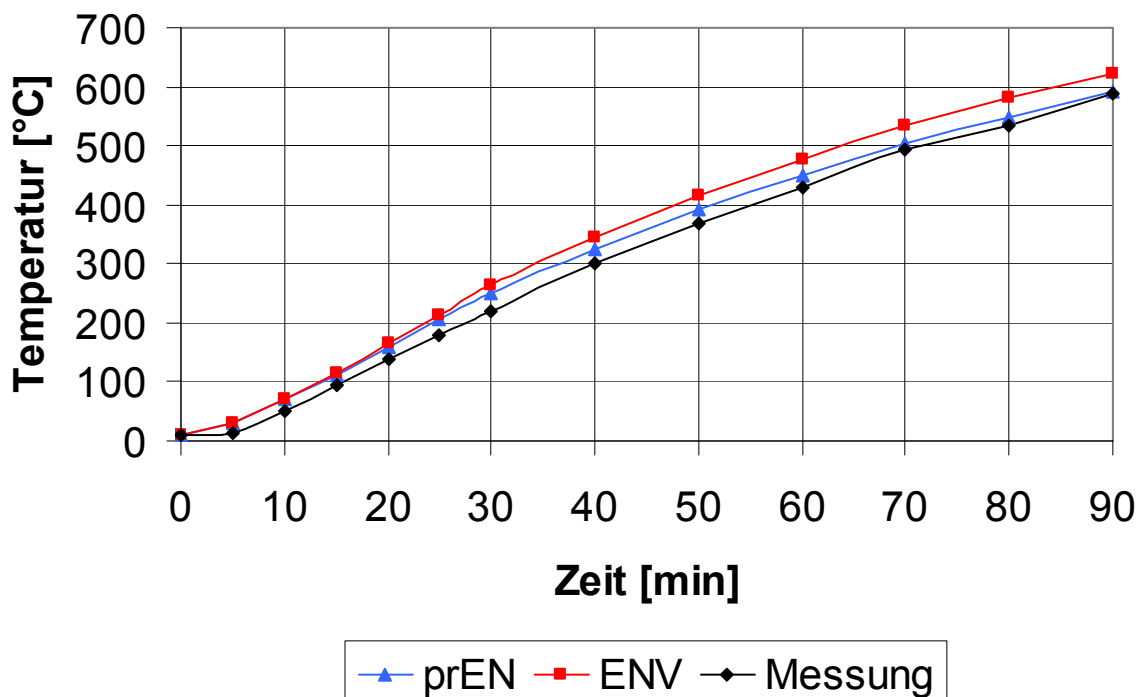
B.3: Durchlaufplatte Punkt 3

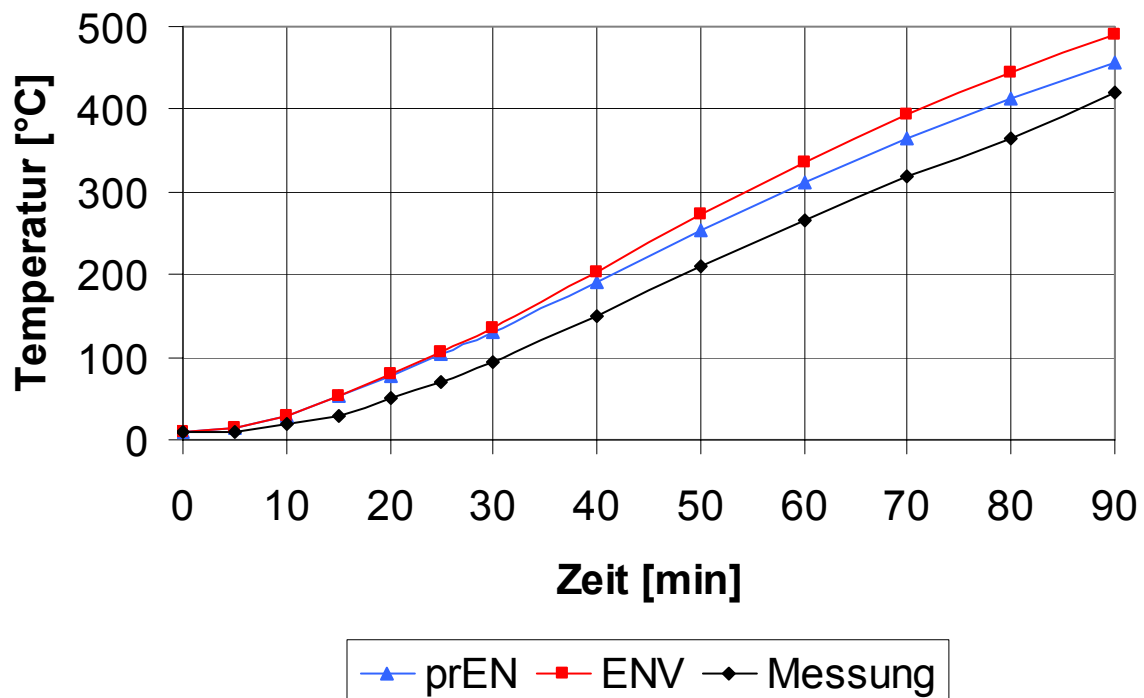
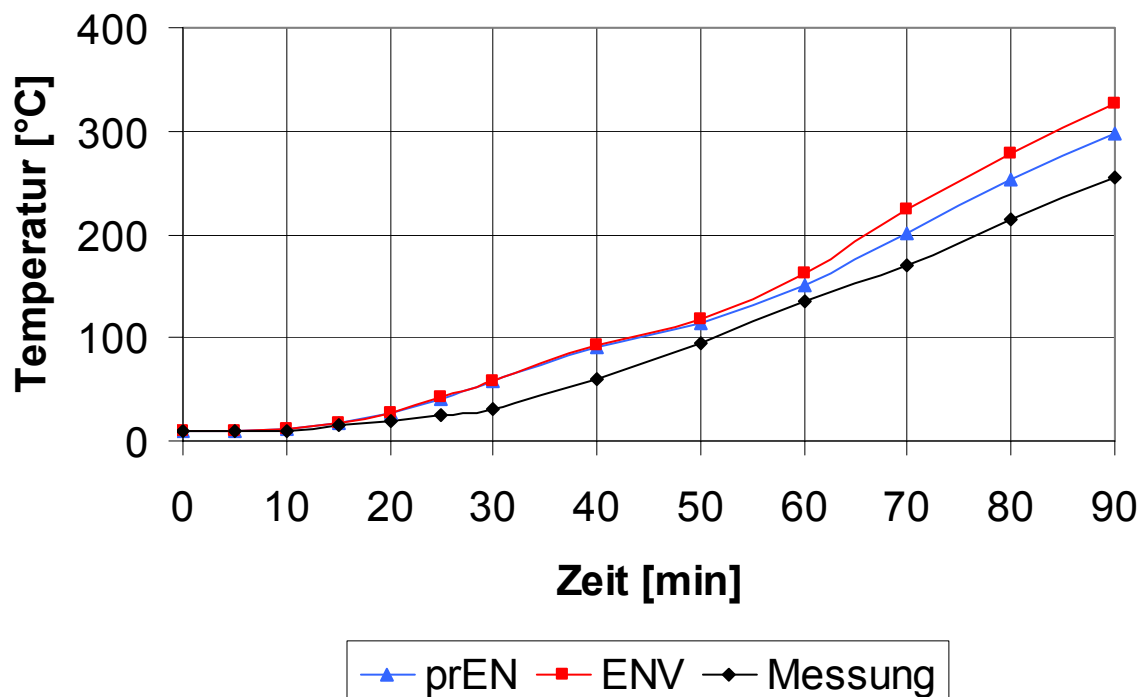


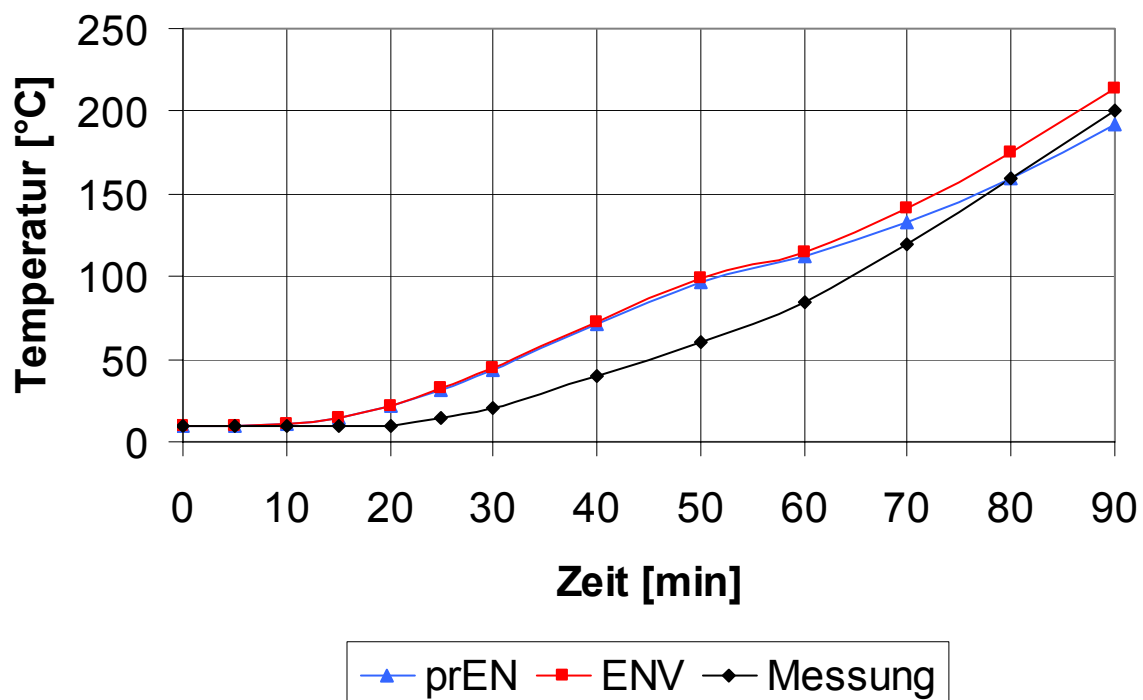
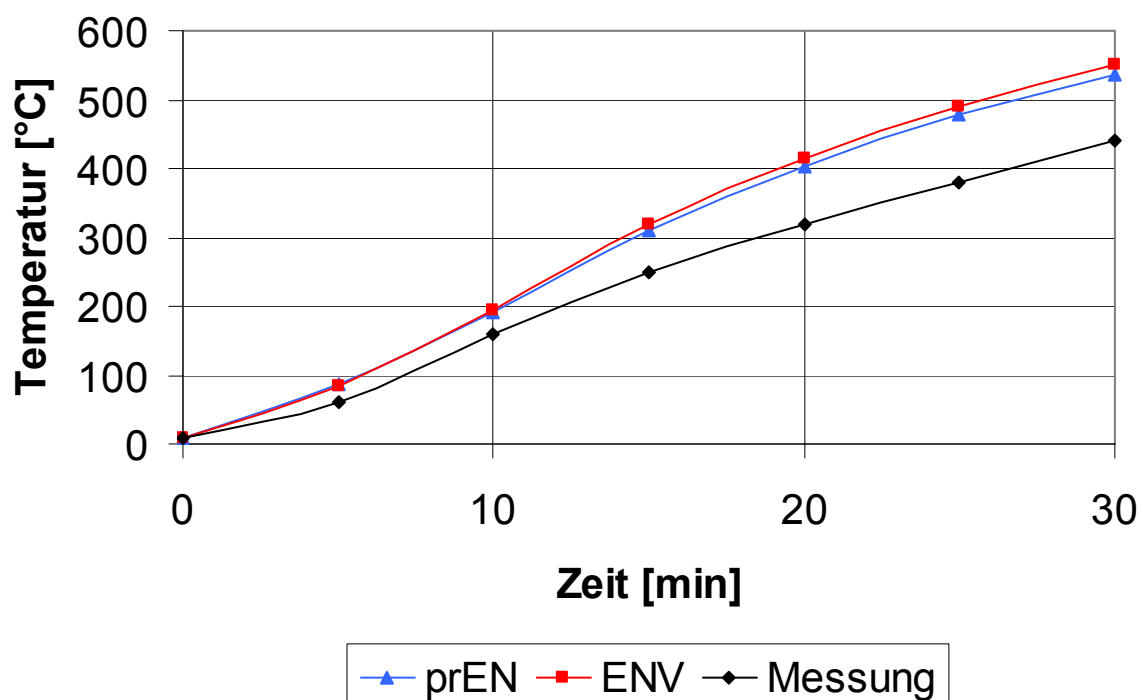
B.4: Durchlaufplatte Punkt 4

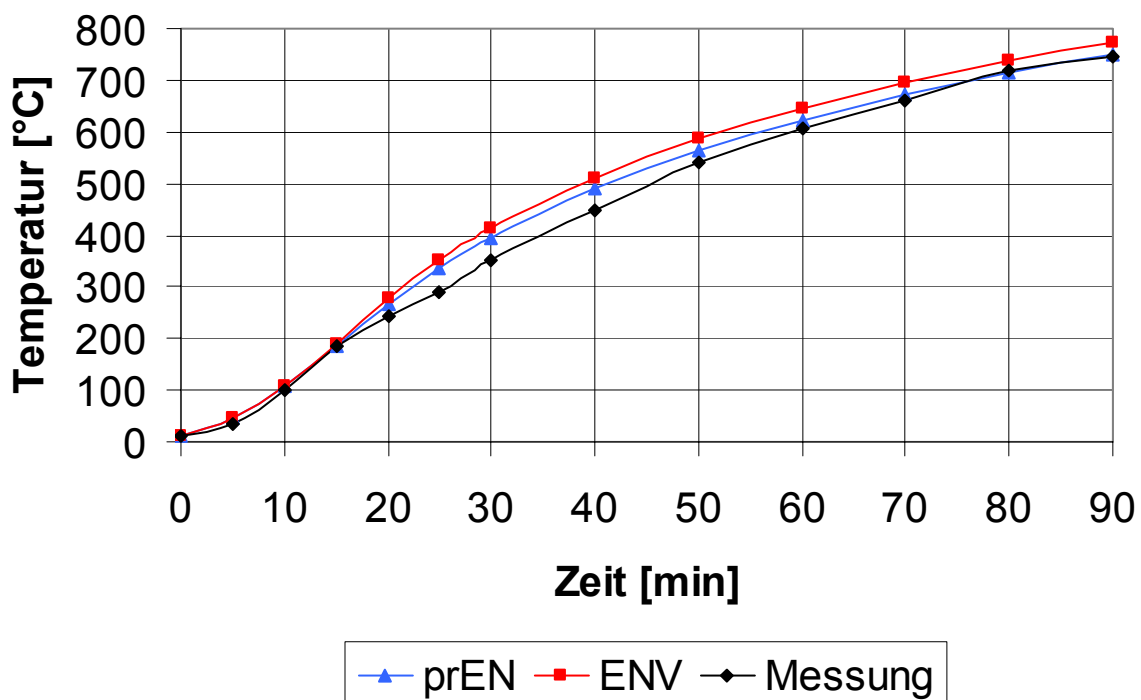
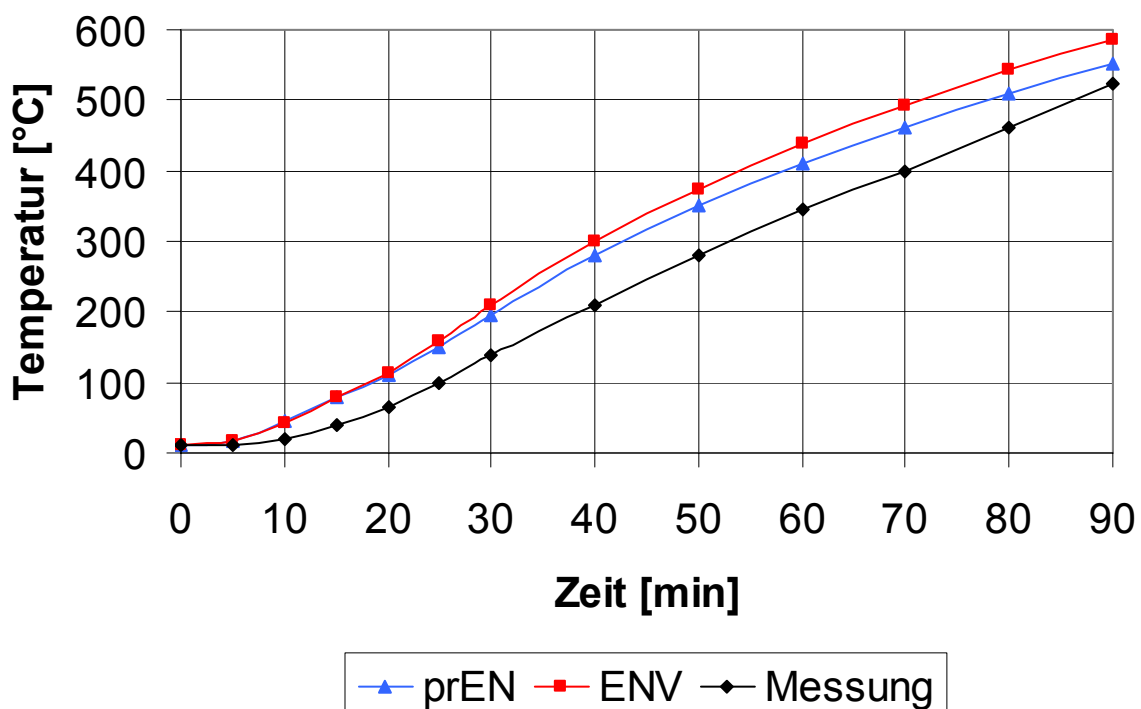


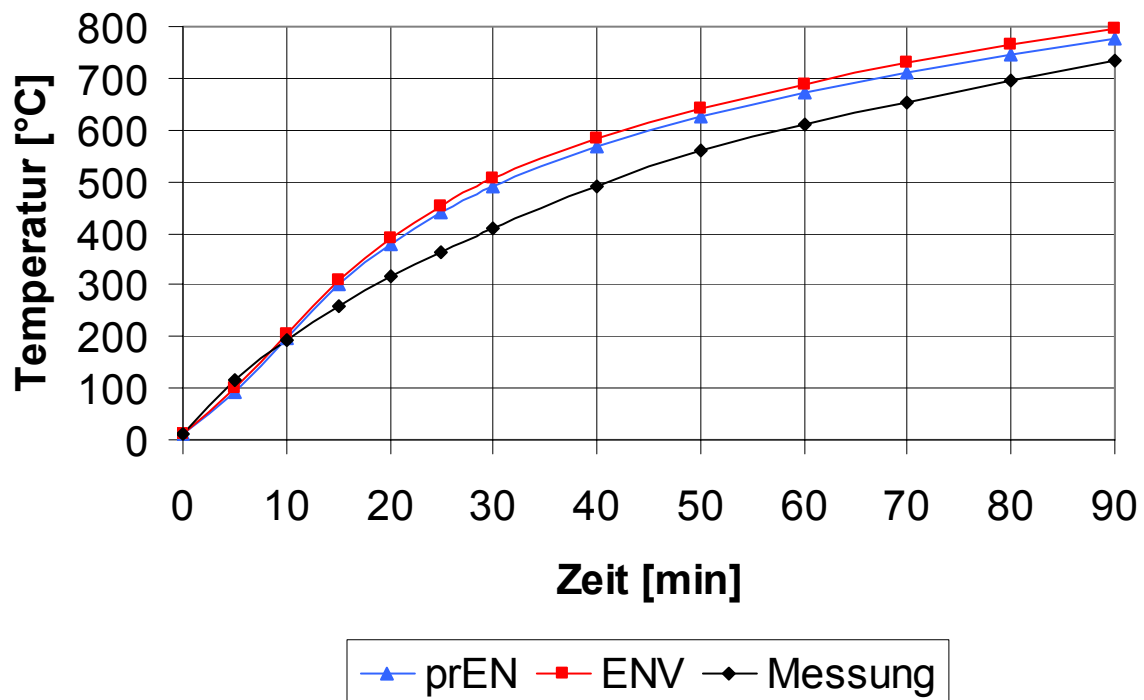
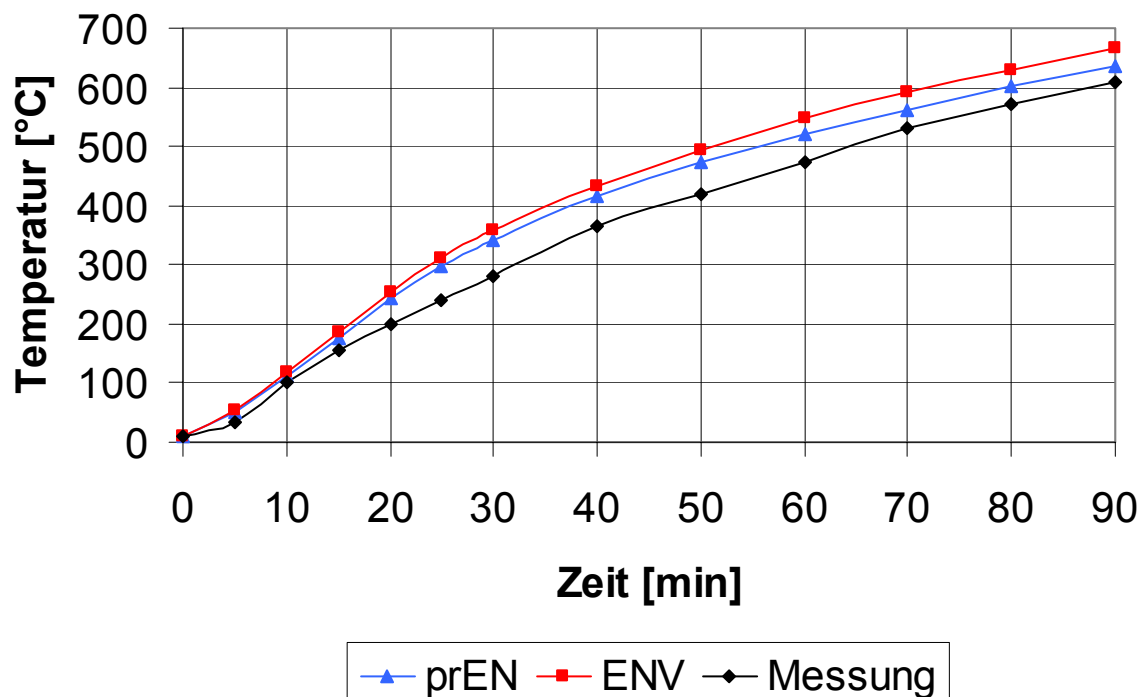
B.5 – B.18: Balken 20/40

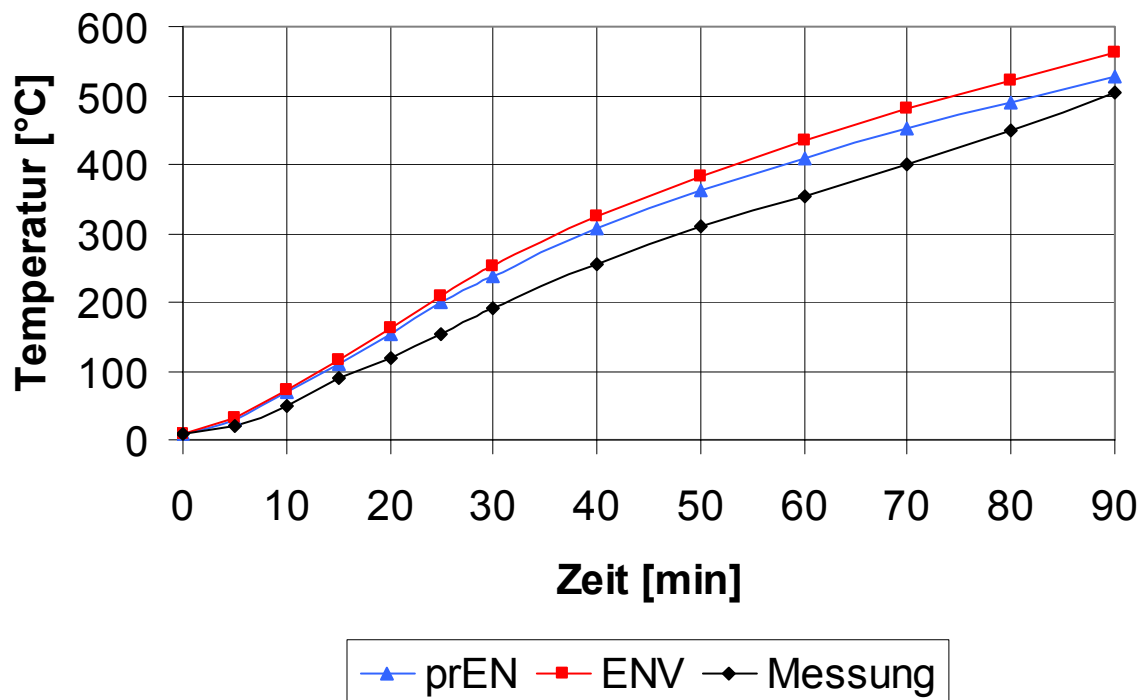
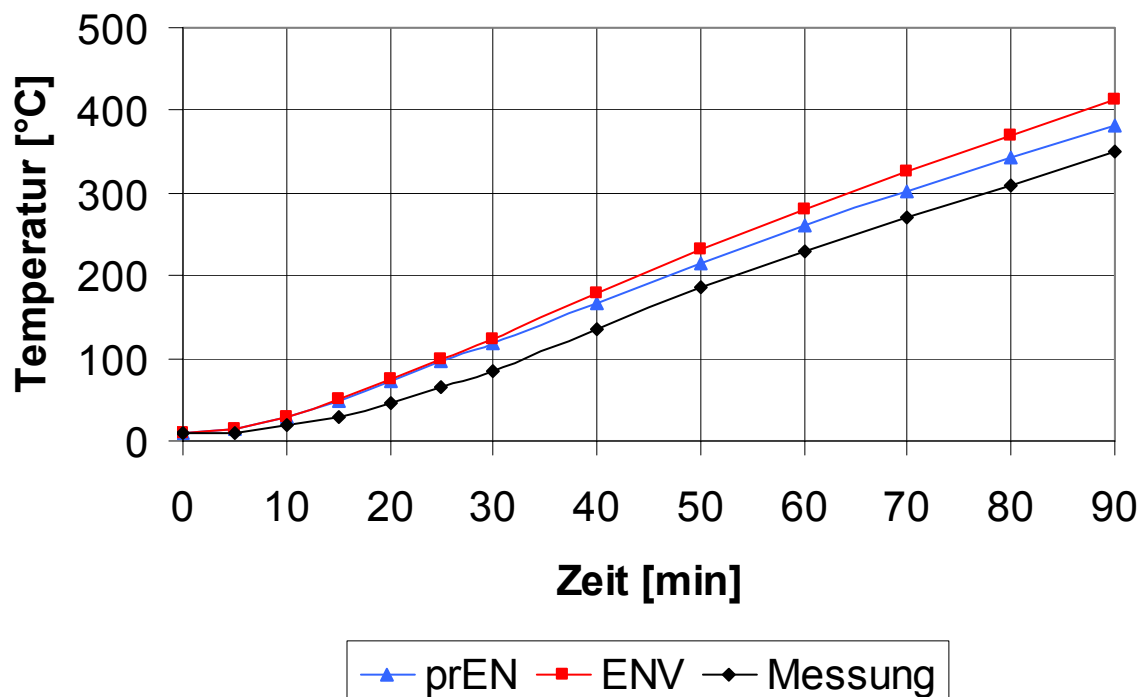
B.6: Balken 20/40 Punkt 2**B.7: Balken 20/40 Punkt 3**

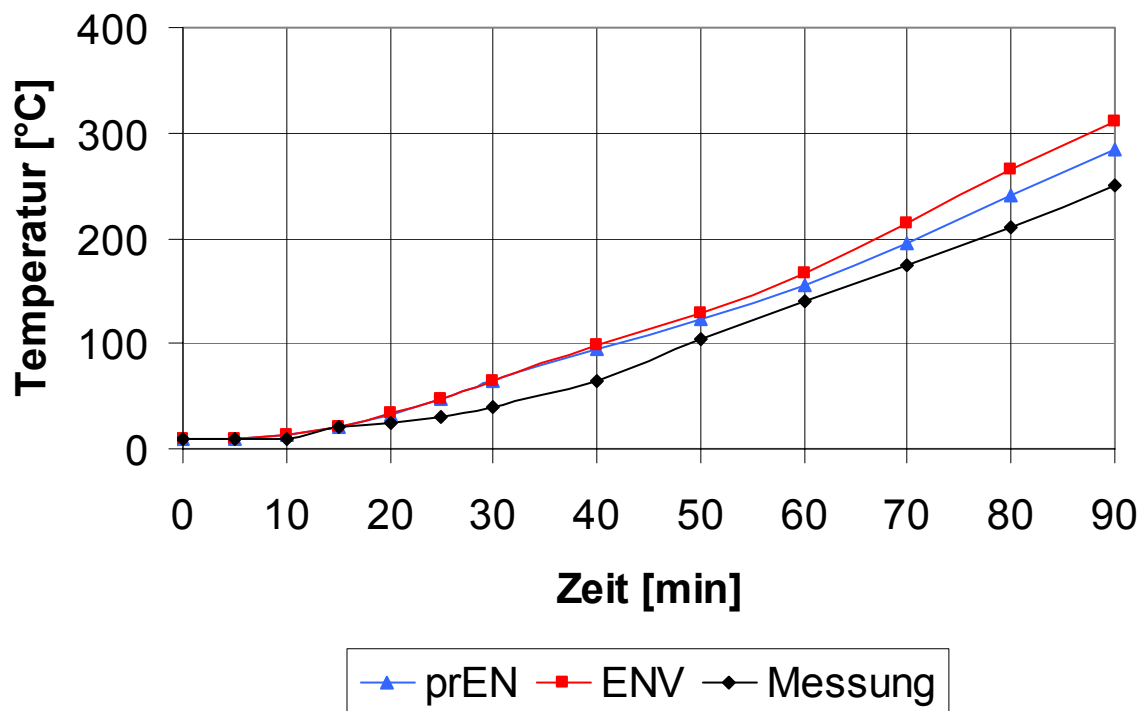
B.8: Balken 20/40 Punkt 4**B.9: Balken 20/40 Punkt 5**

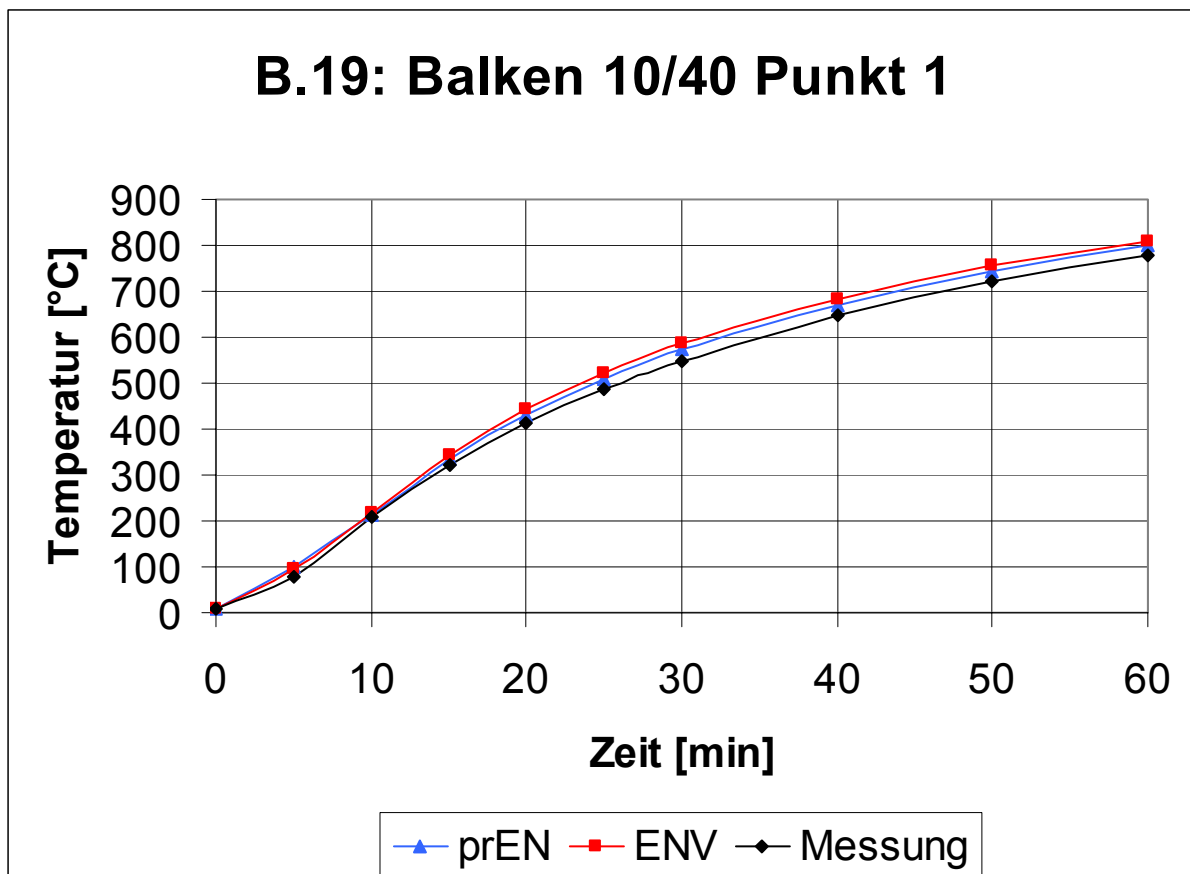
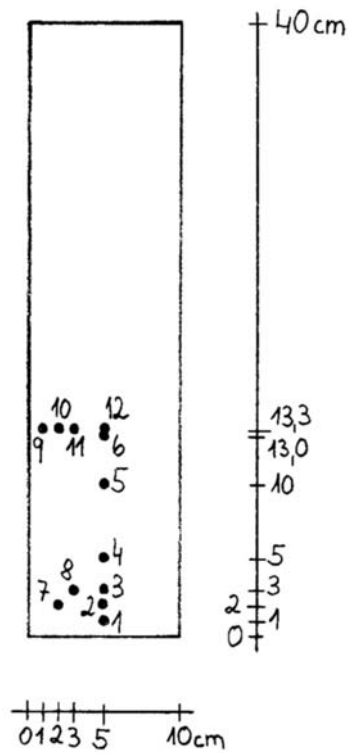
B.10: Balken 20/40 Punkt 6**B.11: Balken 20/40 Punkt 7**

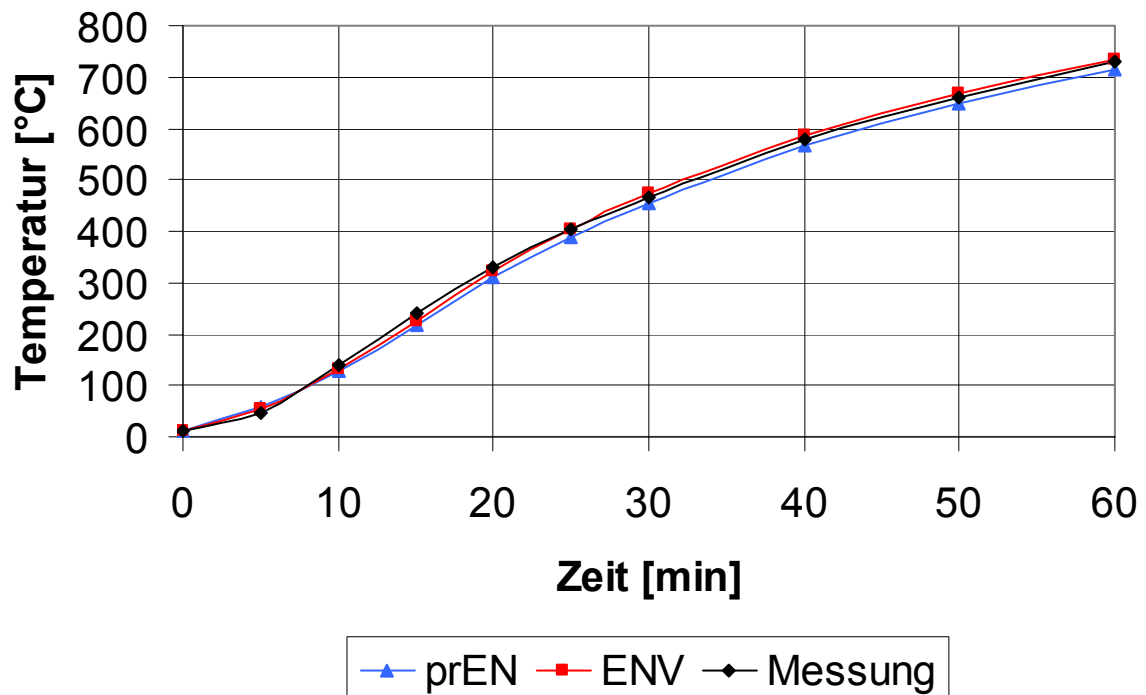
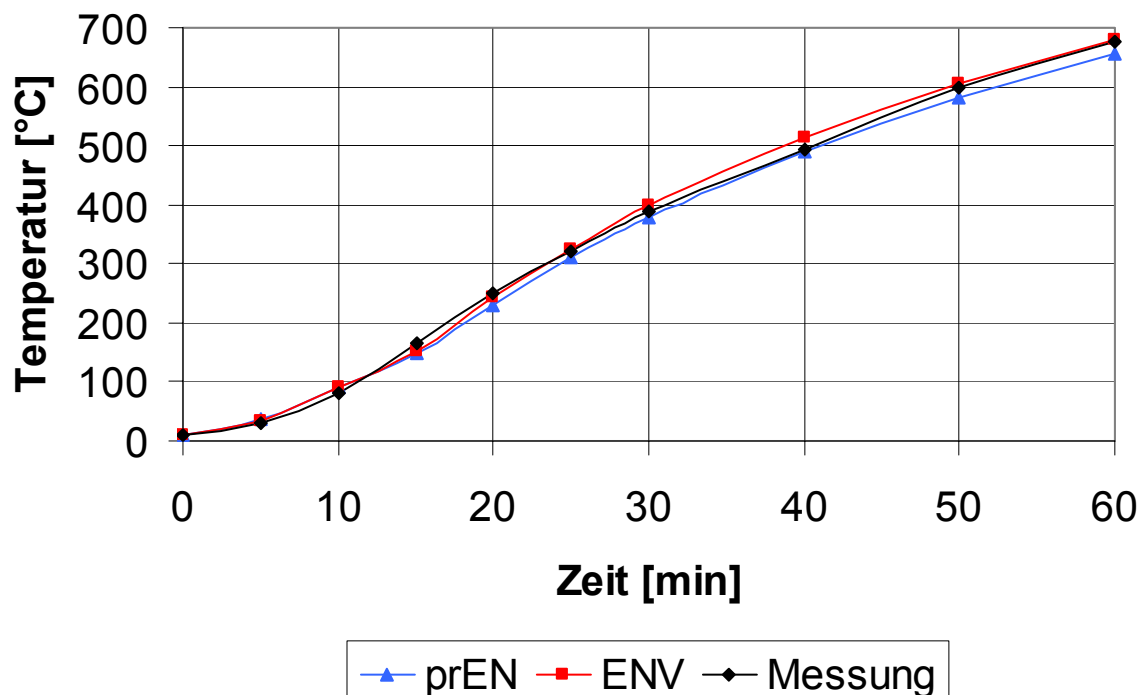
B.12: Balken 20/40 Punkt 8**B.13: Balken 20/40 Punkt 9**

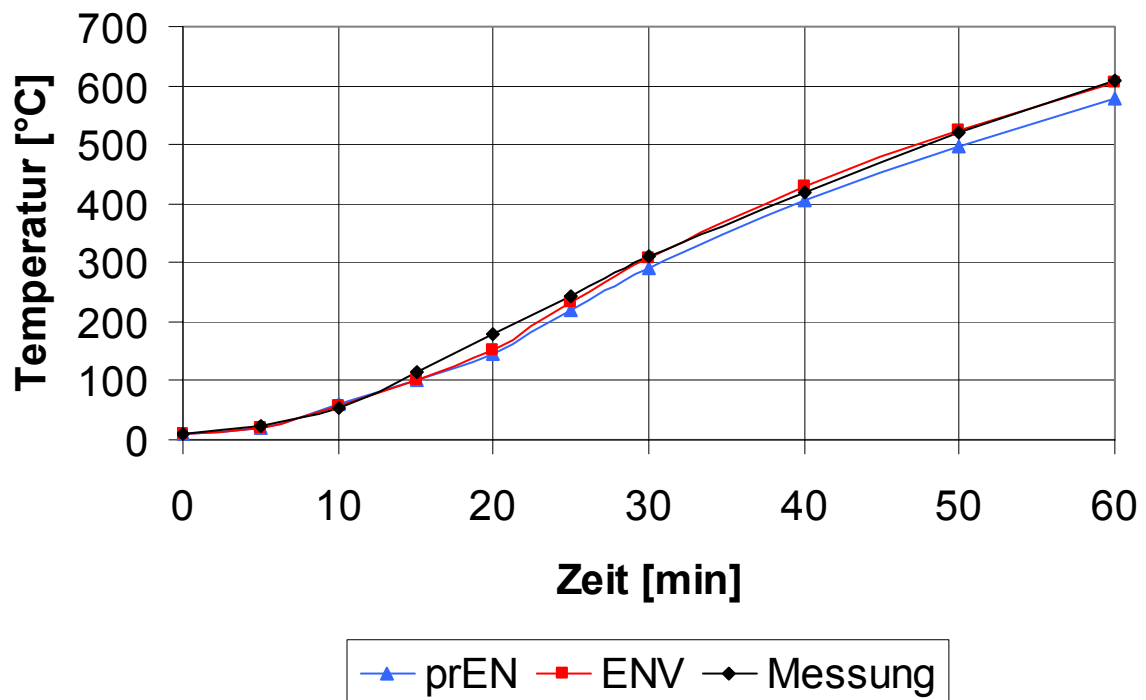
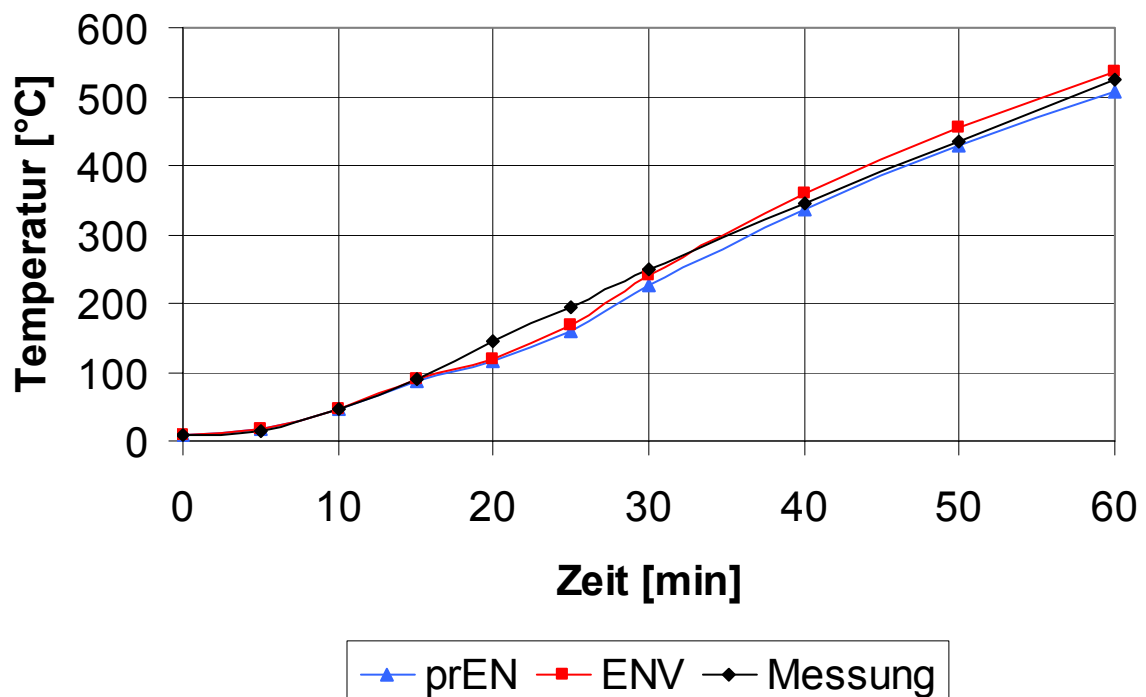
B.14: Balken 20/40 Punkt 10**B.15: Balken 20/40 Punkt 11**

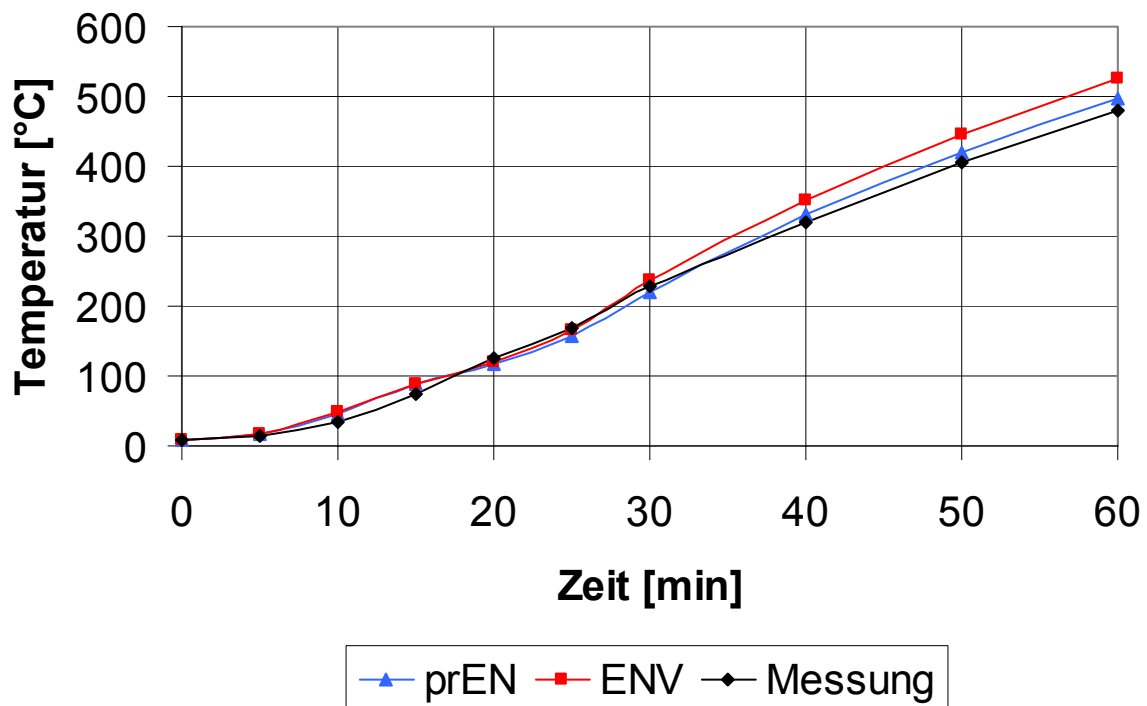
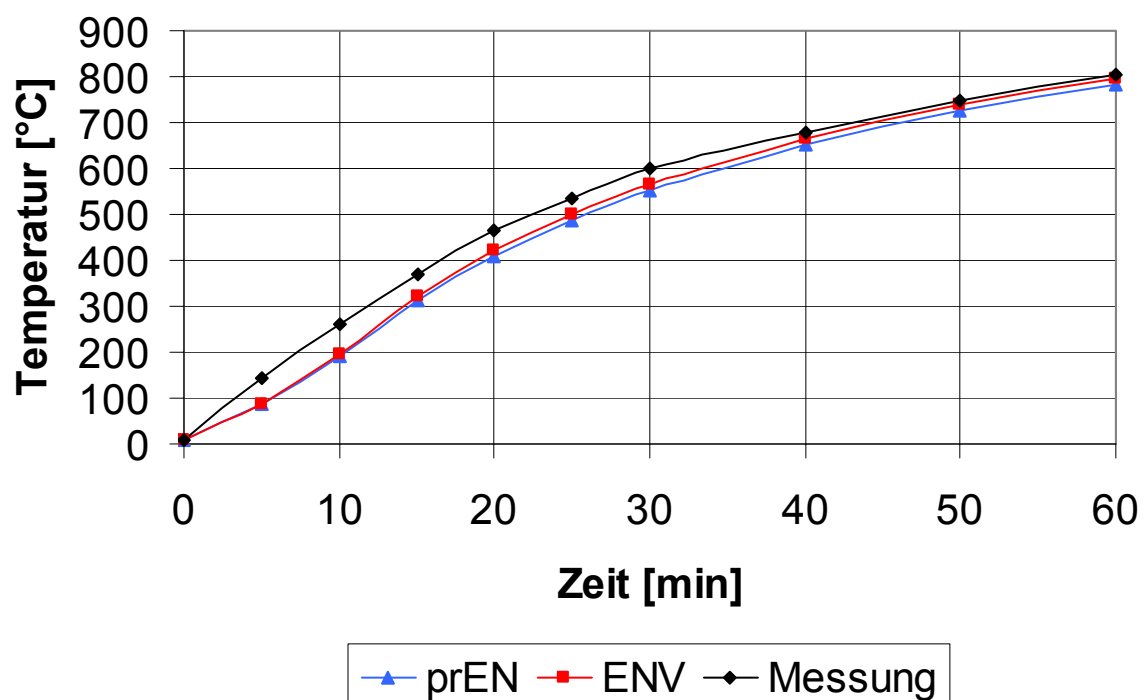
B.16: Balken 20/40 Punkt 12**B.17: Balken 20/40 Punkt 13**

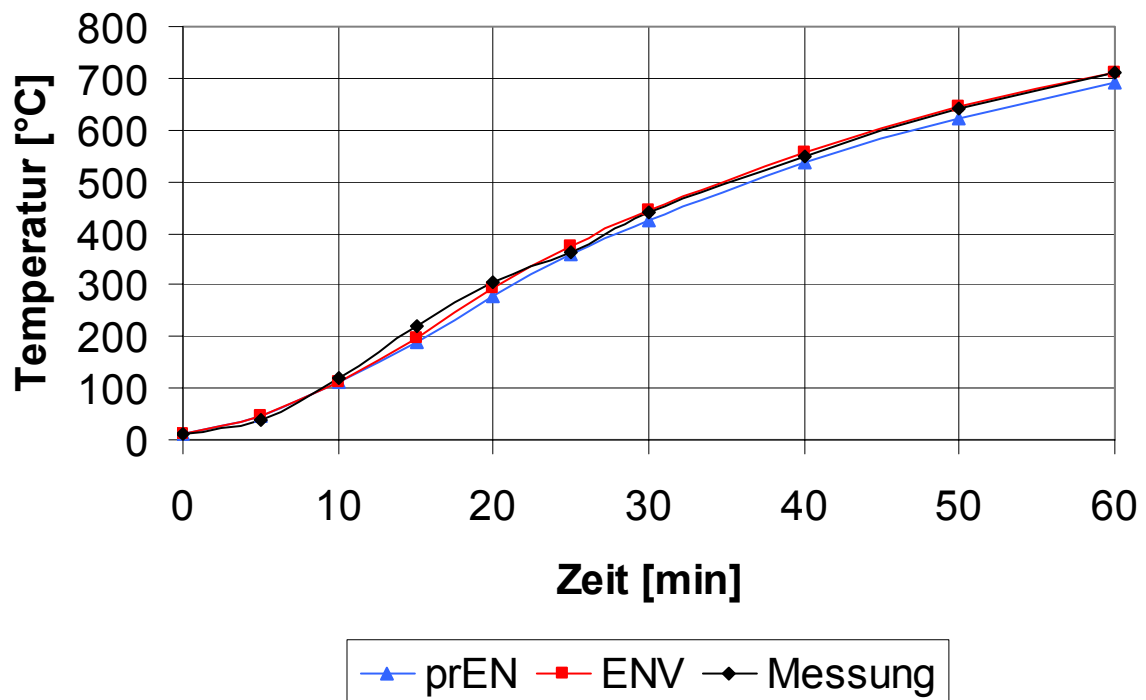
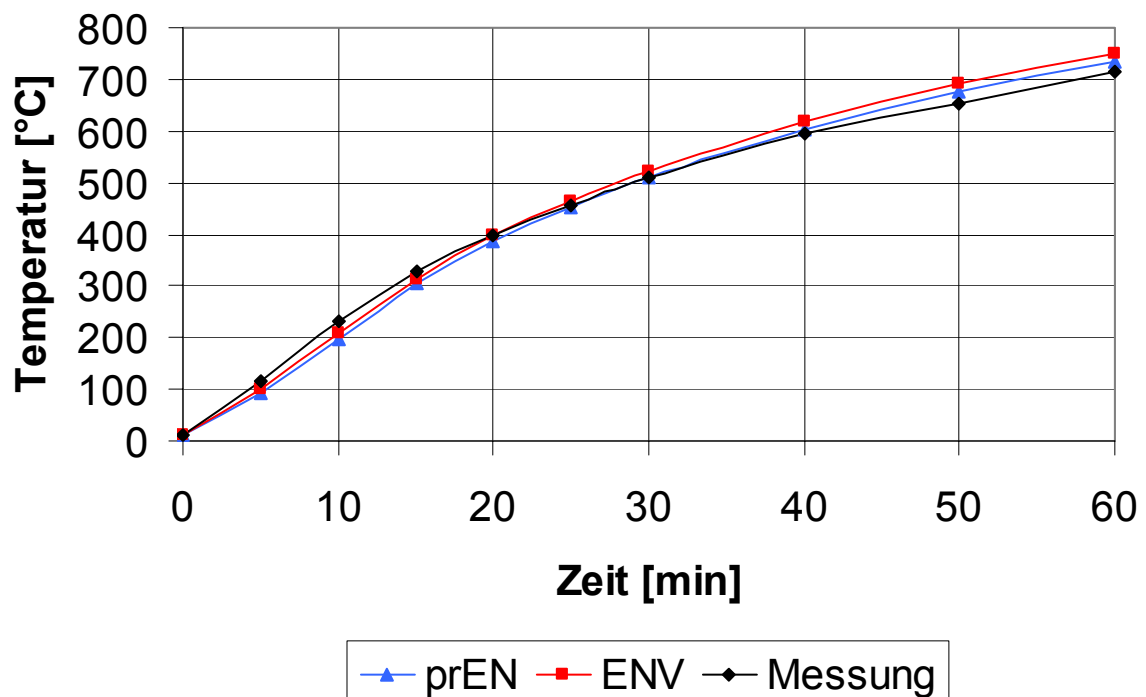
B.18: Balken 20/40 Punkt 14

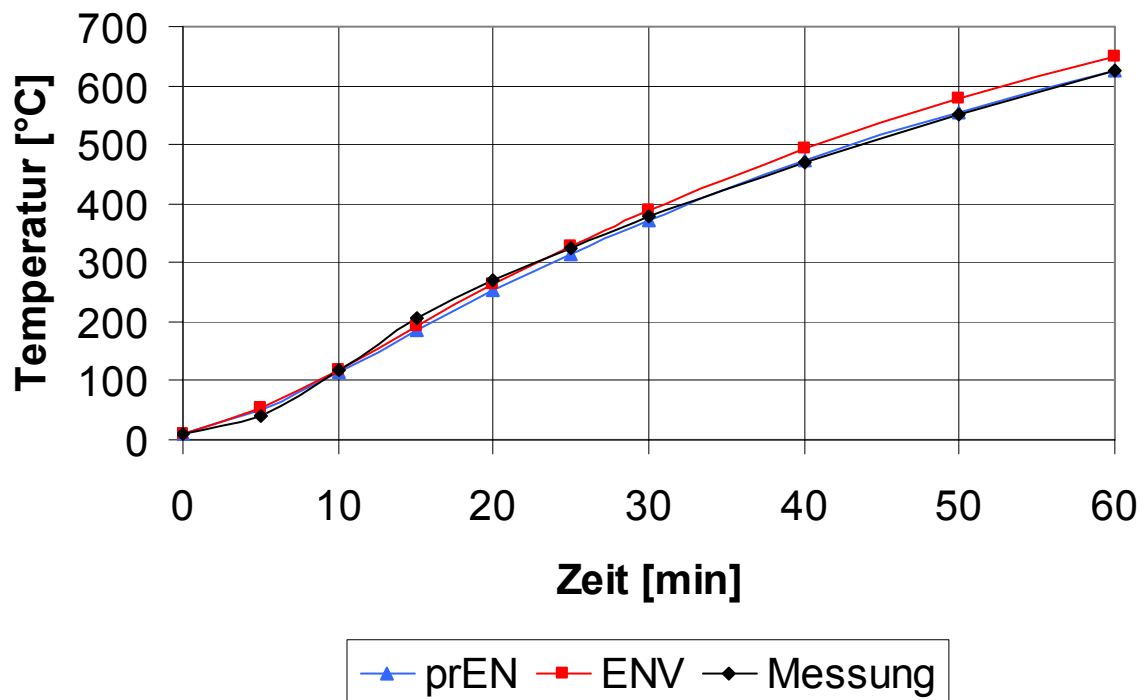
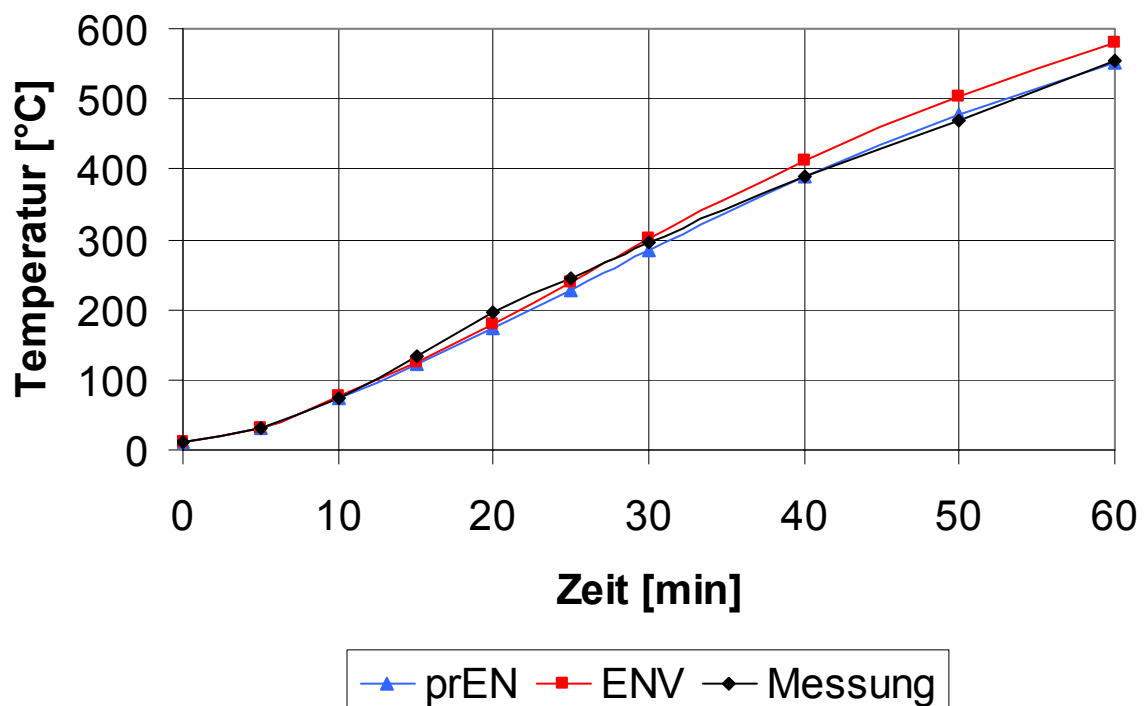
B.19 – B.30: Balken 10/40

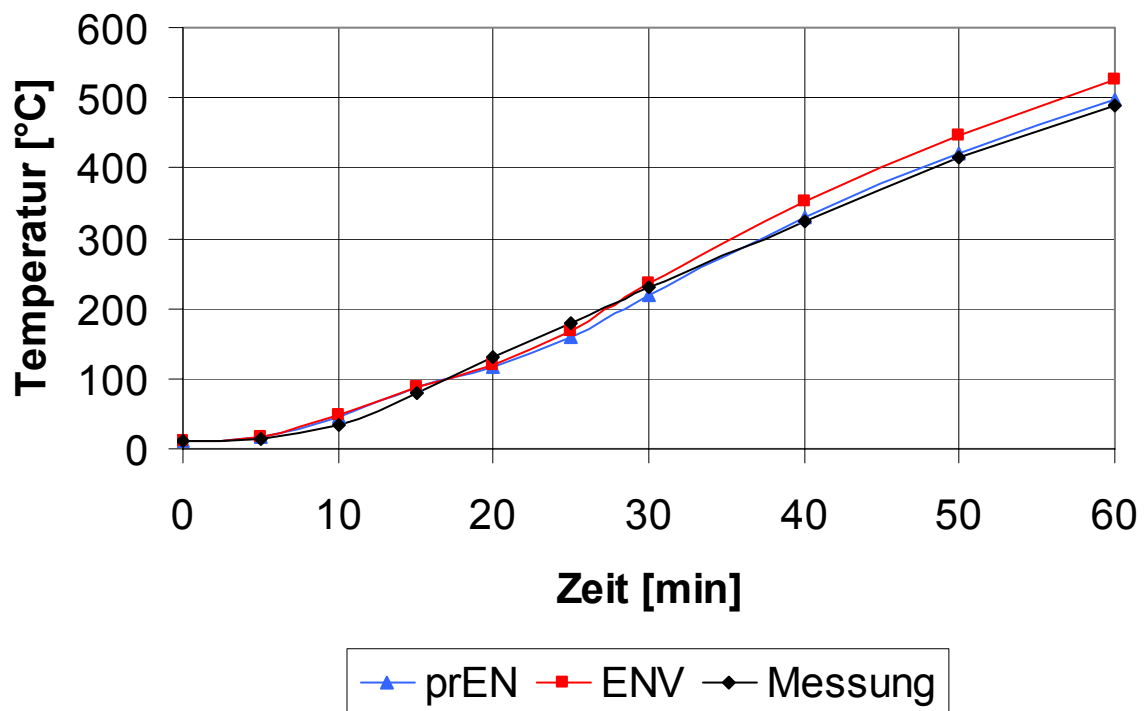
B.20: Balken 10/40 Punkt 2**B.21: Balken 10/40 Punkt 3**

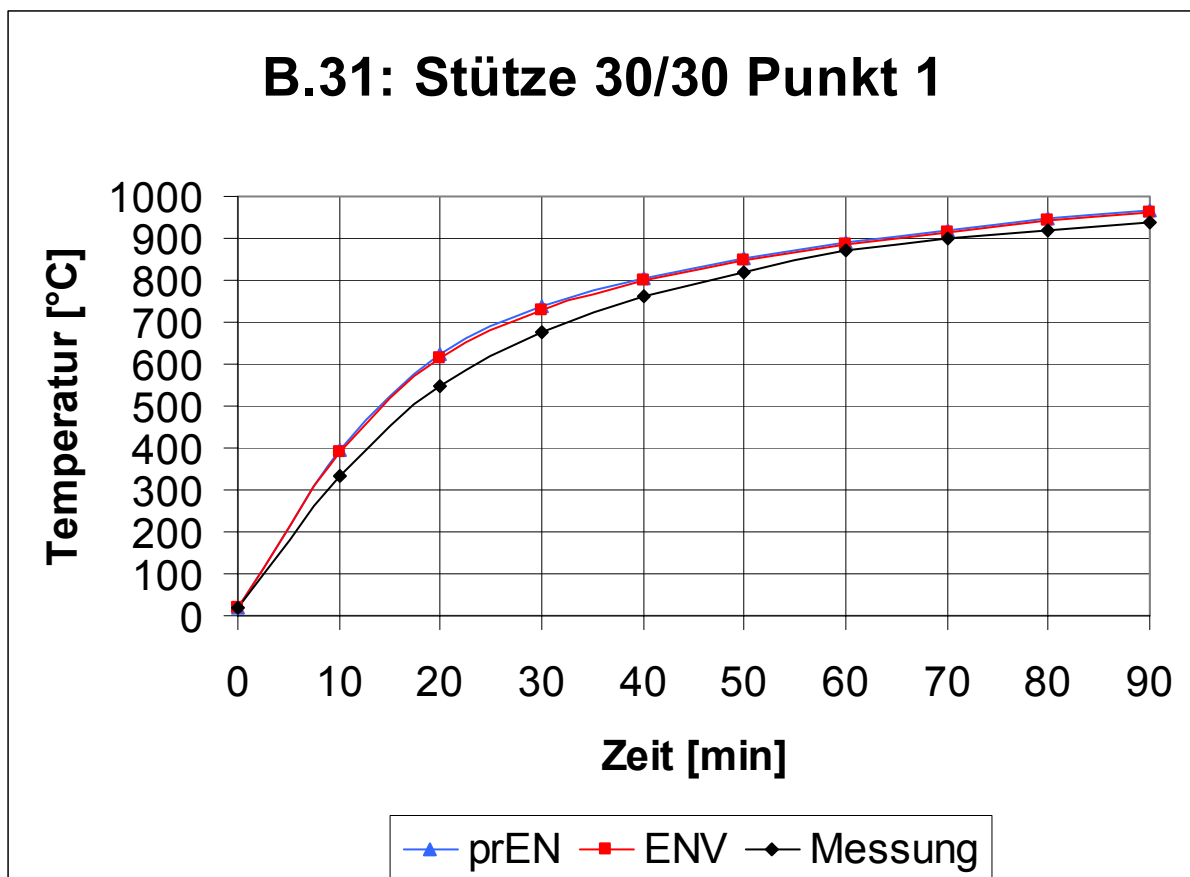
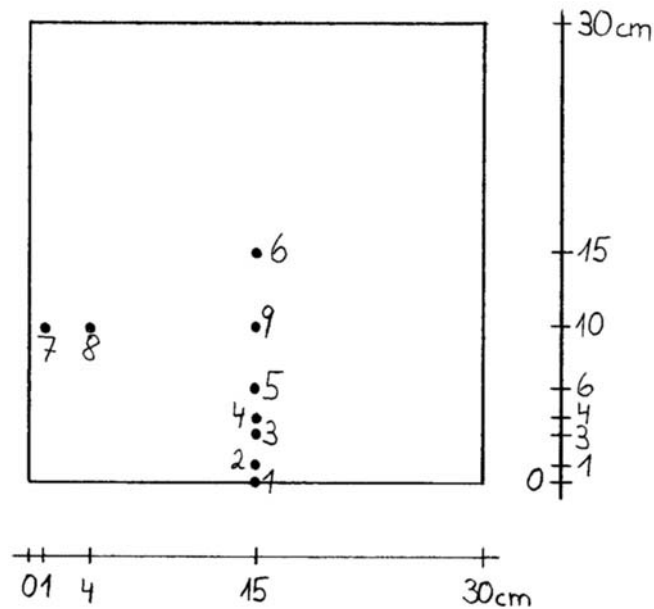
B.22: Balken 10/40 Punkt 4**B.23: Balken 10/40 Punkt 5**

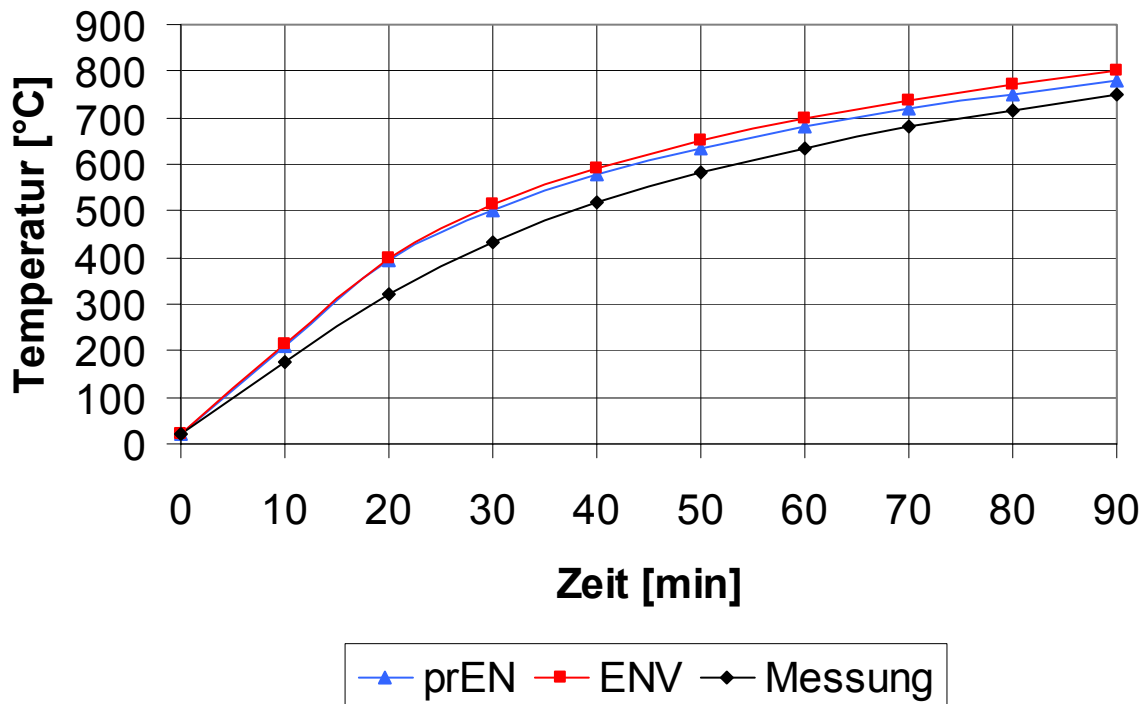
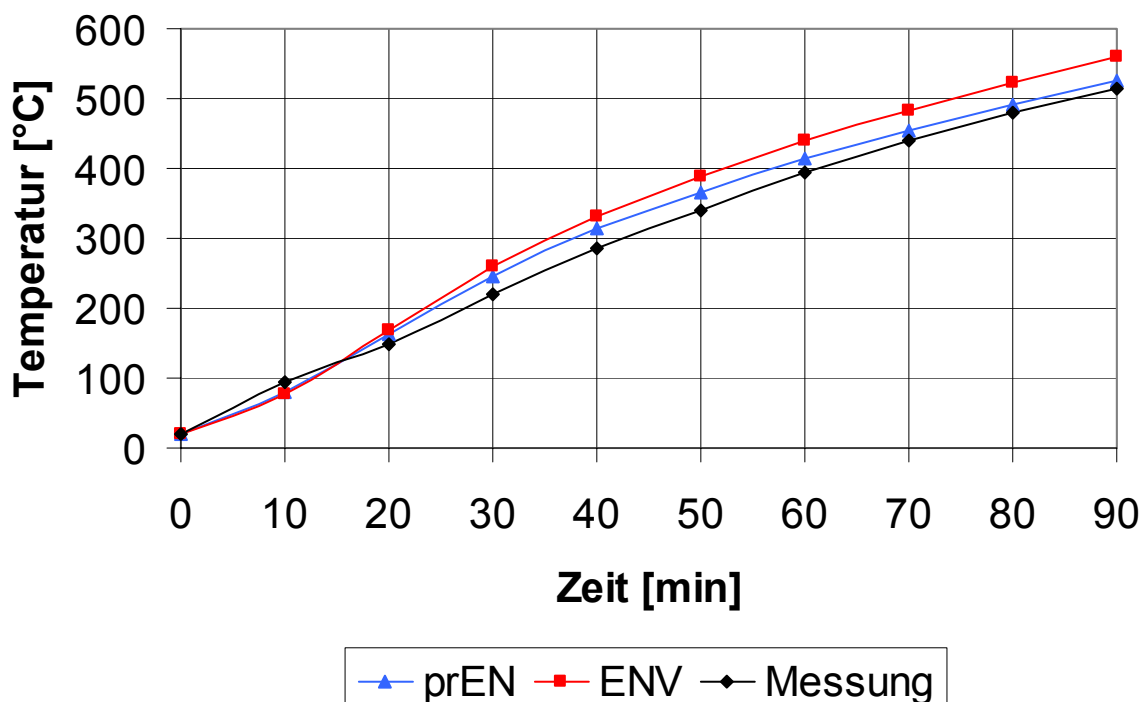
B.24: Balken 10/40 Punkt 6**B.25: Balken 10/40 Punkt 7**

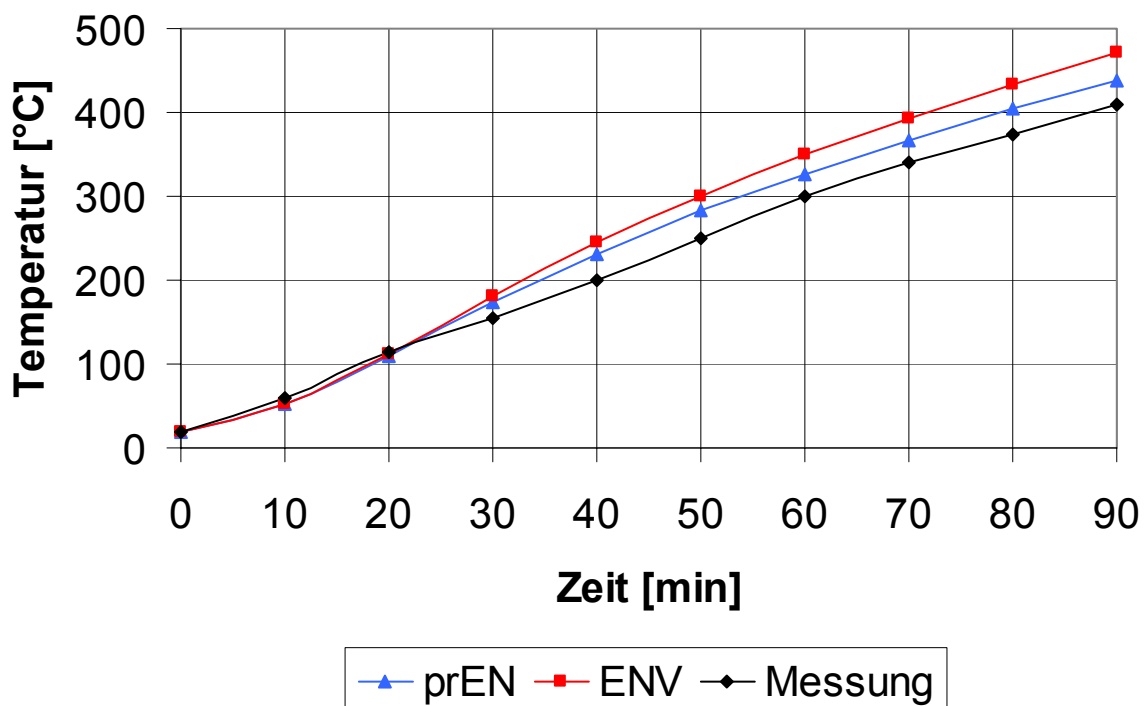
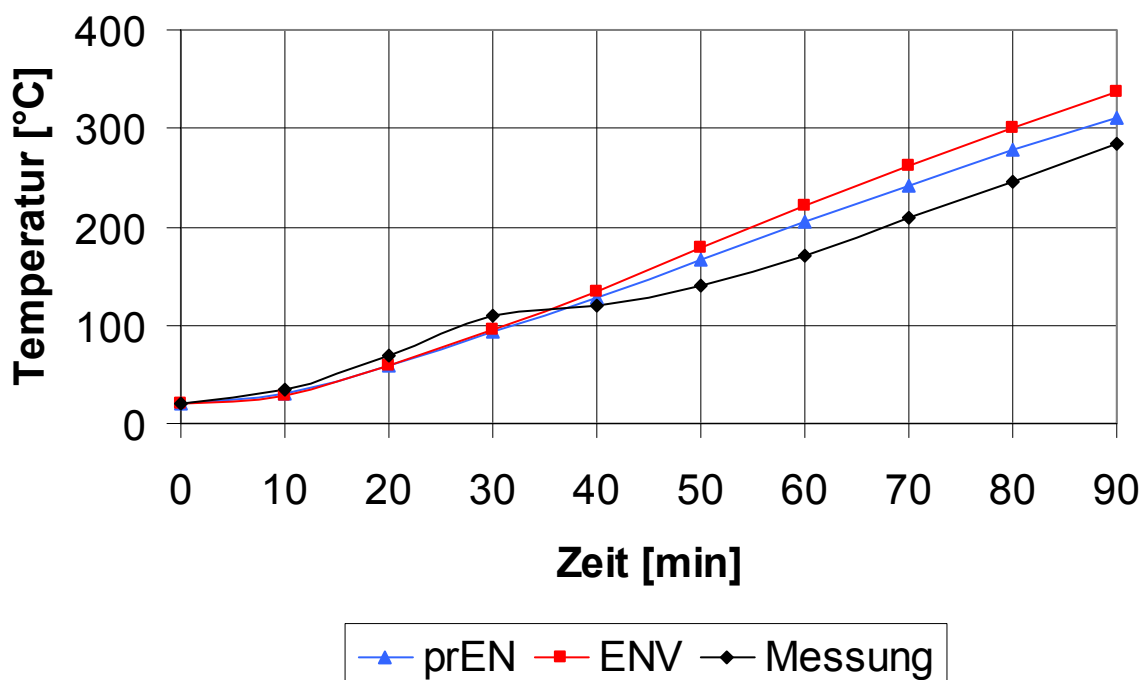
B.26: Balken 10/40 Punkt 8**B.27: Balken 10/40 Punkt 9**

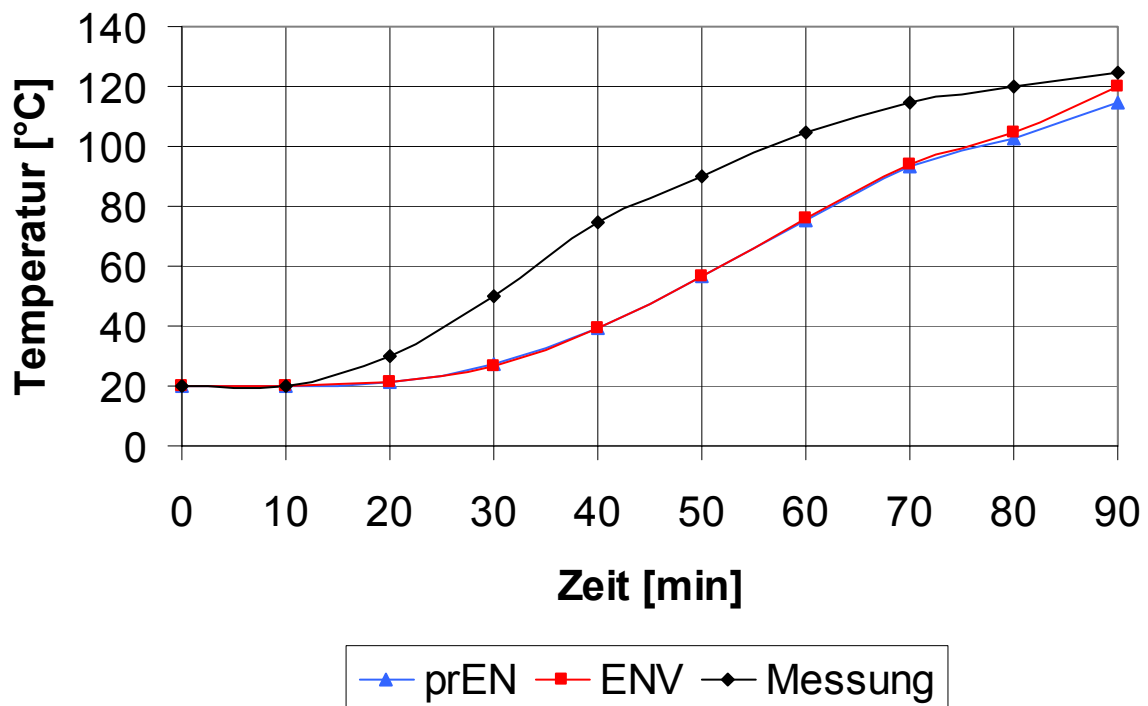
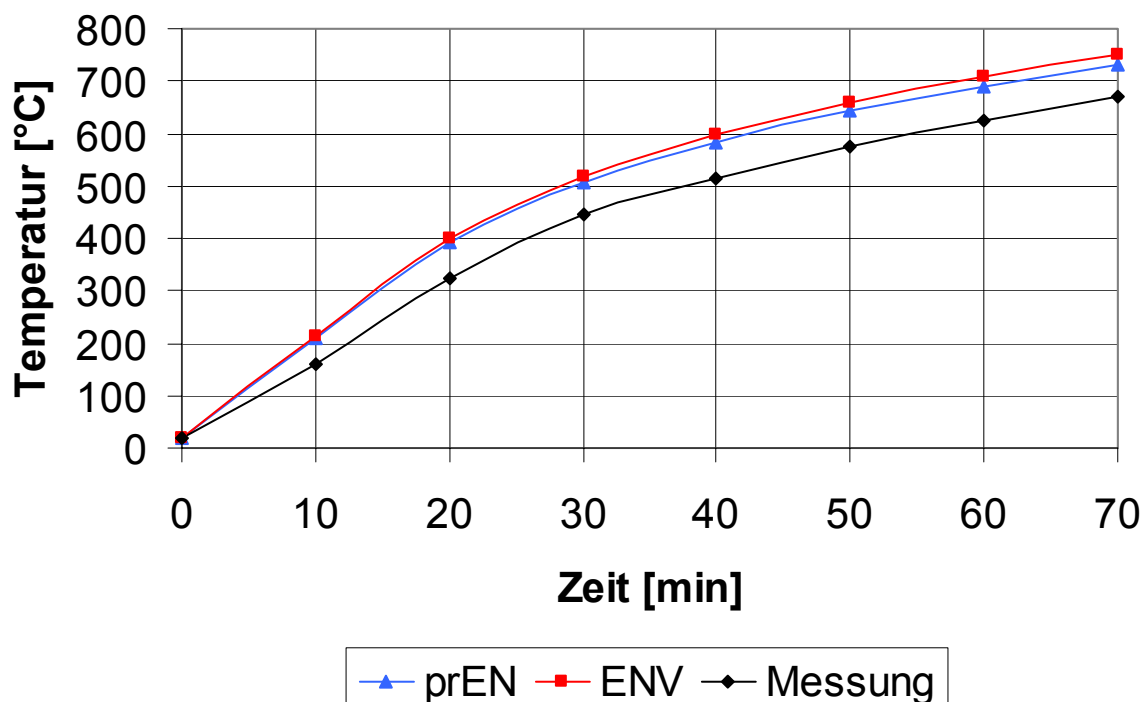
B.28: Balken 10/40 Punkt 10**B.29: Balken 10/40 Punkt 11**

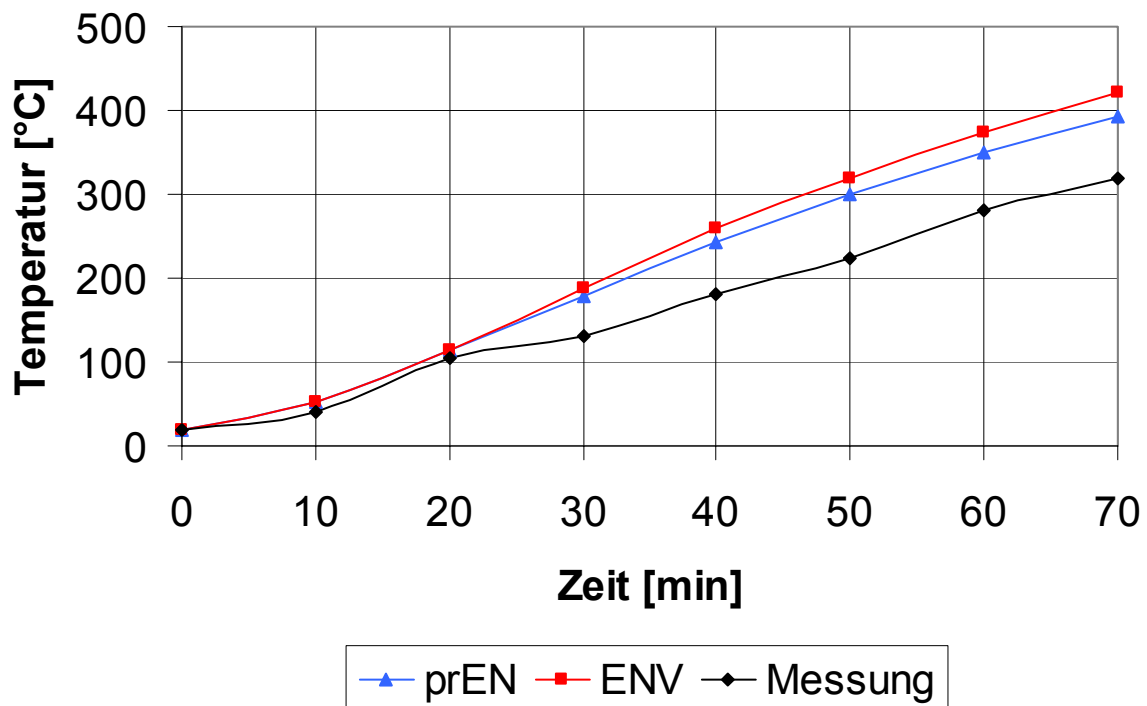
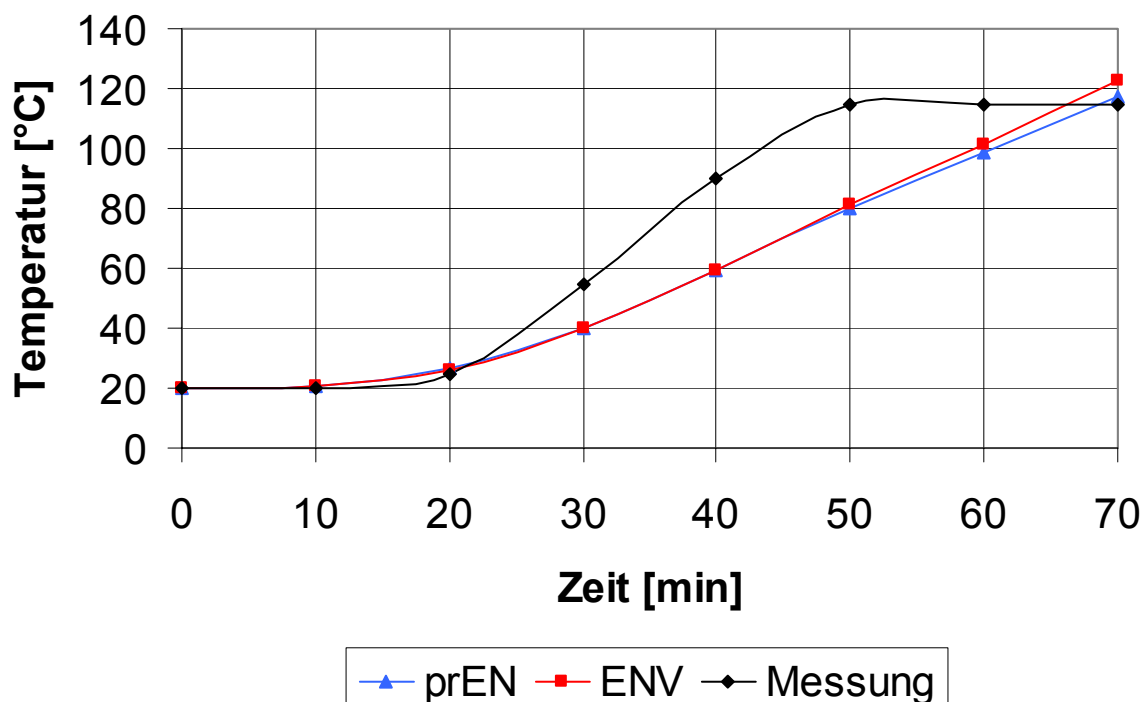
B.30: Balken 10/40 Punkt 12

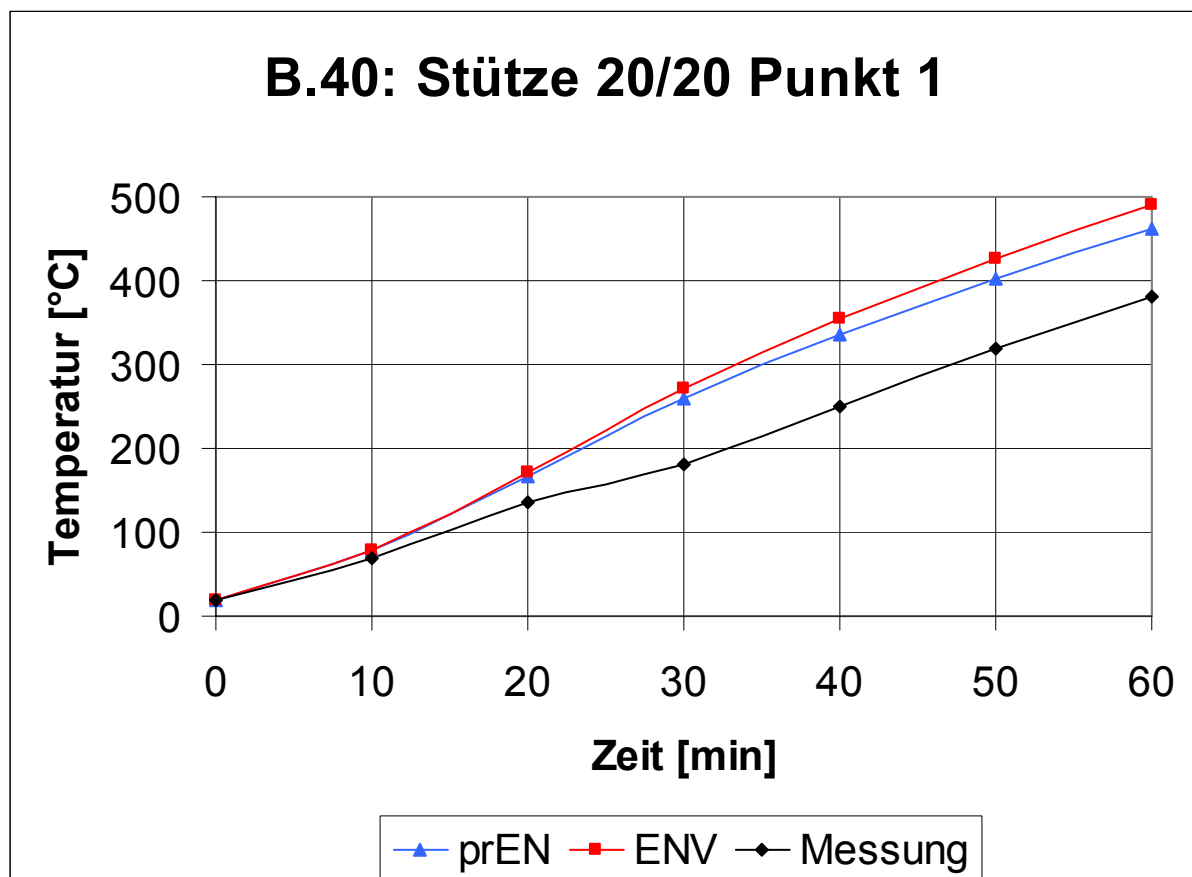
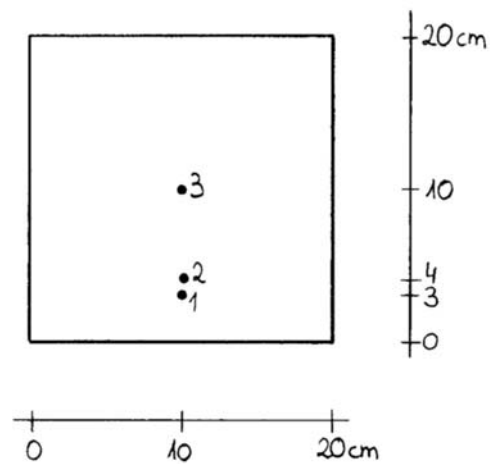
B.31 – B.39: Stütze 30/30

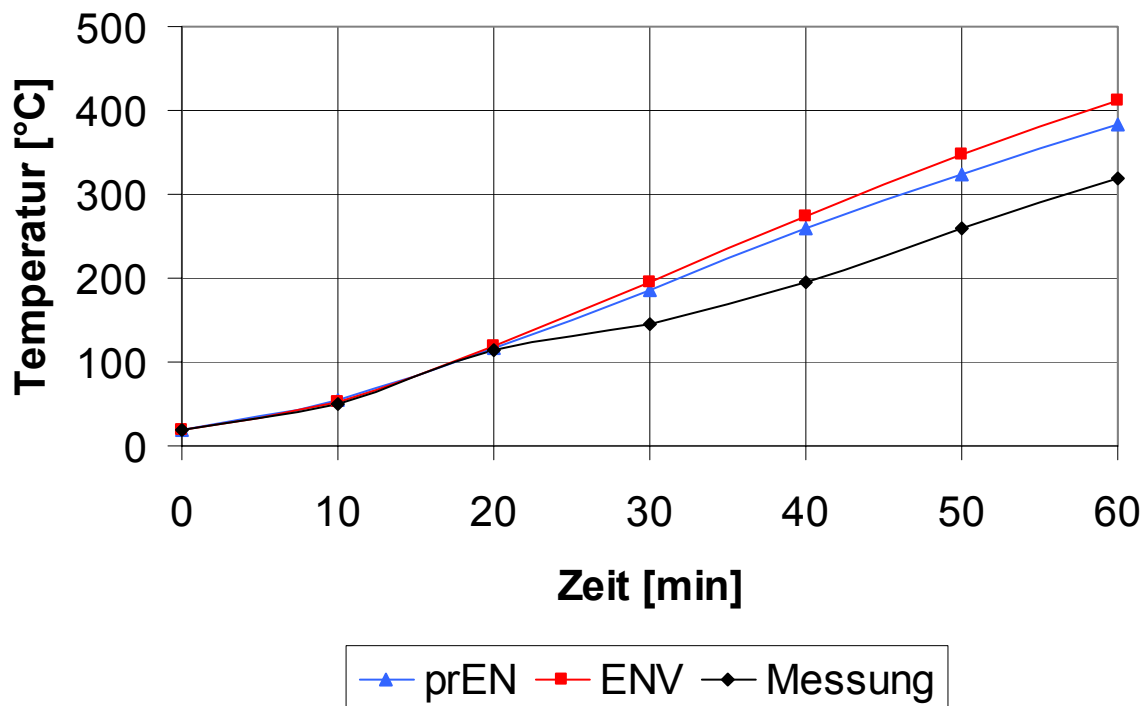
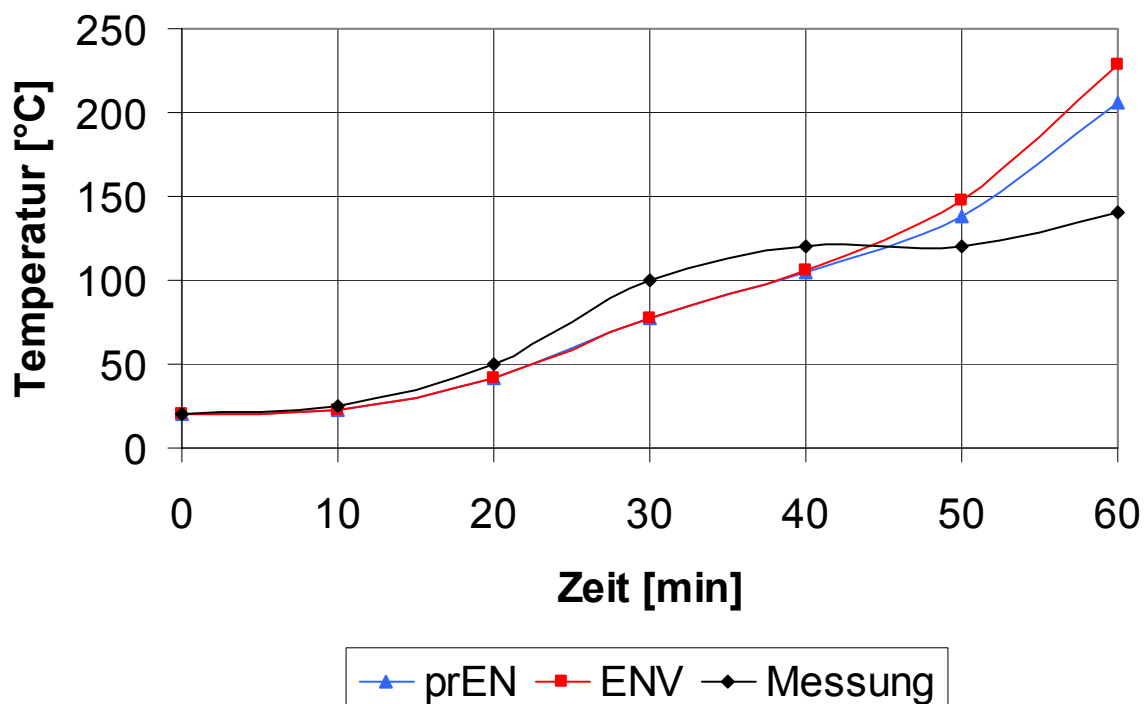
B.32: Stütze 30/30 Punkt 2**B.33: Stütze 30/30 Punkt 3**

B.34: Stütze 30/30 Punkt 4**B.35: Stütze 30/30 Punkt 5**

B.36: Stütze 30/30 Punkt 6**B.37: Stütze 30/30 Punkt 7**

B.38: Stütze 30/30 Punkt 8**B.39: Stütze 30/30 Punkt 9**

B.40 – B.42: Stütze 20/20

B.41: Stütze 20/20 Punkt 2**B.42: Stütze 20/20 Punkt 3**

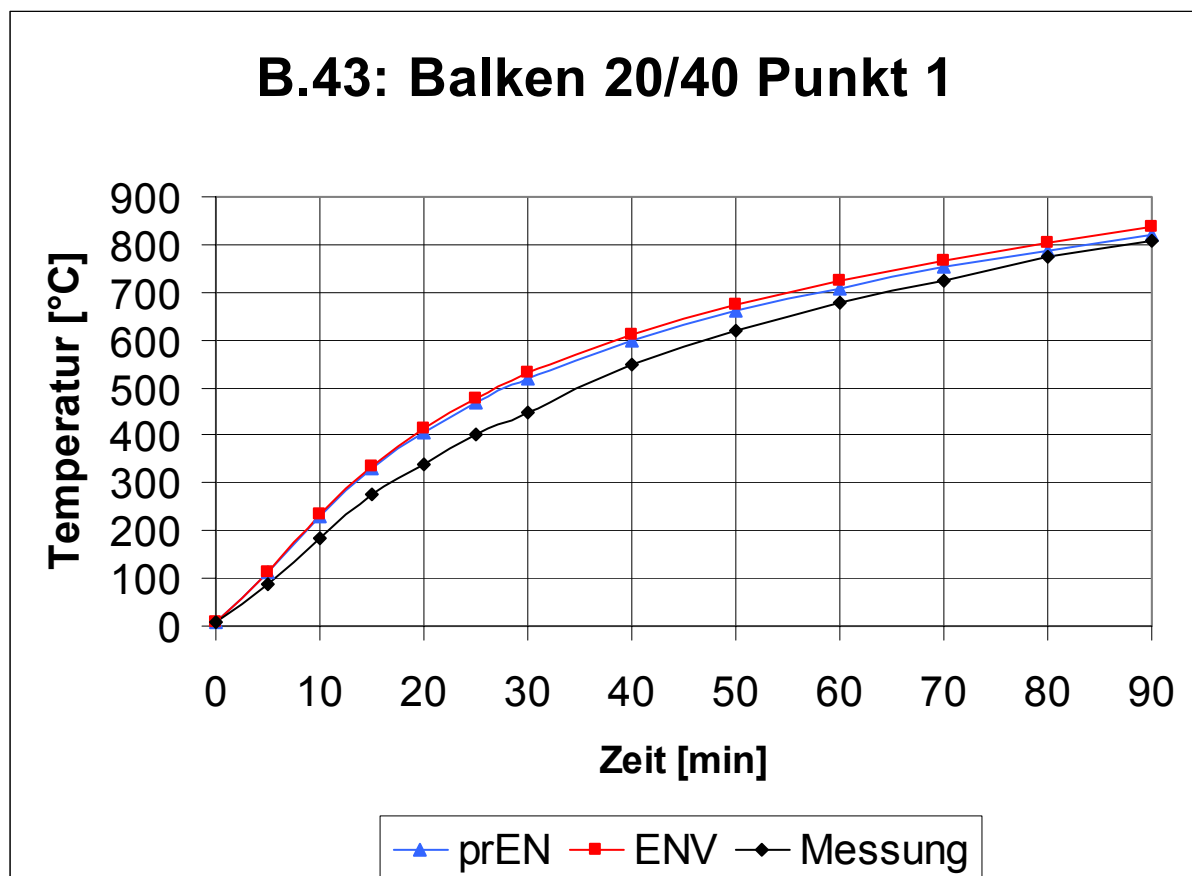
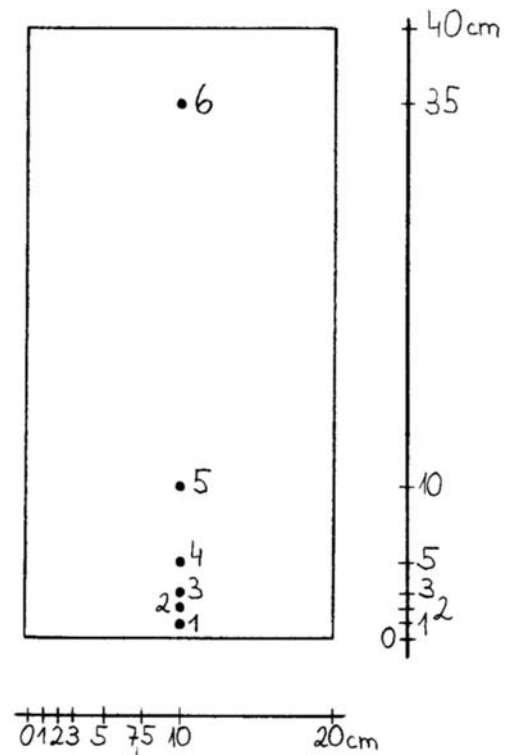
ANHANG B-2

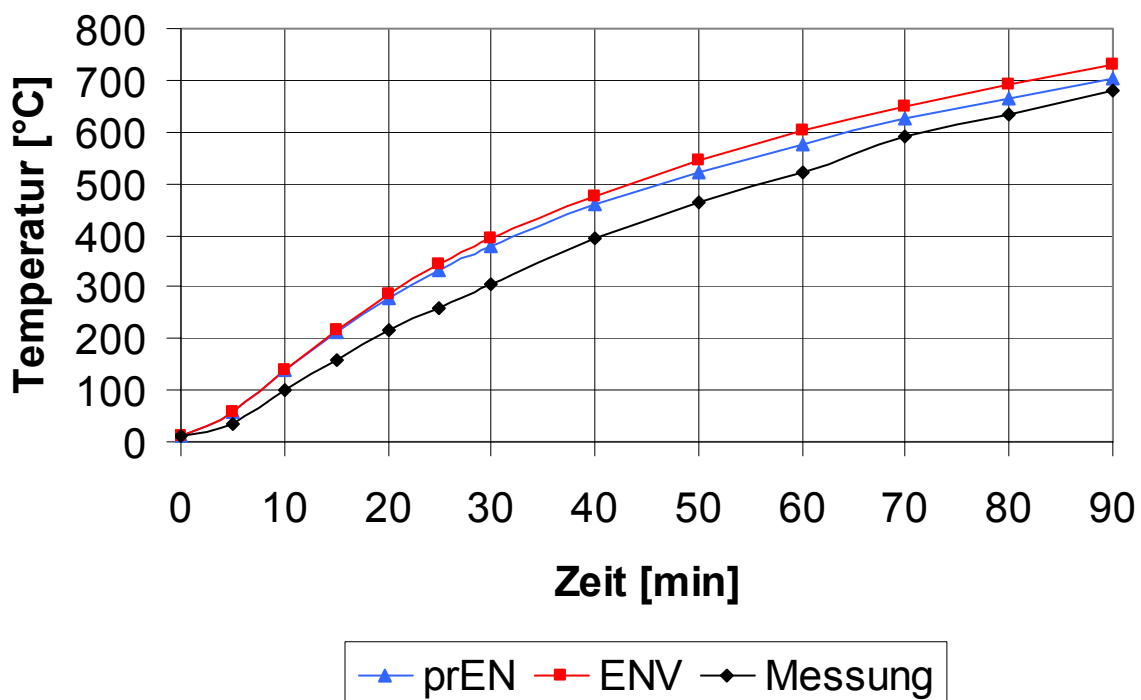
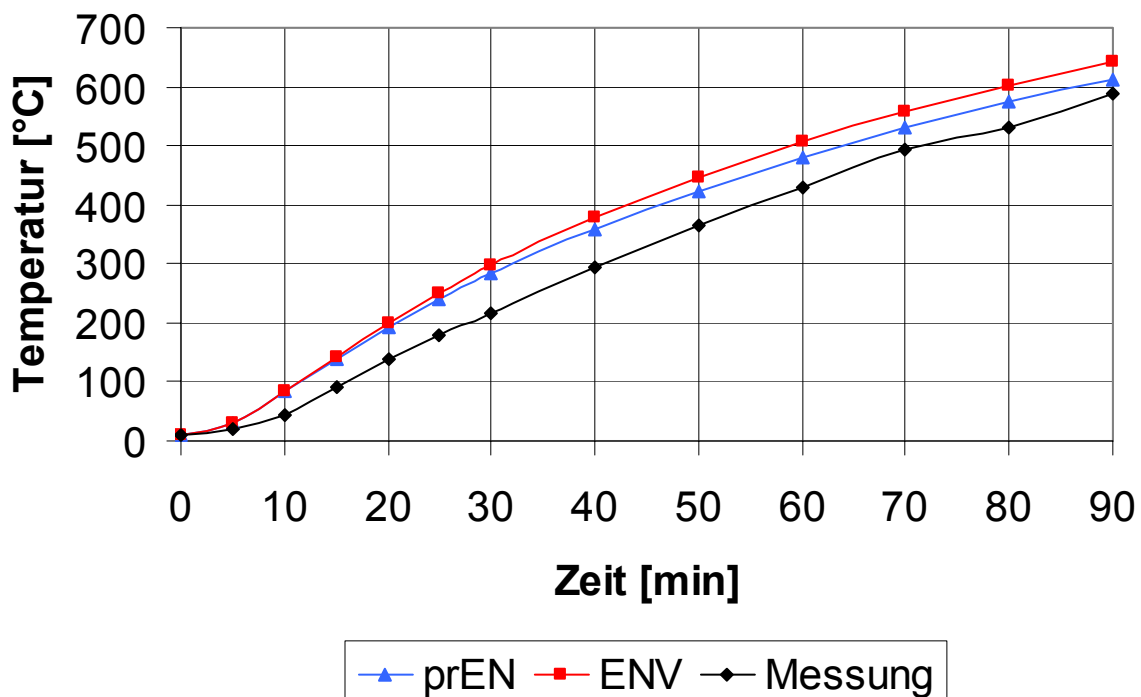
Berechnete Temperaturen

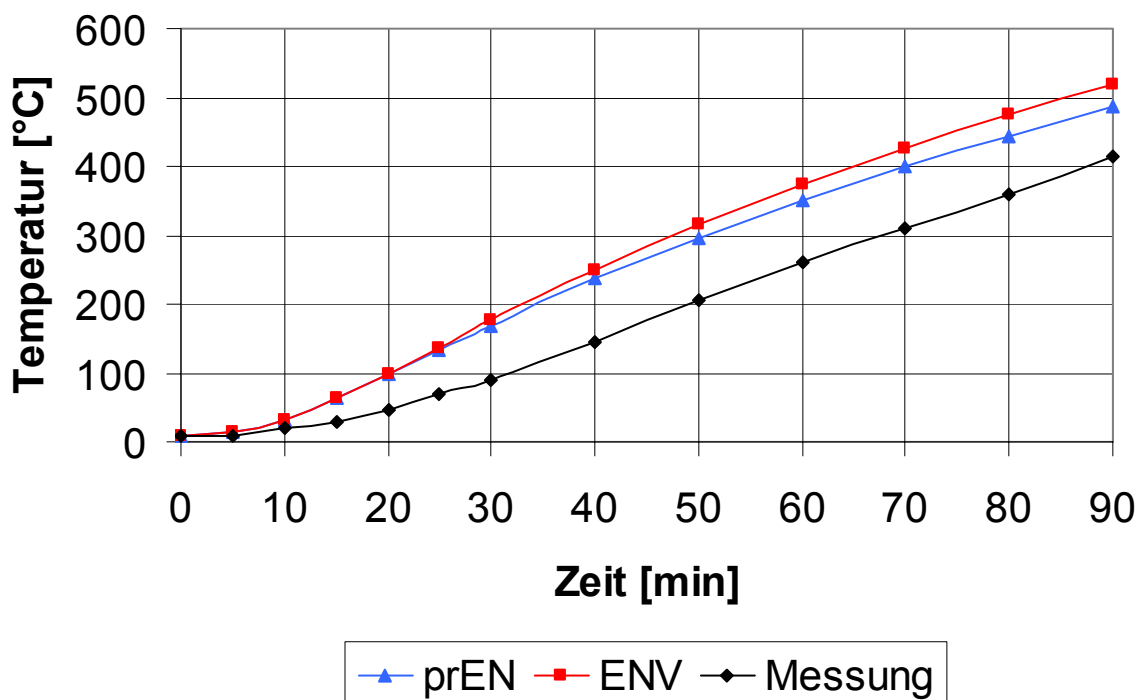
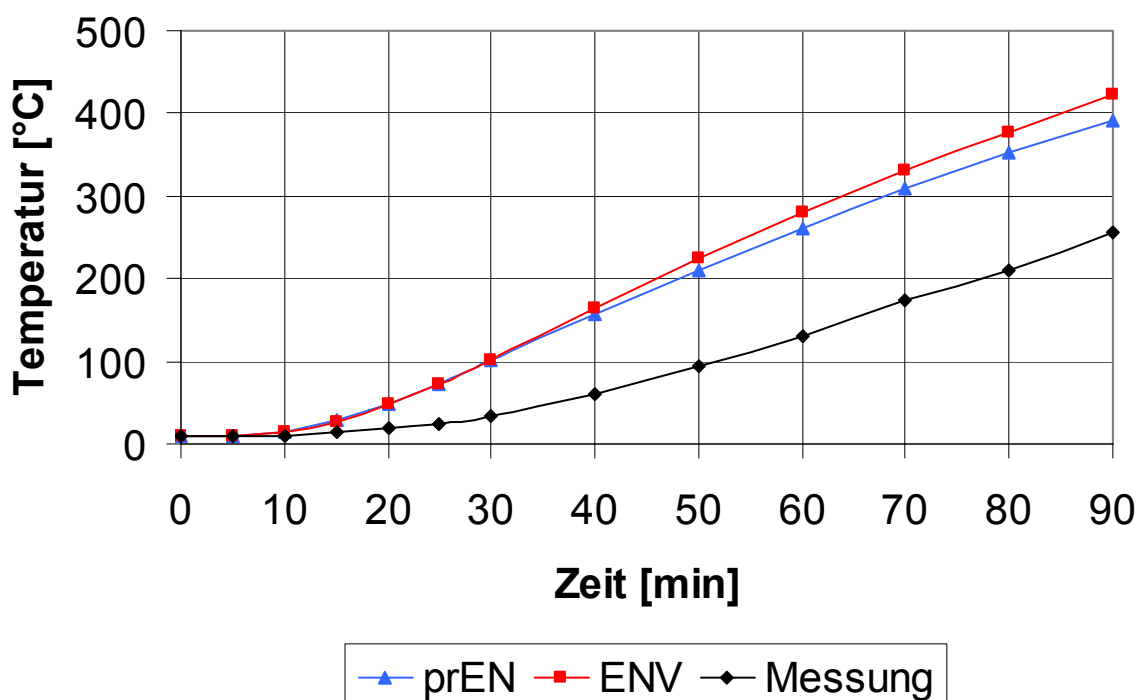
Feuchtigkeit: 0,0 Gew.-%

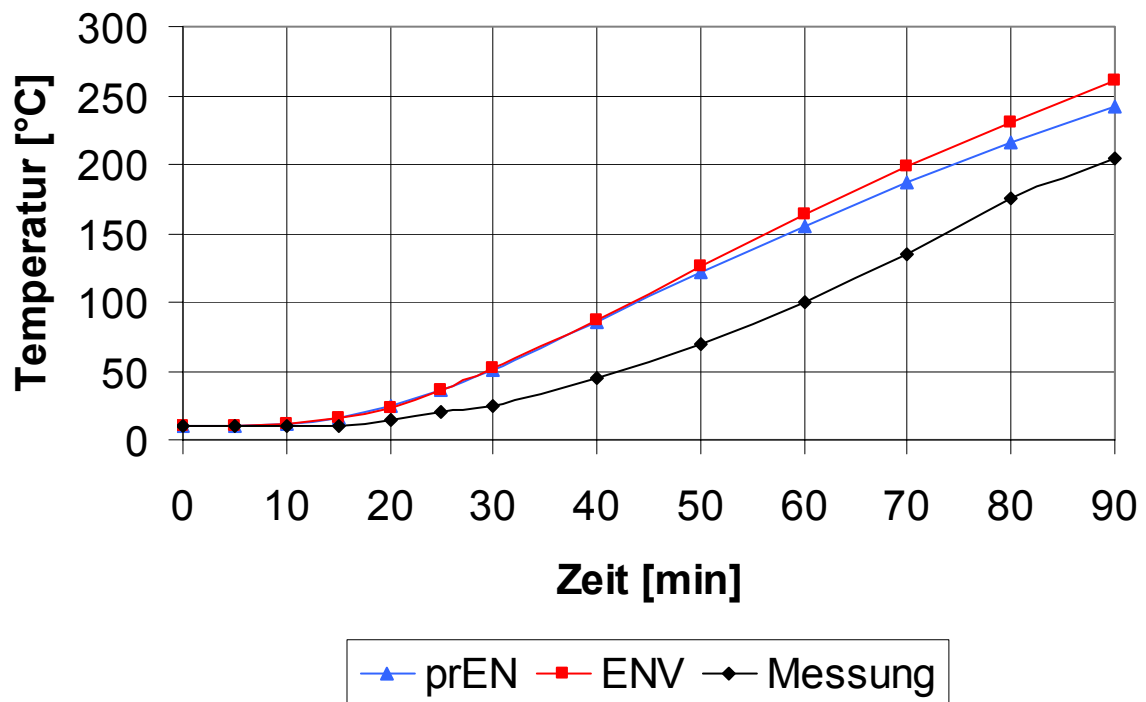
Zuschlag: quarzhaltig

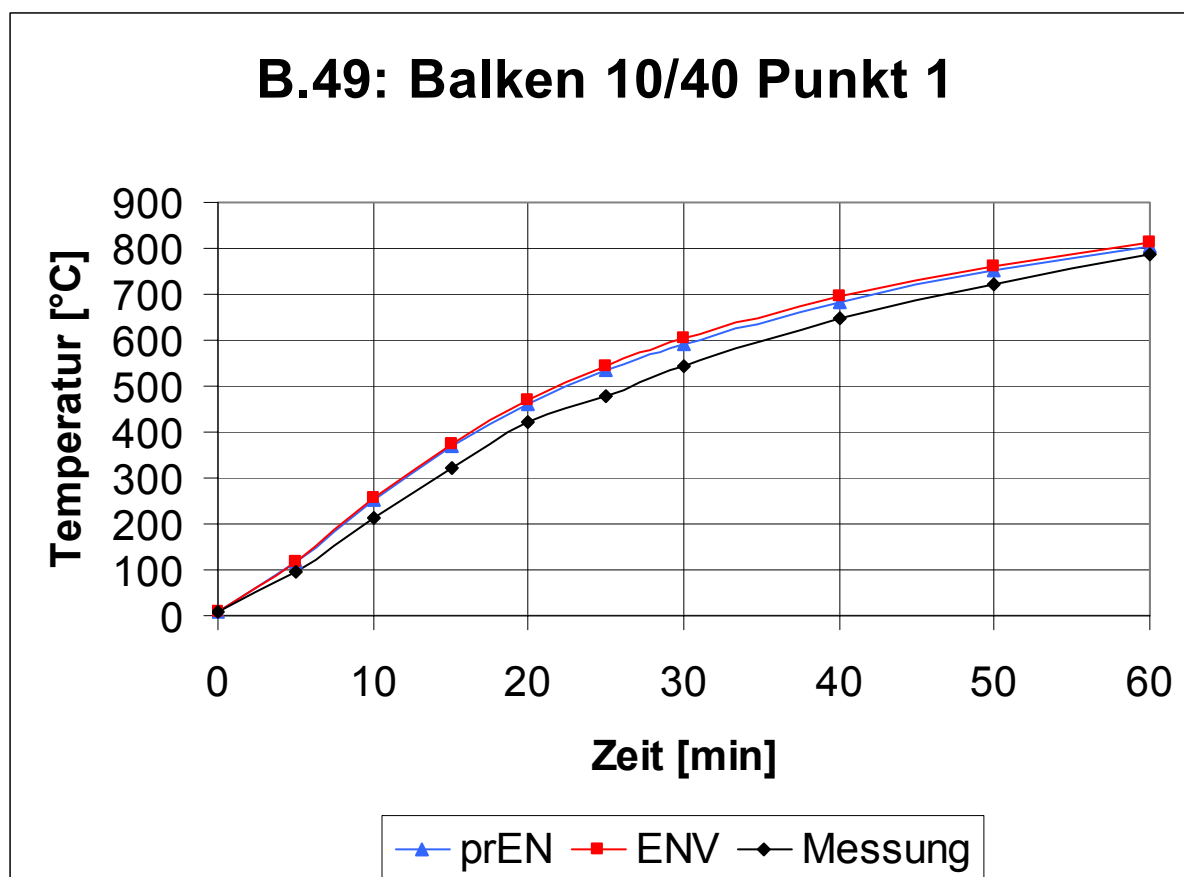
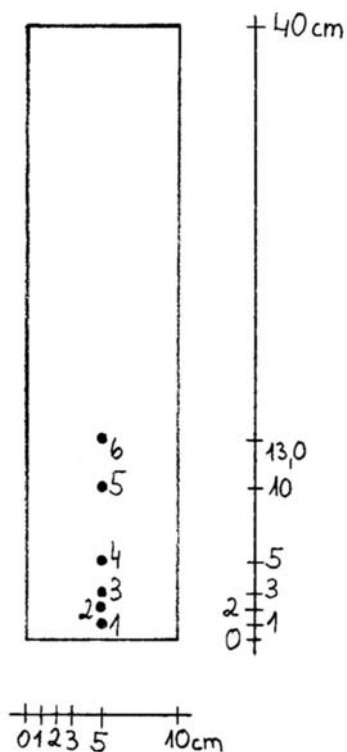
prEN: λ_1 (obere Grenzfunktion)

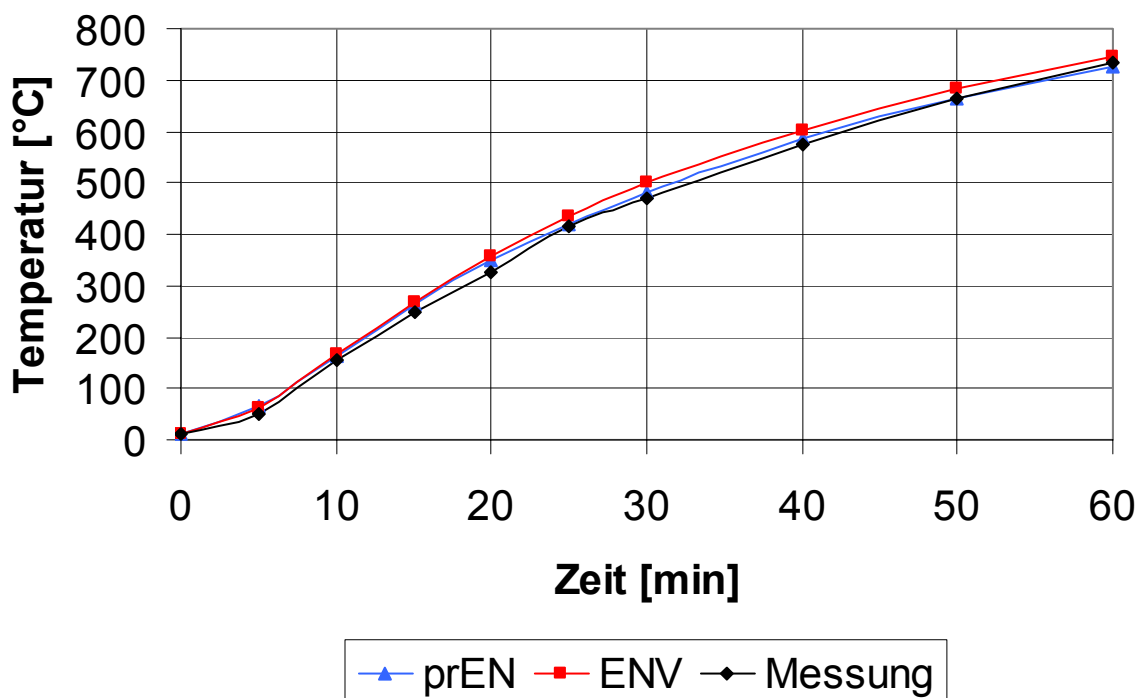
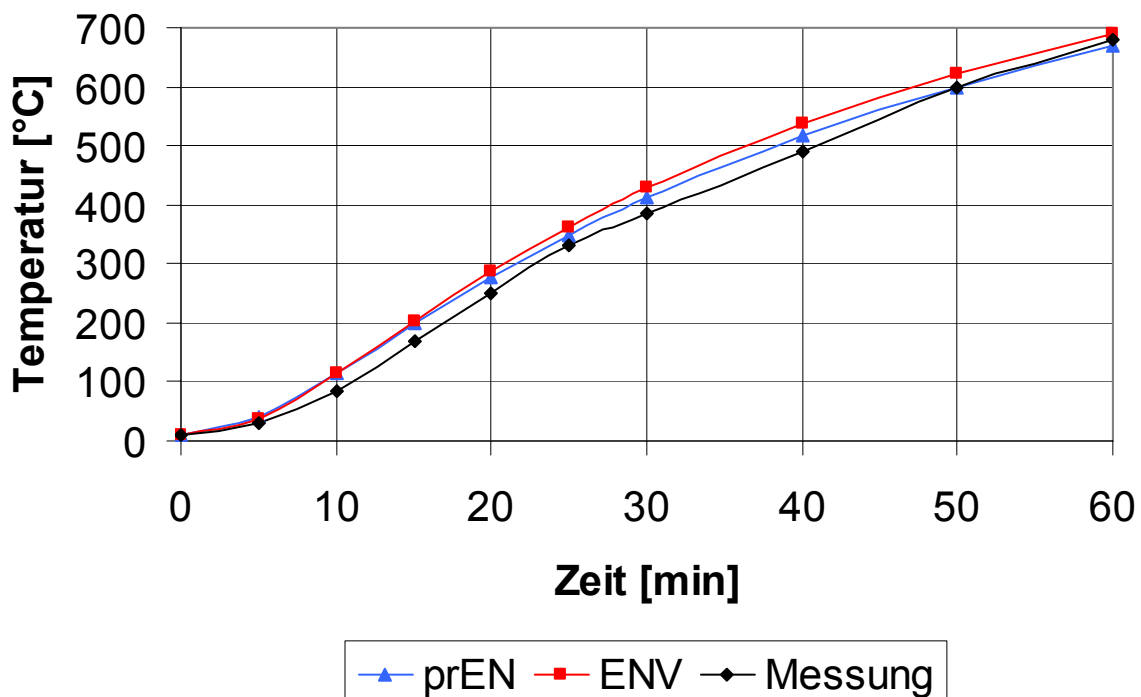
B.43 – B.48: Balken 20/40

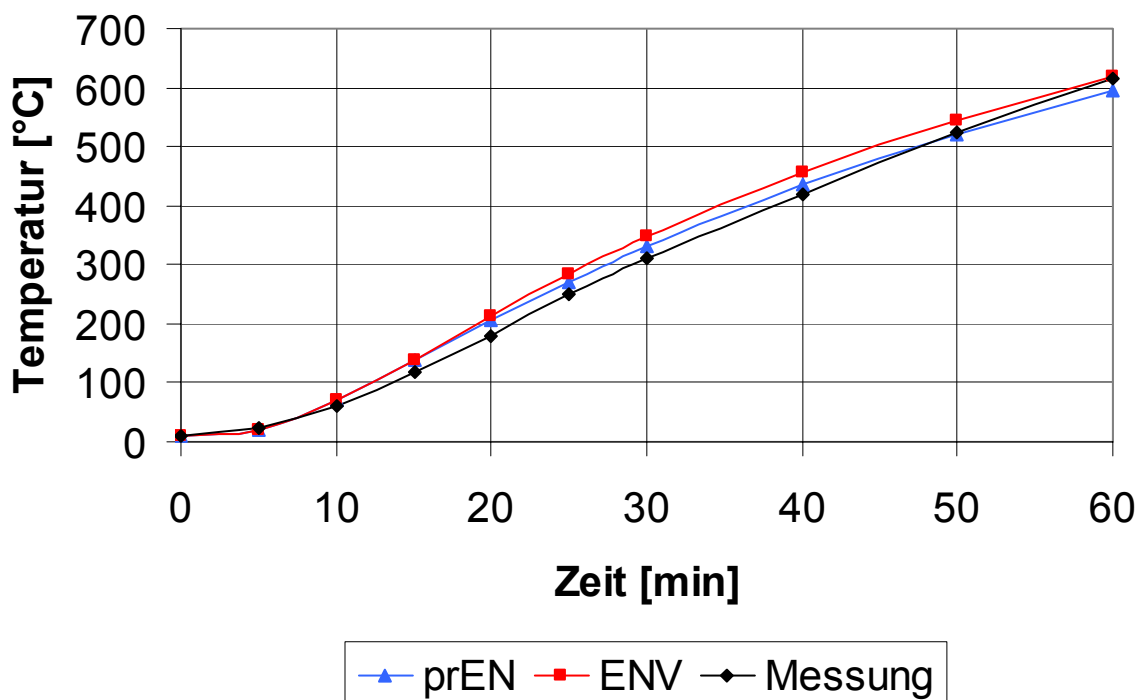
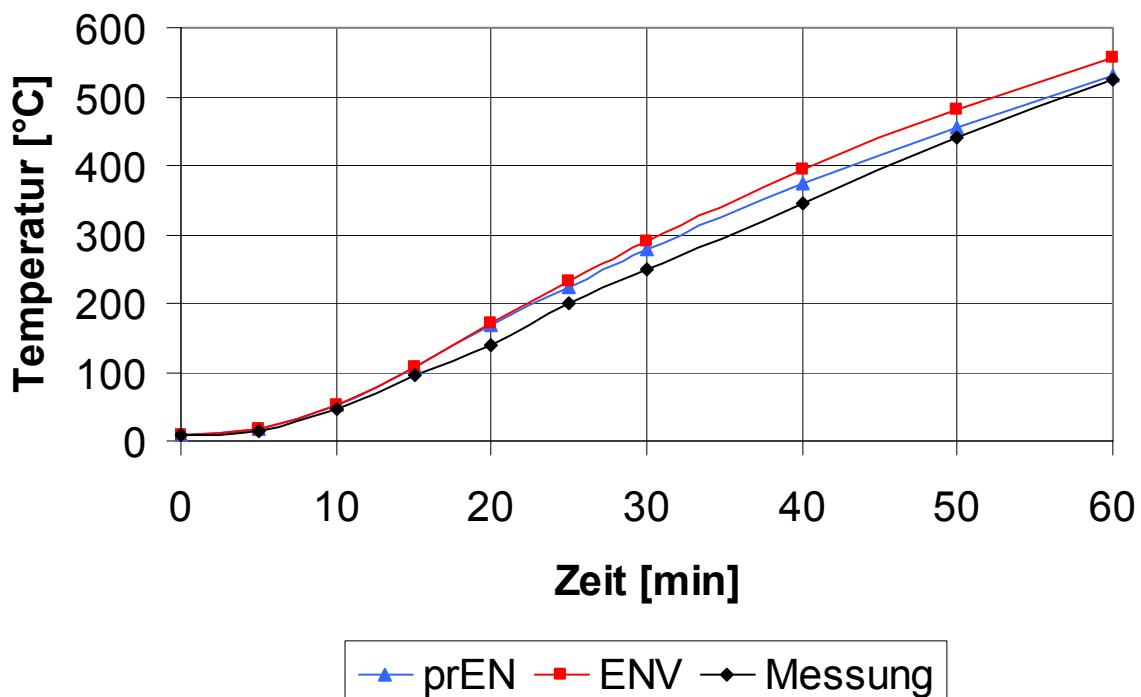
B.44: Balken 20/40 Punkt 2**B.45: Balken 20/40 Punkt 3**

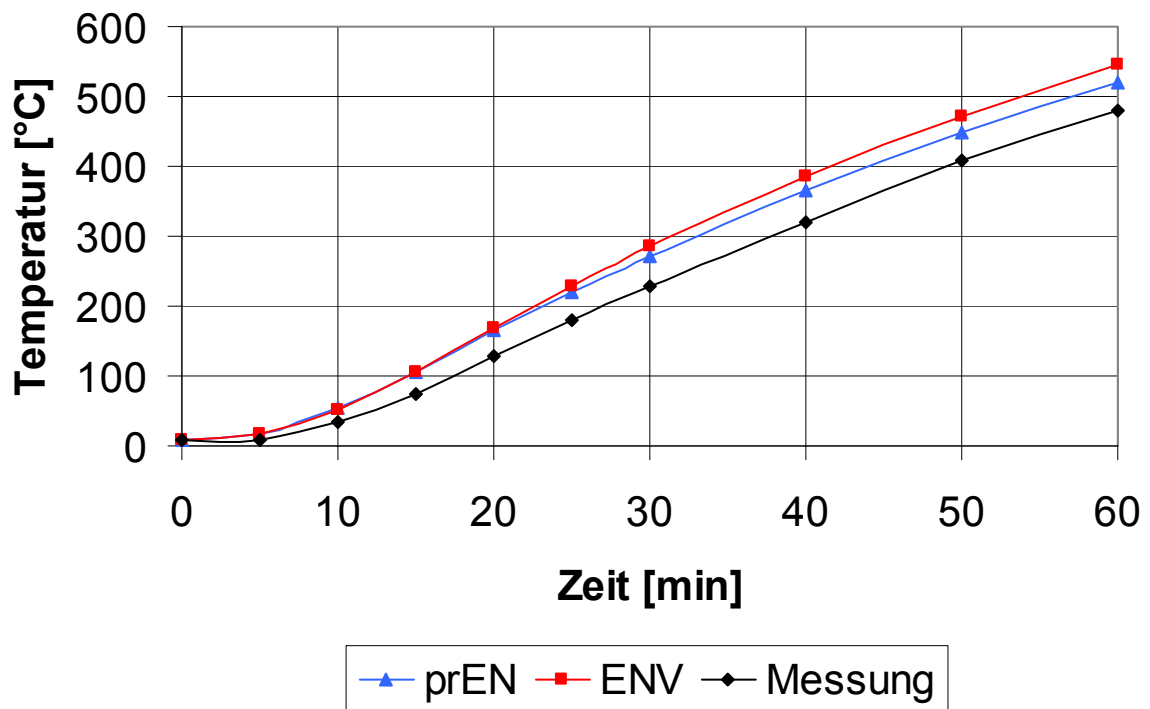
B.46: Balken 20/40 Punkt 4**B.47: Balken 20/40 Punkt 5**

B.48: Balken 20/40 Punkt 6

B.49 – B.54: Balken 10/40

B.50: Balken 10/40 Punkt 2**B.51: Balken 10/40 Punkt 3**

B.52: Balken 10/40 Punkt 4**B.53: Balken 10/40 Punkt 5**

B.54: Balken 10/40 Punkt 6

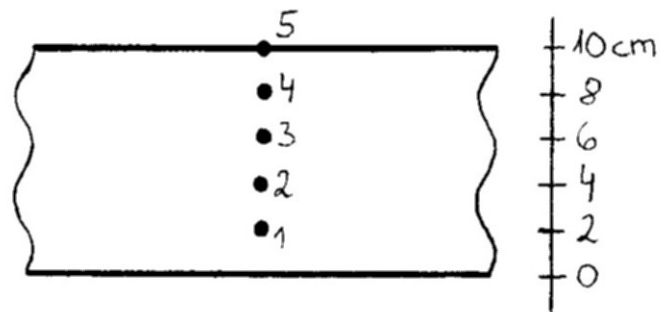
ANHANG B-3

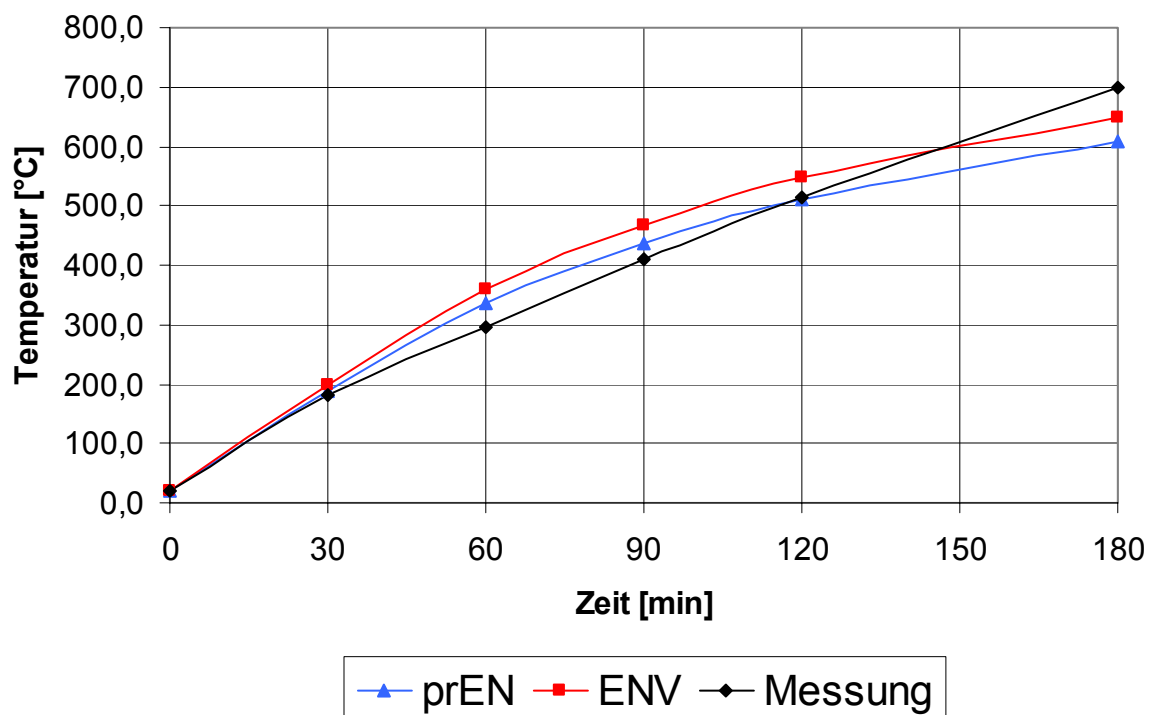
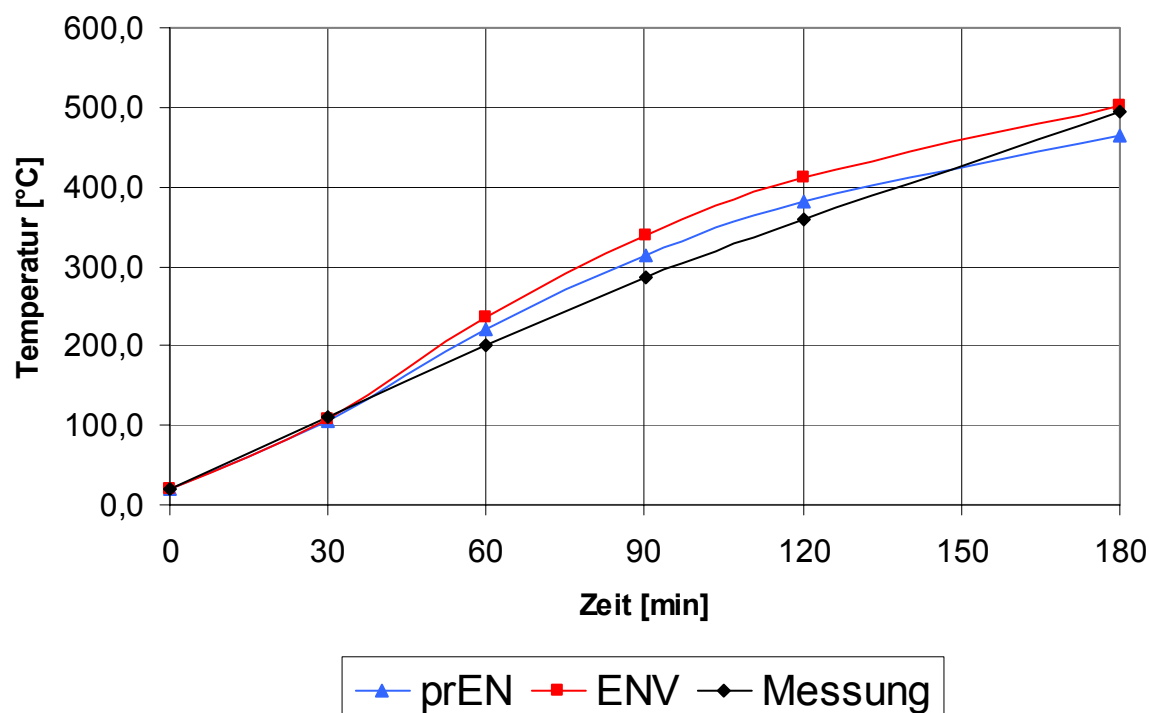
Berechnete Temperaturen

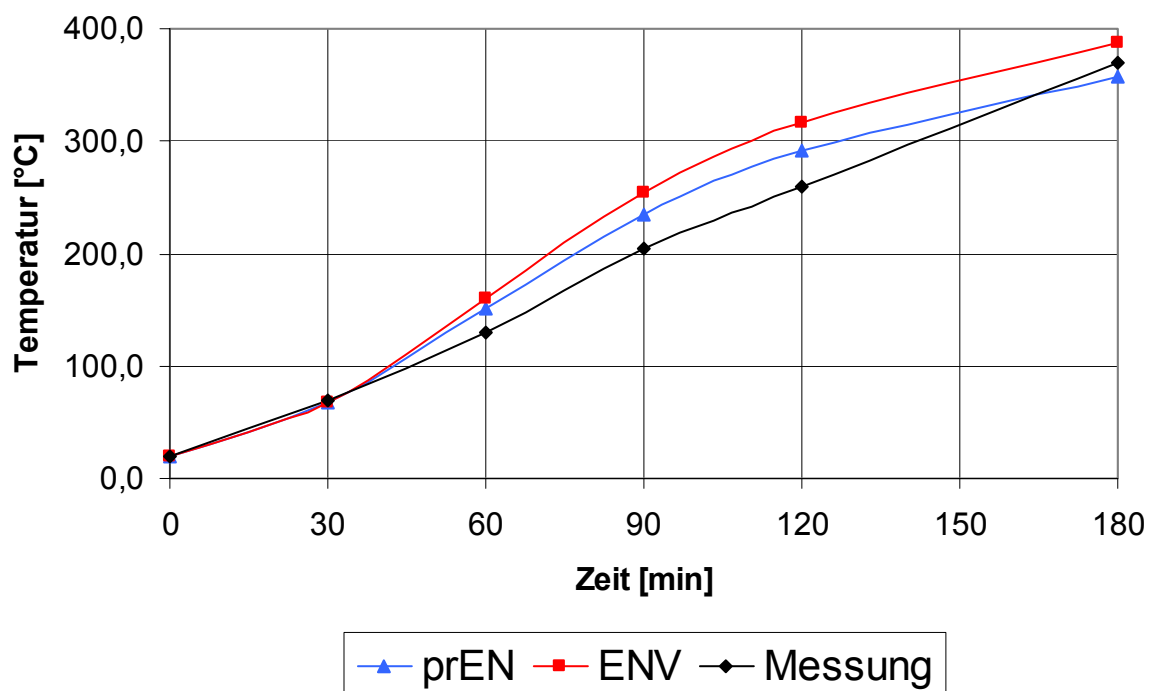
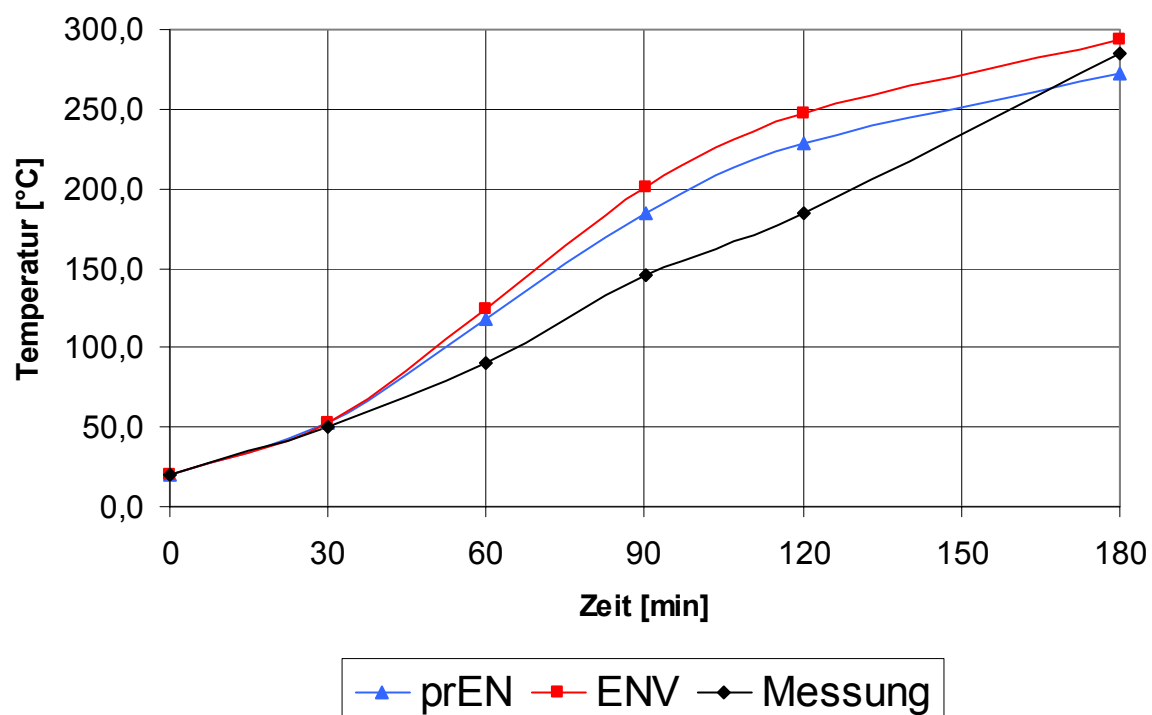
Feuchtigkeit: 1,5 Gew.-%

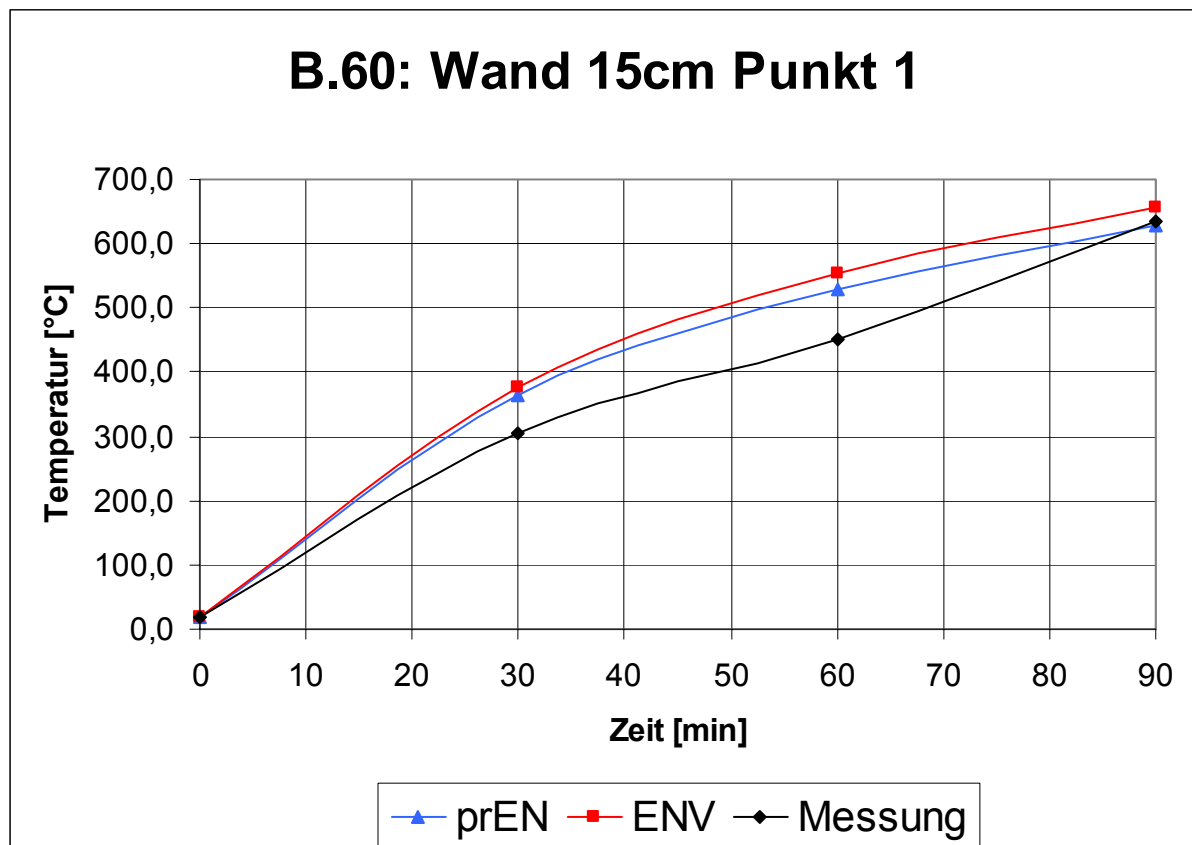
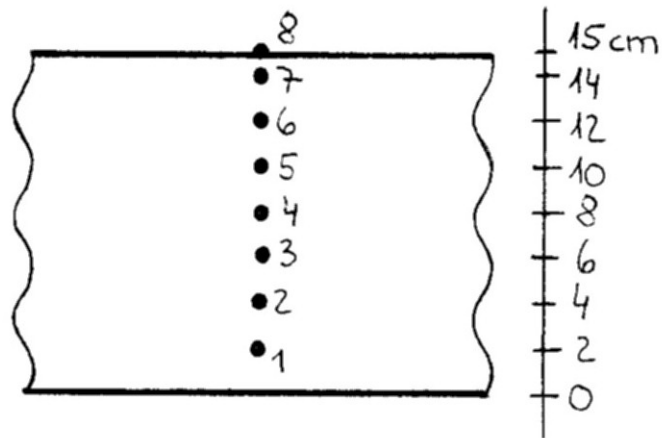
Zuschlag: quarzhaltig

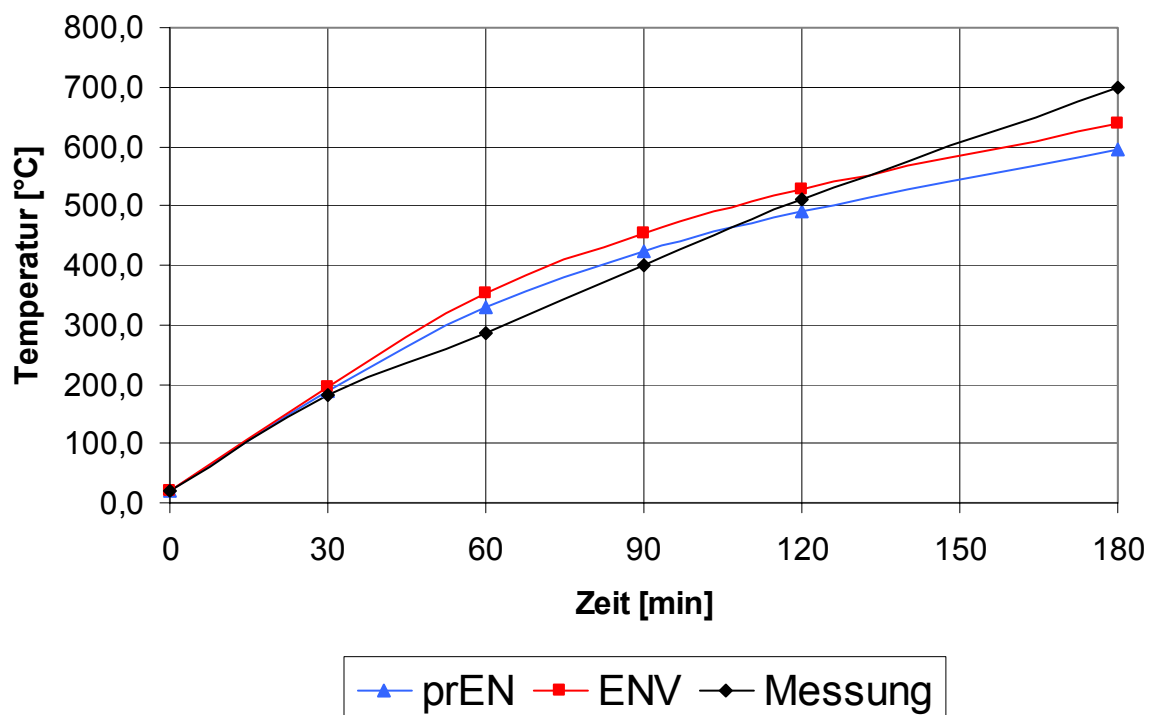
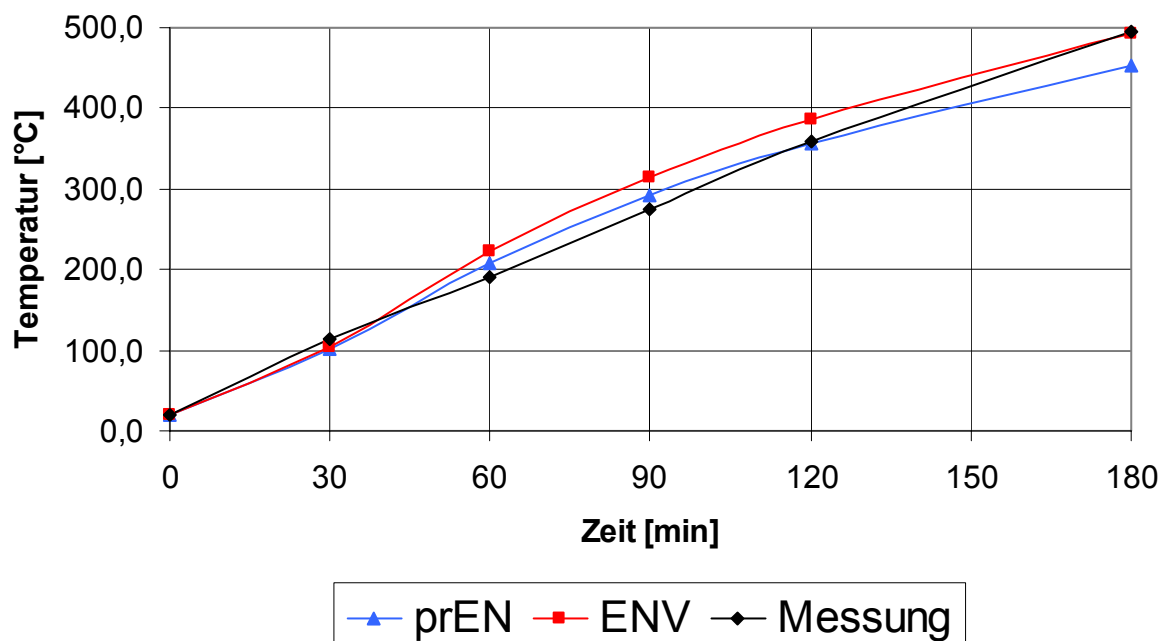
prEN: λ_1 (obere Grenzfunktion)

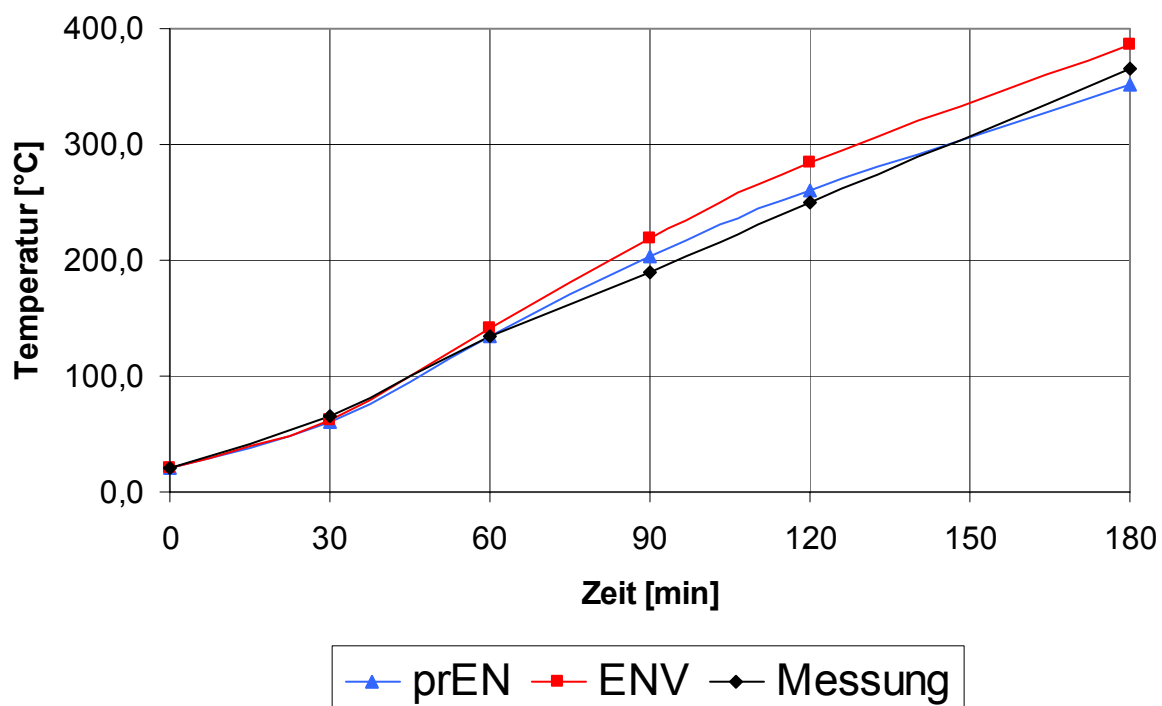
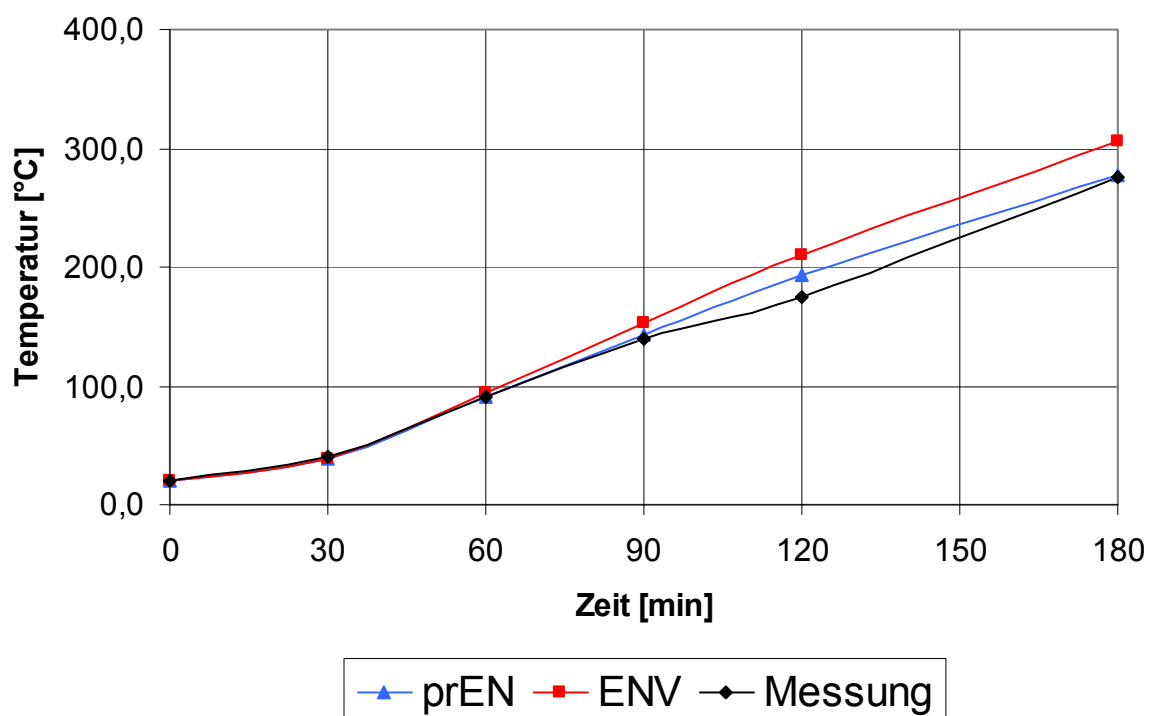
B.55 – B.59: Wand 10cm

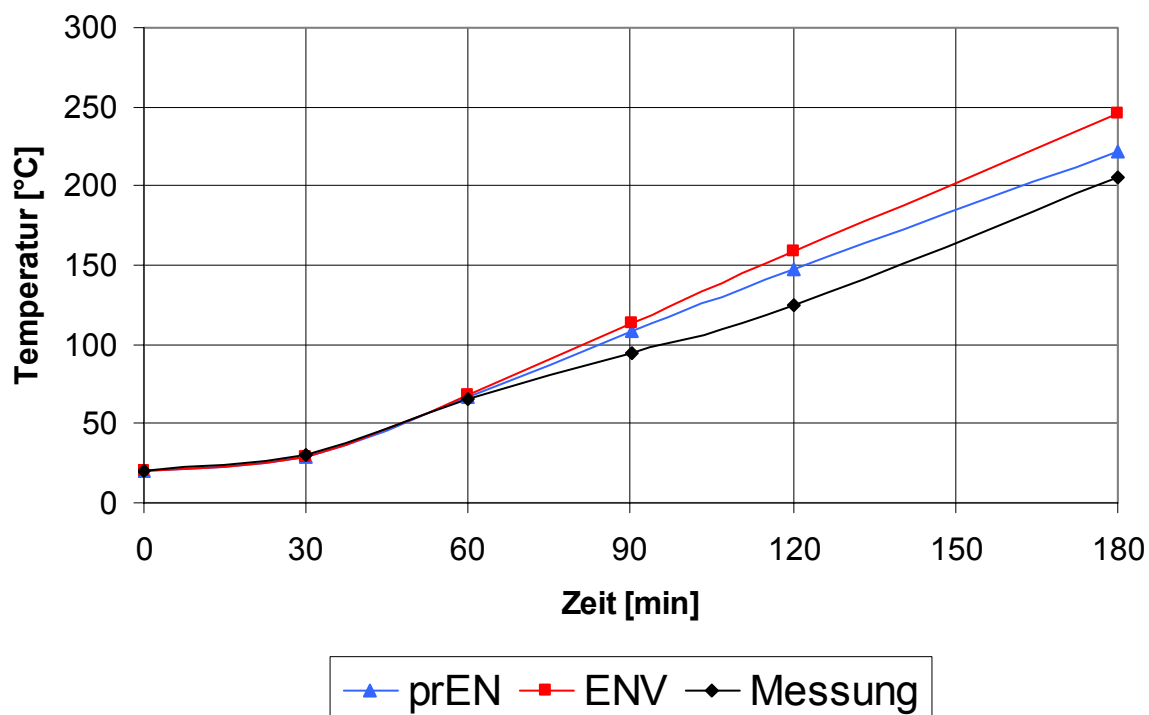
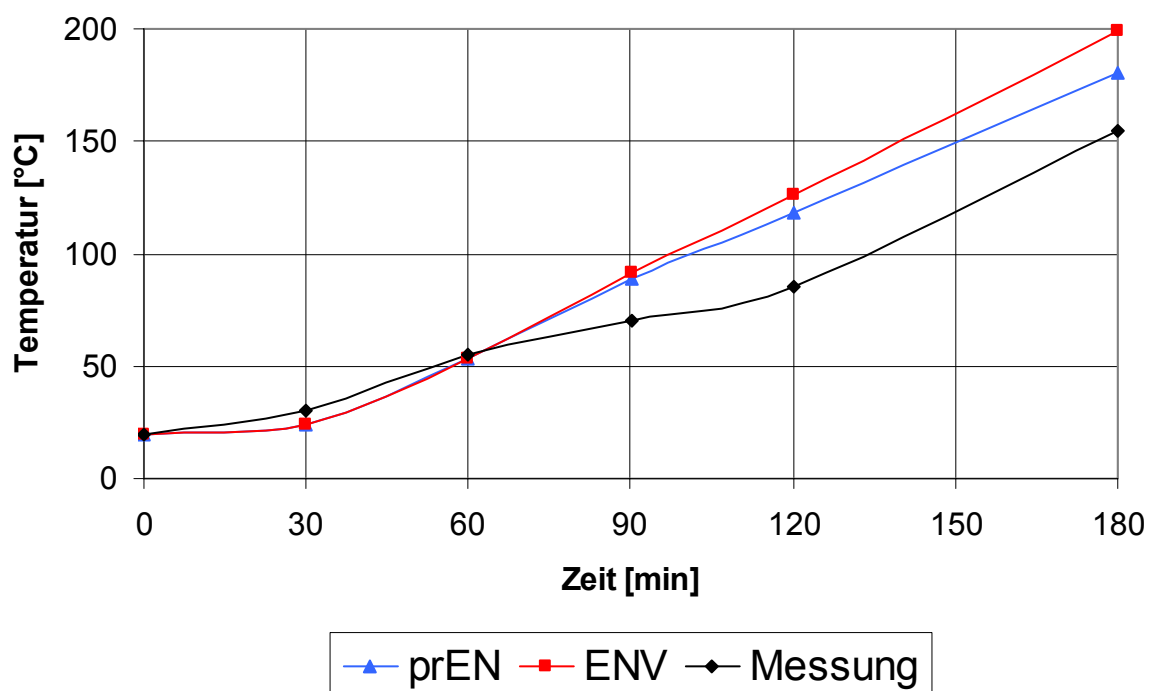
B.56: Wand 10cm Punkt 2**B.57: Wand 10cm Punkt 3**

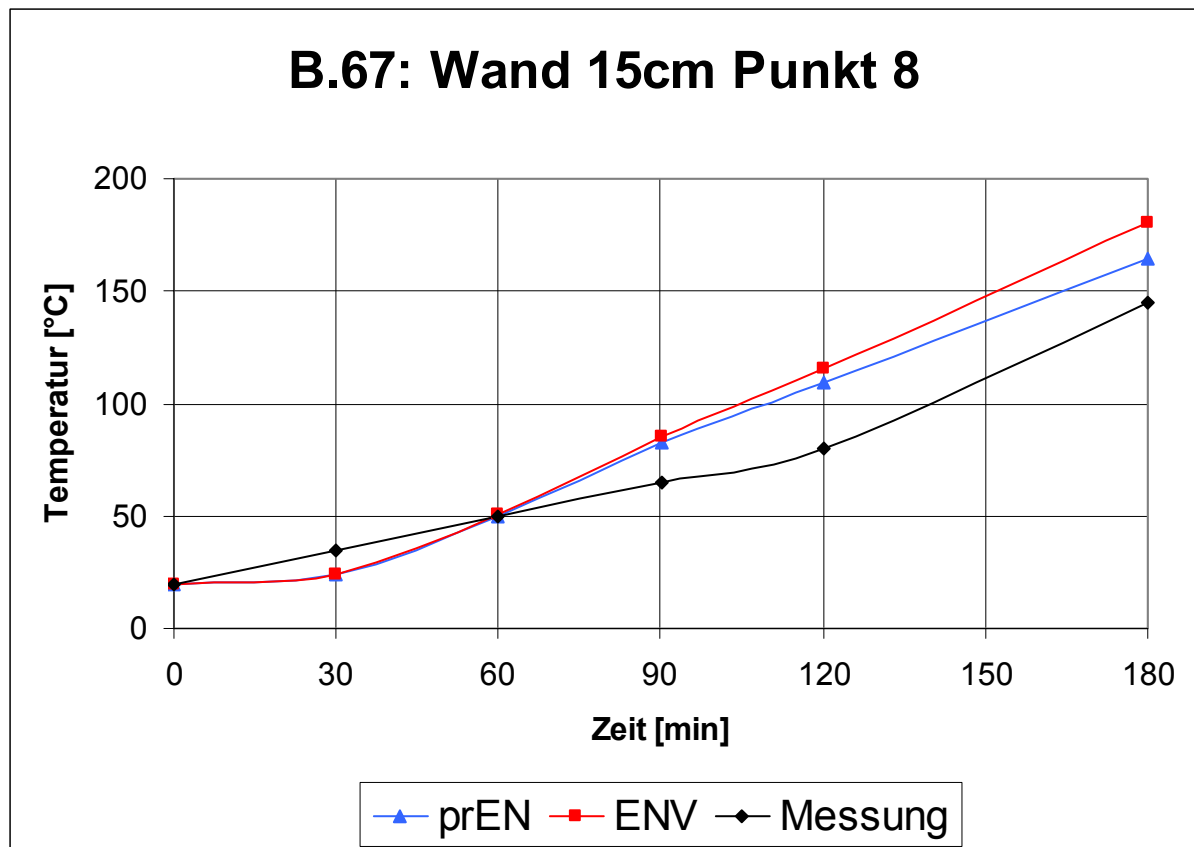
B.58: Wand 10cm Punkt 4**B.59: Wand 10cm Punkt 5**

B.60 – B.67: Wand 15cm

B.61: Wand 15cm Punkt 2**B.62: Wand 15cm Punkt 3**

B.63: Wand 15cm Punkt 4**B.64: Wand 15cm Punkt 5**

B.65: Wand 15cm Punkt 6**B.66: Wand 15cm Punkt 7**



ANHANG C

Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen

Anhang C-1: Feuchtigkeit 3,0 Gew.-%

- C.1 – C.4 Temperaturen in der Durchlaufplatte
- C.5 – C.18 Temperaturen im Balken 20/40
- C.19 – C.30 Temperaturen im Balken 10/40
- C.31 – C.39 Temperaturen in der Stütze 30/30
- C.40 – C.42 Temperaturen in der Stütze 20/20

Anhang C-2: Feuchtigkeit 0,0 Gew.-%

- C.43 – C.48 Temperaturen im Balken 20/40
- C.49 – C.54 Temperaturen im Balken 10/40

Anhang C-3: Feuchtigkeit 1,5 Gew.-%

- C.55 – C.59 Temperaturen in der 10cm dicken Wand
 - C.60 – C.67 Temperaturen in der 15cm dicken Wand
-

ANHANG C-1

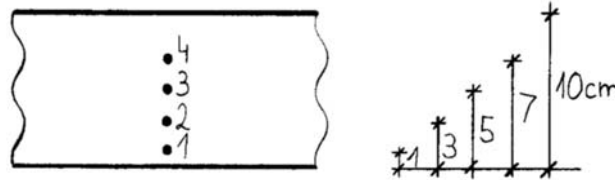
Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen

Feuchtigkeit: 3,0 Gew.-%

Zuschlag: quarzhaltig

prEN: λ_1 (obere Grenzfunktion)

C.1 – C.4: Temperaturen in der Durchlaufplatte



C.1: Temperaturen in der Durchlaufplatte am Punkt 1

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	220	212,5	211,0	9,0	4,3	1,5	0,7
20	360	399,6	392,4	-32,4	-8,3	7,2	1,8
30	460	514,1	502,3	-42,3	-8,4	11,8	2,3
40	545	591,5	576,7	-31,7	-5,5	14,8	2,6
50	605	649,3	632,4	-27,4	-4,3	16,9	2,7
60	665	695,3	677,2	-12,2	-1,8	18,1	2,7
70	700	733,2	714,2	-14,2	-2,0	19,0	2,7
80	745	765,9	746,3	-1,3	-0,2	19,6	2,6
90	770	794,3	774,4	-4,4	-0,6	19,9	2,6
Mittelwert:				17,5	3,5	12,9	2,1

C.2: Temperaturen in der Durchlaufplatte am Punkt 2

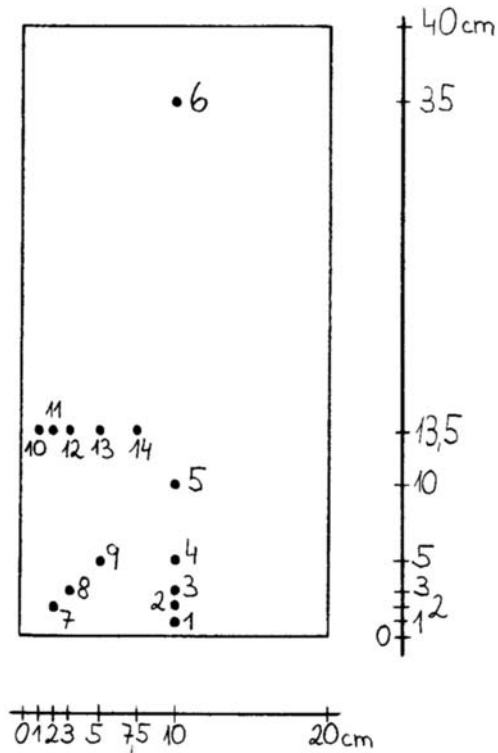
Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	110	78,3	78,6	31,4	39,9	-0,3	-0,4
20	170	167,3	162,2	7,8	4,8	5,1	3,1
30	245	258,4	246,3	-1,3	-0,5	12,1	4,9
40	305	328,9	311,6	-6,6	-2,1	17,3	5,6
50	370	386,0	364,5	5,5	1,5	21,5	5,9
60	420	433,9	408,9	11,1	2,7	25,0	6,1
70	460	474,9	447,1	12,9	2,9	27,8	6,2
80	495	511,2	480,8	14,2	3,0	30,4	6,3
90	530	544,0	511,3	18,7	3,7	32,7	6,4
Mittelwert:				11,0	6,1	17,2	4,5

C.3: Temperaturen in der Durchlaufplatte am Punkt 3

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	60	37,6	37,9	22,1	58,3	-0,3	-0,8
20	110	80,8	80,0	30,0	37,5	0,8	1,0
30	125	127,7	123,7	1,3	1,1	4,0	3,2
40	160	180,2	170,6	-10,6	-6,2	9,6	5,6
50	205	229,7	215,4	-10,4	-4,8	14,3	6,6
60	245	273,1	255,1	-10,1	-4,0	18,0	7,1
70	280	311,7	289,8	-9,8	-3,4	21,9	7,6
80	310	347,0	321,5	-11,5	-3,6	25,5	7,9
90	350	379,9	351,1	-1,1	-0,3	28,8	8,2
Mittelwert:				10,7	11,9	12,3	4,8

C.4: Temperaturen in der Durchlaufplatte am Punkt 4

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	45	24,7	24,9	20,1	80,7	-0,2	-0,8
20	100	45,8	45,9	54,1	117,9	-0,1	-0,2
30	120	75,7	75,0	45,0	60,0	0,7	0,9
40	120	106,2	103,4	16,6	16,1	2,8	2,7
50	130	138,0	131,8	-1,8	-1,4	6,2	4,7
60	150	172,4	161,8	-11,8	-7,3	10,6	6,6
70	175	206,6	191,7	-16,7	-8,7	14,9	7,8
80	205	240,4	221,0	-16,0	-7,2	19,4	8,8
90	235	272,9	249,5	-14,5	-5,8	23,4	9,4
Mittelwert:				19,7	30,5	7,8	4,2

C.5 – C.18: Temperaturen im Balken 20/40

C.5: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 1

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	90	100,6	94,1	-4,1	-4,4	6,5	6,9
10	195	204,6	197,9	-2,9	-1,5	6,7	3,4
15	285	309,3	301,8	-16,8	-5,6	7,5	2,5
20	350	391,3	382,5	-32,5	-8,5	8,8	2,3
25	400	456,9	446,5	-46,5	-10,4	10,4	2,3
30	460	510,2	497,9	-37,9	-7,6	12,3	2,5
40	560	594,2	579,1	-19,1	-3,3	15,1	2,6
50	630	658,9	642,0	-12,0	-1,9	16,9	2,6
60	680	711,4	693,7	-13,7	-2,0	17,7	2,6
70	730	755,4	737,3	-7,3	-1,0	18,1	2,5
80	770	793,2	775,5	-5,5	-0,7	17,7	2,3
90	810	825,9	808,5	1,5	0,2	17,4	2,2
Mittelwert:				15,4	3,6	11,9	2,7

C.6: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 2

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	30	54,0	51,7	-21,7	-42,0	2,3	4,4
10	100	116,4	112,2	-12,2	-10,9	4,2	3,7
15	165	185,7	178,8	-13,8	-7,7	6,9	3,9
20	220	255,0	245,0	-25,0	-10,2	10,0	4,1
25	270	314,4	302,1	-32,1	-10,6	12,3	4,1
30	315	365,8	350,4	-35,4	-10,1	15,4	4,4
40	400	451,3	431,2	-31,2	-7,2	20,1	4,7
50	475	521,2	497,5	-22,5	-4,5	23,7	4,8
60	525	580,2	554,1	-29,1	-5,3	26,1	4,7
70	595	630,9	603,3	-8,3	-1,4	27,6	4,6
80	635	675,2	646,9	-11,9	-1,8	28,3	4,4
90	675	714,3	685,9	-10,9	-1,6	28,4	4,1
Mittelwert:				19,5	8,7	15,8	4,0

C.7: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 3

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	15	30,4	29,7	-14,7	-49,5	0,7	2,4
10	50	71,4	69,4	-19,4	-28,0	2,0	2,9
15	95	116,1	112,1	-17,1	-15,3	4,0	3,6
20	140	164,3	157,3	-17,3	-11,0	7,0	4,5
25	180	214,6	204,8	-24,8	-12,1	9,8	4,8
30	220	262,4	249,3	-29,3	-11,8	13,1	5,3
40	300	345,3	326,3	-26,3	-8,1	19,0	5,8
50	370	416,6	392,5	-22,5	-5,7	24,1	6,1
60	430	478,4	450,6	-20,6	-4,6	27,8	6,2
70	495	532,7	502,3	-7,3	-1,5	30,4	6,1
80	535	580,7	548,6	-13,6	-2,5	32,1	5,9
90	590	623,7	590,5	-0,5	-0,1	33,2	5,6
Mittelwert:				16,4	11,6	15,6	4,6

C.8: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 4

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10	13,9	13,8	-3,8	-27,5	0,1	0,7
10	20	29,3	29,0	-9,0	-31,0	0,3	1,0
15	30	53,2	52,3	-22,3	-42,6	0,9	1,7
20	50	80,3	78,5	-28,5	-36,3	1,8	2,3
25	70	106,5	103,4	-33,4	-32,3	3,1	3,0
30	95	134,7	129,4	-34,4	-26,6	5,3	4,1
40	150	203,1	190,5	-40,5	-21,3	12,6	6,6
50	210	272,8	253,6	-43,6	-17,2	19,2	7,6
60	265	336,2	311,7	-46,7	-15,0	24,5	7,9
70	320	393,3	364,5	-44,5	-12,2	28,8	7,9
80	365	444,7	412,6	-47,6	-11,5	32,1	7,8
90	420	491,3	456,7	-36,7	-8,0	34,6	7,6
Mittelwert:				30,1	21,7	12,6	4,5

C.9: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 5

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10	10,1	10,1	-0,1	-1,0	0,0	0,0
10	10	11,6	11,6	-1,6	-13,8	0,0	0,0
15	15	17,1	17,0	-2,0	-11,8	0,1	0,6
20	20	27,4	27,2	-7,2	-26,5	0,2	0,7
25	25	41,8	41,4	-16,4	-39,6	0,4	1,0
30	30	58,5	58,0	-28,0	-48,3	0,5	0,9
40	60	92,3	91,1	-31,1	-34,1	1,2	1,3
50	95	118,1	114,1	-19,1	-16,7	4,0	3,5
60	135	163,2	150,3	-15,3	-10,2	12,9	8,6
70	170	223,3	201,8	-31,8	-15,8	21,5	10,7
80	215	277,8	252,4	-37,4	-14,8	25,4	10,1
90	255	326,4	297,3	-42,3	-14,2	29,1	9,8
Mittelwert:				17,9	19,0	7,3	3,6

C.10: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 6

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10	10,1	10,1	-0,1	-1,0	0,0	0,0
10	10	11,1	11,1	-1,1	-9,9	0,0	0,0
15	10	14,8	14,7	-4,7	-32,0	0,1	0,7
20	10	22,0	21,7	-11,7	-53,9	0,3	1,4
25	15	32,2	31,8	-16,8	-52,8	0,4	1,3
30	20	44,7	44,0	-24,0	-54,5	0,7	1,6
40	40	72,8	71,5	-31,5	-44,1	1,3	1,8
50	60	98,6	96,9	-36,9	-38,1	1,7	1,8
60	85	115,3	111,8	-26,8	-24,0	3,5	3,1
70	120	141,0	132,7	-12,7	-9,6	8,3	6,3
80	160	174,8	159,8	0,2	0,1	15,0	9,4
90	200	214,0	192,5	7,5	3,9	21,5	11,2
Mittelwert:				13,4	24,9	4,1	3,0

C.11: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 7

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	60	85,3	86,3	-26,3	-30,5	-1,0	-1,2
10	160	193,8	190,8	-30,8	-16,1	3,0	1,6
15	250	317,4	309,1	-59,1	-19,1	8,3	2,7
20	320	414,9	403,2	-83,2	-20,6	11,7	2,9
25	380	491,1	477,4	-97,4	-20,4	13,7	2,9
30	440	552,0	537,2	-97,2	-18,1	14,8	2,8
Mittelwert:				56,3	17,8	7,5	2,0

C.12: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 8

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	35	46,3	46,9	-11,9	-25,4	-0,6	-1,3
10	100	109,0	108,8	-8,8	-8,1	0,2	0,2
15	185	190,3	184,5	0,5	0,3	5,8	3,1
20	245	278,7	267,6	-22,6	-8,4	11,1	4,1
25	290	352,2	337,3	-47,3	-14,0	14,9	4,4
30	350	413,8	396,1	-46,1	-11,6	17,7	4,5
40	450	511,5	490,1	-40,1	-8,2	21,4	4,4
50	540	586,1	562,9	-22,9	-4,1	23,2	4,1
60	605	645,9	621,8	-16,8	-2,7	24,1	3,9
70	660	695,6	671,2	-11,2	-1,7	24,4	3,6
80	720	737,8	713,5	6,5	0,9	24,3	3,4
90	745	774,5	750,6	-5,6	-0,7	23,9	3,2
Mittelwert:				18,5	6,6	14,7	3,1

C.13: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 9

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10	17,3	17,4	-7,4	-42,5	-0,1	-0,6
10	20	43,7	43,9	-23,9	-54,4	-0,2	-0,5
15	40	78,9	78,3	-38,3	-48,9	0,6	0,8
20	65	114,0	111,2	-46,2	-41,5	2,8	2,5
25	100	157,7	150,6	-50,6	-33,6	7,1	4,7
30	140	208,5	196,5	-56,5	-28,8	12,0	6,1
40	210	299,0	280,5	-70,5	-25,1	18,5	6,6
50	280	373,8	350,2	-70,2	-20,0	23,6	6,7
60	345	437,6	410,0	-65,0	-15,9	27,6	6,7
70	400	493,2	462,7	-62,7	-13,6	30,5	6,6
80	460	542,5	509,9	-49,9	-9,8	32,6	6,4
90	525	586,7	552,6	-27,6	-5,0	34,1	6,2
Mittelwert:				43,8	26,1	14,6	4,2

C.14: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 10

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	115	101,9	94,0	21,0	22,3	7,9	8,4
10	195	206,7	197,5	-2,5	-1,3	9,1	4,6
15	260	310,2	300,4	-40,4	-13,5	9,7	3,2
20	315	390,3	380,1	-65,1	-17,1	10,2	2,7
25	365	453,8	442,4	-77,4	-17,5	11,3	2,6
30	410	504,5	491,8	-81,8	-16,6	12,7	2,6
40	490	582,8	567,6	-77,6	-13,7	15,2	2,7
50	560	641,9	624,8	-64,8	-10,4	17,1	2,7
60	610	689,6	671,4	-61,4	-9,1	18,2	2,7
70	655	729,4	710,5	-55,5	-7,8	19,0	2,7
80	695	764,4	745,0	-50,0	-6,7	19,5	2,6
90	735	795,5	776,0	-41,0	-5,3	19,5	2,5
Mittelwert:				49,1	10,9	13,0	3,1

C.15: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 11

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	35	54,7	51,6	-16,6	-32,2	3,1	6,0
10	100	118,0	111,7	-11,7	-10,5	6,3	5,6
15	155	186,2	177,0	-22,0	-12,4	9,1	5,2
20	200	253,1	241,9	-41,9	-17,3	11,2	4,6
25	240	309,8	296,7	-56,7	-19,1	13,1	4,4
30	280	357,4	341,6	-61,6	-18,0	15,8	4,6
40	365	434,3	414,6	-49,6	-12,0	19,7	4,7
50	420	495,3	472,4	-52,4	-11,1	22,9	4,9
60	475	546,2	520,7	-45,7	-8,8	25,6	4,9
70	530	590,2	562,8	-32,8	-5,8	27,4	4,9
80	570	629,6	600,5	-30,5	-5,1	29,1	4,8
90	610	665,7	635,3	-25,3	-4,0	30,5	4,8
Mittelwert:				34,4	12,0	16,4	4,6

C.16: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 12

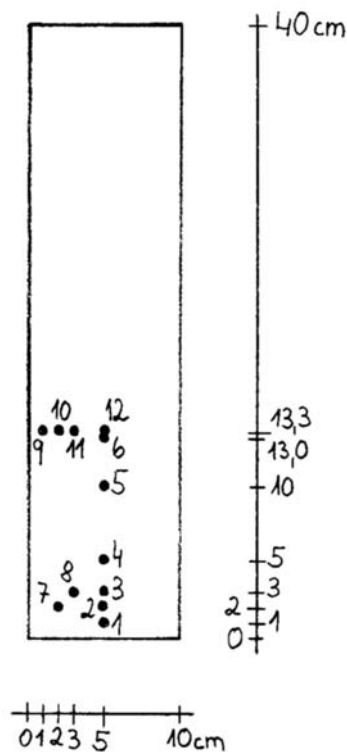
Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	20	30,6	29,6	-9,6	-32,4	1,0	3,4
10	50	72,1	68,7	-18,7	-27,2	3,4	4,9
15	90	115,7	109,9	-19,9	-18,1	5,8	5,2
20	120	161,5	154,1	-34,1	-22,1	7,5	4,9
25	155	208,9	198,7	-43,7	-22,0	10,2	5,1
30	190	252,1	238,6	-48,6	-20,4	13,5	5,6
40	255	324,1	306,0	-51,0	-16,7	18,1	5,9
50	310	383,7	361,5	-51,5	-14,3	22,2	6,1
60	355	435,0	409,4	-54,4	-13,3	25,6	6,3
70	400	480,6	451,8	-51,8	-11,5	28,7	6,4
80	450	522,5	491,0	-41,0	-8,4	31,4	6,4
90	505	561,6	527,9	-22,9	-4,3	33,7	6,4
Mittelwert:				34,4	16,2	15,5	5,1

C.17: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 13

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10	13,9	13,8	-3,8	-27,5	0,1	0,7
10	20	29,0	28,1	-8,1	-28,8	0,9	3,2
15	30	50,9	49,1	-19,1	-38,9	1,8	3,7
20	45	75,0	72,7	-27,7	-38,1	2,3	3,2
25	65	98,7	95,7	-30,7	-32,1	3,0	3,1
	85	123,8	118,9	-33,9	-28,5	4,9	4,1
40	135	177,8	167,1	-32,1	-19,2	10,8	6,4
50	185	231,0	215,4	-30,4	-14,1	15,6	7,2
	230	279,6	260,0	-30,0	-11,5	19,6	7,6
70	270	325,7	301,5	-31,5	-10,4	24,2	8,0
80	310	370,7	342,1	-32,1	-9,4	28,6	8,4
90	350	413,8	381,5	-31,5	-8,3	32,3	
Mittelwert:				23,9	20,5	11,1	4,9

C.18: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 14

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10	10,3	10,4	-0,4	-3,6	0,0	-0,5
10	10	13,6	13,5	-3,5	-26,1	0,0	0,1
15	20	21,4	21,1	-1,1	-5,1	0,4	1,7
20	25	33,4	32,7	-7,7	-23,6	0,6	1,9
25	30	48,3	47,4	-17,4	-36,7	0,9	1,9
30	40	65,0	63,7	-23,7	-37,2	1,3	2,0
40	65	98,0	95,3	-30,3	-31,8	2,6	2,7
50	105	128,7	123,2	-18,2	-14,8	5,5	4,4
60	140	166,9	155,6	-15,6	-10,0	11,3	7,2
70	175	214,1	195,4	-20,4	-10,4	18,7	9,6
80	210	264,8	240,3	-30,3	-12,6	24,4	10,2
90	250	311,8	283,6	-33,6	-11,9	28,2	9,9
Mittelwert:				15,6	17,2	7,2	4,0

C.19 – C.30: Temperaturen im Balken 10/40

C.19: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 1

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	80	97,2	98,2	-18,2	-18,5	-1,0	-1,0
10	210	217,0	215,0	-5,0	-2,3	2,0	0,9
15	320	341,6	334,7	-14,7	-4,4	6,9	2,1
20	415	441,7	432,0	-17,0	-3,9	9,7	2,2
25	485	521,6	509,9	-24,9	-4,9	11,7	2,3
30	550	586,2	573,5	-23,5	-4,1	12,7	2,2
40	650	684,0	671,0	-21,0	-3,1	13,0	1,9
50	720	755,0	742,7	-22,7	-3,1	12,3	1,7
60	780	809,4	798,4	-18,4	-2,3	11,0	1,4
Mittelwert:				16,5	4,7	8,0	1,6

C.20: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 2

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	45	56,3	57,1	-12,1	-21,2	-0,8	-1,4
10	140	132,8	128,8	11,2	8,7	4,0	3,1
15	240	225,0	217,7	22,3	10,2	7,3	3,4
20	330	321,9	309,8	20,2	6,5	12,1	3,9
25	405	404,7	388,7	16,3	4,2	16,0	4,1
30	465	474,7	456,3	8,7	1,9	18,4	4,0
40	580	585,6	565,2	14,8	2,6	20,4	3,6
50	660	669,3	649,1	10,9	1,7	20,2	3,1
60	730	735,0	715,8	14,2	2,0	19,2	2,7
Mittelwert:				13,1	5,9	11,8	2,9

C.21: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 3

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	30	35,5	36,0	-6,0	-16,7	-0,5	-1,4
10	80	92,8	90,2	-10,2	-11,3	2,6	2,9
15	165	153,7	149,1	15,9	10,7	4,6	3,1
20	250	241,9	230,6	19,4	8,4	11,3	4,9
25	320	325,6	309,7	10,3	3,3	15,9	5,1
30	390	398,0	378,4	11,6	3,1	19,6	5,2
40	495	515,2	491,9	3,1	0,6	23,3	4,7
50	600	605,9	581,7	18,3	3,1	24,2	4,2
60	675	678,3	654,7	20,3	3,1	23,6	3,6
Mittelwert:				11,5	6,0	12,6	3,5

C.22: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 4

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	25	20,8	21,0	4,0	19,0	-0,2	-1,0
10	55	59,0	59,6	-4,6	-7,7	-0,6	-1,0
15	115	102,8	102,2	12,8	12,5	0,6	0,6
20	180	151,4	145,4	34,6	23,8	6,0	4,1
25	245	232,7	218,8	26,2	12,0	13,9	6,4
30	310	307,6	289,5	20,5	7,1	18,1	6,3
40	420	429,2	404,9	15,1	3,7	24,3	6,0
50	520	525,6	498,6	21,4	4,3	27,0	5,4
60	610	604,2	576,7	33,3	5,8	27,5	4,8
Mittelwert:				17,3	9,6	11,8	3,6

C.23: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 5

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	15	17,6	17,6	-2,6	-14,8	0,0	0,0
10	45	47,4	46,5	-1,5	-3,2	0,9	1,9
15	90	88,5	87,5	2,5	2,9	1,0	1,1
20	145	119,1	117,2	27,8	23,7	1,9	1,6
25	195	168,2	159,5	35,5	22,3	8,7	5,5
30	250	240,6	224,7	25,3	11,3	15,9	7,1
40	345	359,8	337,3	7,7	2,3	22,5	6,7
50	435	455,9	428,6	6,4	1,5	27,3	6,4
60	525	536,1	506,8	18,2	3,6	29,3	5,8
Mittelwert:				12,8	8,6	10,8	3,6

C.24: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 6

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	15	17,7	17,6	-2,6	-14,8	0,1	0,6
10	35	47,4	46,2	-11,2	-24,2	1,2	2,6
15	75	88,3	87,4	-12,4	-14,2	0,9	1,0
20	125	119,7	117,2	7,8	6,7	2,5	2,1
25	170	166,8	158,0	12,0	7,6	8,8	5,6
30	230	236,2	220,4	9,6	4,4	15,8	7,2
40	320	352,6	330,4	-10,4	-3,1	22,2	6,7
50	405	447,1	420,0	-15,0	-3,6	27,1	6,5
60	480	526,4	497,1	-17,1	-3,4	29,3	5,9
Mittelwert:				9,8	8,2	10,8	3,8

C.25: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 7

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	145	85,5	86,5	58,5	67,6	-1,0	-1,2
10	260	195,0	192,1	67,9	35,3	2,9	1,5
15	370	320,8	312,2	57,8	18,5	8,6	2,8
20	465	421,0	408,9	56,1	13,7	12,1	3,0
25	535	501,0	487,0	48,0	9,9	14,0	2,9
30	600	566,3	551,2	48,8	8,9	15,1	2,7
40	680	666,3	650,9	29,1	4,5	15,4	2,4
50	750	739,6	725,2	24,8	3,4	14,4	2,0
60	805	796,1	782,9	22,1	2,8	13,2	1,7
Mittelwert:				41,3	16,5	9,7	2,0

C.26: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 8

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	40	46,7	47,5	-7,5	-15,8	-0,8	-1,7
10	120	111,8	111,6	8,4	7,5	0,2	0,2
15	220	197,4	190,9	29,1	15,2	6,5	3,4
20	305	292,1	280,1	24,9	8,9	12,0	4,3
25	365	374,1	357,9	7,1	2,0	16,2	4,5
30	440	444,6	425,5	14,5	3,4	19,1	4,5
40	550	557,7	535,9	14,1	2,6	21,8	4,1
50	640	644,2	622,2	17,8	2,9	22,0	3,5
60	710	712,4	691,3	18,7	2,7	21,1	3,1
Mittelwert:				14,2	6,1	12,0	2,9

C.27: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 9

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	115	101,1	94,1	20,9	22,2	7,0	7,4
10	230	206,9	198,6	31,4	15,8	8,3	4,2
15	330	313,7	304,5	25,5	8,4	9,2	3,0
20	400	397,1	387,7	12,3	3,2	9,4	2,4
25	455	464,7	453,9	1,1	0,2	10,8	2,4
30	510	522,2	509,3	0,7	0,1	12,9	2,5
40	595	617,9	602,5	-7,5	-1,2	15,4	2,6
50	655	692,3	676,3	-21,3	-3,1	16,1	2,4
60	715	751,4	735,6	-20,6	-2,8	15,8	2,1
Mittelwert:				14,1	5,7	10,5	2,9

C.28: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 10

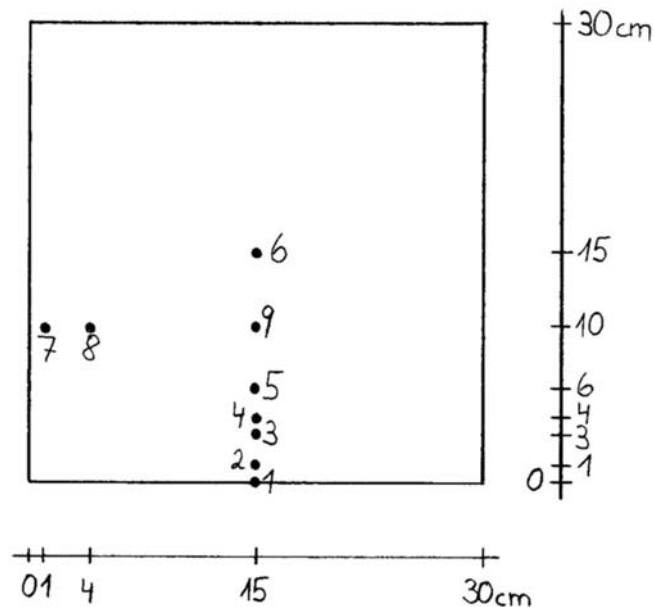
Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	40	54,5	51,9	-11,9	-22,9	2,6	5,0
10	120	119,5	113,9	6,1	5,4	5,6	4,9
15	205	192,5	184,3	20,7	11,2	8,2	4,5
20	270	264,9	254,6	15,4	6,0	10,3	4,0
25	325	328,5	315,2	9,8	3,1	13,3	4,2
30	380	388,1	371,2	8,8	2,4	16,9	4,5
40	470	493,6	471,9	-1,9	-0,4	21,7	4,6
50	550	578,9	554,9	-4,9	-0,9	24,0	4,3
60	625	648,7	624,2	0,8	0,1	24,5	3,9
Mittelwert:				8,0	5,2	12,7	4,0

C.29: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 11

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	30	31,1	30,2	-0,2	-0,7	0,9	3,0
10	75	76,5	73,5	1,5	2,0	3,0	4,1
15	135	125,2	122,7	12,3	10,0	2,5	2,0
20	195	179,7	172,6	22,4	13,0	7,1	4,1
25	245	239,2	227,2	17,8	7,9	12,0	5,3
30	295	301,4	284,8	10,2	3,6	16,6	5,8
40	390	412,8	389,9	0,1	0,0	22,9	5,9
50	470	503,6	477,2	-7,2	-1,5	26,4	5,5
60	555	579,2	551,3	3,7	0,7	27,9	5,1
Mittelwert:				7,5	3,9	11,9	4,1

C.30: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 12

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	15	17,7	17,6	-2,6	-14,8	0,1	0,6
10	35	47,4	46,2	-11,2	-24,2	1,3	2,8
15	80	88,3	87,4	-7,4	-8,4	1,0	1,1
20	130	119,7	117,2	12,8	10,9	2,5	2,2
25	180	166,8	158,0	22,0	14,0	8,8	5,6
30	230	236,1	220,3	9,7	4,4	15,8	7,2
40	325	352,3	330,2	-5,2	-1,6	22,2	6,7
50	415	446,7	419,6	-4,6	-1,1	27,1	6,4
60	490	526,0	496,6	-6,6	-1,3	29,4	5,9
Mittelwert:				8,2	8,1	10,8	3,9

C.31 – C.39: Temperaturen in der Stütze 30/30

C.31: Temperaturen in der Stütze 30/30 am Punkt 1

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	335	390,2	394,4	-59,4	-15,1	-4,2	-1,1
20	550	615,4	624,8	-74,8	-12,0	-9,4	-1,5
30	675	728,5	737,5	-62,5	-8,5	-9,0	-1,2
40	760	797,7	805,5	-45,5	-5,6	-7,8	-1,0
50	820	846,8	853,6	-33,6	-3,9	-6,8	-0,8
60	870	884,8	890,8	-20,8	-2,3	-6,0	-0,7
70	900	915,7	921,0	-21,0	-2,3	-5,3	-0,6
80	920	941,7	946,5	-26,5	-2,8	-4,8	-0,5
90	940	964,2	968,6	-28,6	-3,0	-4,4	-0,5
Mittelwert:				37,3	5,6	5,8	0,8

C.32: Temperaturen in der Stütze 30/30 am Punkt 2

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	175	212,4	211,0	-36,0	-17,1	1,4	0,7
20	320	399,6	392,5	-72,5	-18,5	7,1	1,8
30	435	514,4	502,6	-67,6	-13,5	11,8	2,3
40	520	592,4	577,6	-57,6	-10,0	14,8	2,6
50	585	651,0	634,0	-49,0	-7,7	17,0	2,7
60	635	698,1	679,8	-44,8	-6,6	18,3	2,7
70	680	737,5	718,2	-38,2	-5,3	19,3	2,7
80	715	771,7	752,0	-37,0	-4,9	19,7	2,6
90	750	801,8	782,0	-32,0	-4,1	19,8	2,5
Mittelwert:				43,5	8,8	12,9	2,1

C.33: Temperaturen in der Stütze 30/30 am Punkt 3

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	95	78,3	78,6	16,4	20,9	-0,3	-0,4
20	150	167,5	162,3	-12,3	-7,6	5,2	3,2
30	220	259,0	246,9	-26,9	-10,9	12,1	4,9
40	285	330,4	312,9	-27,9	-8,9	17,5	5,6
50	340	389,0	367,0	-27,0	-7,4	22,0	6,0
60	395	439,1	413,4	-18,4	-4,5	25,7	6,2
70	440	483,2	454,3	-14,3	-3,1	28,9	6,4
80	480	522,8	491,5	-11,5	-2,3	31,3	6,4
90	515	559,0	525,6	-10,6	-2,0	33,4	6,4
Mittelwert:				16,5	6,8	17,6	4,6

C.34: Temperaturen in der Stütze 30/30 am Punkt 4

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	60	52,4	52,8	7,2	13,6	-0,4	-0,8
20	115	112,7	110,4	4,6	4,2	2,3	2,1
30	155	181,2	173,1	-18,1	-10,5	8,1	4,7
40	200	246,0	232,0	-32,0	-13,8	14,0	6,0
50	250	301,1	282,3	-32,3	-11,4	18,8	6,7
60	300	349,7	326,9	-26,9	-8,2	22,8	7,0
70	340	393,5	366,8	-26,8	-7,3	26,7	7,3
80	375	433,5	403,7	-28,7	-7,1	29,8	7,4
90	410	470,4	437,9	-27,9	-6,4	32,5	7,4
Mittelwert:				20,5	8,3	15,5	4,9

C.35: Temperaturen in der Stütze 30/30 am Punkt 5

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	35	29,2	29,5	5,5	18,6	-0,3	-1,0
20	70	59,6	59,5	10,5	17,6	0,1	0,2
30	110	95,4	93,9	16,1	17,1	1,5	1,6
40	120	134,5	128,6	-8,6	-6,7	5,9	4,6
50	140	178,0	167,0	-27,0	-16,2	11,0	6,6
60	170	221,2	205,5	-35,5	-17,3	15,7	7,6
70	210	262,2	242,6	-32,6	-13,4	19,6	8,1
80	245	301,1	277,6	-32,6	-11,7	23,5	8,5
90	285	338,0	310,9	-25,9	-8,3	27,1	8,7
Mittelwert:				19,4	12,7	10,5	4,7

C.36: Temperaturen in der Stütze 30/30 am Punkt 6

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	30	21,2	21,3	8,7	40,8	-0,1	-0,5
30	50	27,0	27,2	22,8	83,8	-0,2	-0,7
40	75	39,2	39,5	35,5	89,9	-0,3	-0,8
50	90	56,4	56,6	33,4	59,0	-0,2	-0,4
60	105	75,9	75,5	29,5	39,1	0,4	0,5
70	115	94,1	93,1	21,9	23,5	1,0	1,1
80	120	104,4	103,0	17,0	16,5	1,4	1,4
90	125	119,8	114,8	10,2	8,9	5,0	4,4
Mittelwert:				17,9	36,2	0,9	1,0

C.37: Temperaturen in der Stütze 30/30 am Punkt 7

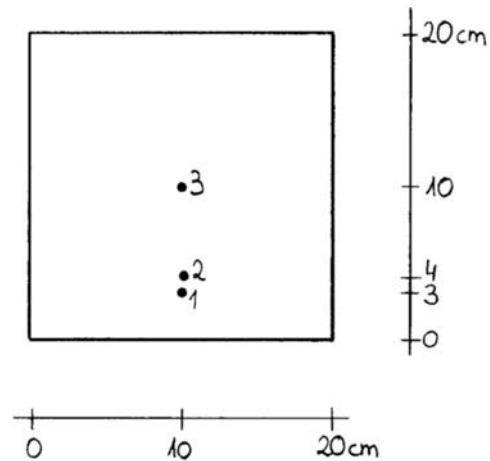
Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	160	212,6	211,1	-51,1	-24,2	1,5	0,7
20	325	401,0	393,9	-68,9	-17,5	7,1	1,8
30	445	517,7	505,9	-60,9	-12,0	11,8	2,3
40	515	598,1	583,2	-68,2	-11,7	14,9	2,6
50	575	659,1	642,1	-67,1	-10,5	17,0	2,6
60	625	708,1	690,0	-65,0	-9,4	18,1	2,6
70	670	749,0	730,2	-60,2	-8,2	18,8	2,6
Mittelwert:				55,2	11,7	11,2	1,9

C.38: Temperaturen in der Stütze 30/30 am Punkt 8

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	40	52,8	53,2	-13,2	-24,8	-0,4	-0,8
20	105	115,4	113,1	-8,1	-7,2	2,3	2,0
30	130	187,5	178,9	-48,9	-27,3	8,6	4,8
40	180	258,4	243,4	-63,4	-26,0	15,0	6,2
50	225	319,9	299,6	-74,6	-24,9	20,3	6,8
60	280	373,6	349,1	-69,1	-19,8	24,5	7,0
70	320	421,3	393,1	-73,1	-18,6	28,2	7,2
Mittelwert:				43,8	18,6	12,4	4,4

C.39: Temperaturen in der Stütze 30/30 am Punkt 9

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	20	20,5	20,6	-0,6	-2,9	-0,1	-0,5
20	25	26,2	26,4	-1,4	-5,3	-0,2	-0,8
30	55	40,0	40,1	14,9	37,2	-0,1	-0,2
40	90	59,4	59,1	30,9	52,3	0,3	0,5
50	115	81,2	80,1	34,9	43,6	1,1	1,4
60	115	101,3	99,0	16,0	16,2	2,3	2,3
70	115	122,4	117,1	-2,1	-1,8	5,3	4,5
Mittelwert:				12,6	19,9	1,2	1,3

C.40 – C.42: Temperaturen in der Stütze 20/20

C.40: Temperaturen in der Stütze 20/20 am Punkt 1

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	70	78,9	79,2	-9,2	-11,6	-0,3	-0,4
20	135	172,5	167,2	-32,2	-19,3	5,3	3,2
30	180	271,5	258,8	-78,8	-30,4	12,7	4,9
40	250	354,9	335,8	-85,8	-25,6	19,1	5,7
50	320	426,8	402,5	-82,5	-20,5	24,3	6,0
60	380	490,0	461,8	-81,8	-17,7	28,2	6,1
Mittelwert:				52,9	17,9	12,8	3,8

C.41: Temperaturen in der Stütze 20/20 am Punkt 2

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	50	53,2	53,6	-3,6	-6,7	-0,4	-0,7
20	115	118,5	116,1	-1,1	-0,9	2,4	2,1
30	145	195,3	186,1	-41,1	-22,1	9,2	4,9
40	195	274,6	258,5	-63,5	-24,6	16,1	6,2
50	260	346,5	324,3	-64,3	-19,8	22,2	6,8
60	320	411,9	384,4	-64,4	-16,8	27,5	7,2
Mittelwert:				34,0	13,0	11,1	4,0

C.42: Temperaturen in der Stütze 20/20 am Punkt 3

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	25	22,1	22,2	2,8	12,6	-0,1	-0,5
20	50	41,1	41,7	8,3	19,9	-0,6	-1,4
30	100	77,2	77,6	22,4	28,9	-0,4	-0,5
40	120	105,8	104,7	15,3	14,6	1,1	1,1
50	120	147,5	138,2	-18,2	-13,2	9,3	6,7
60	140	228,6	206,1	-66,1	-32,1	22,5	10,9
Mittelwert:				19,0	17,3	4,9	3,0

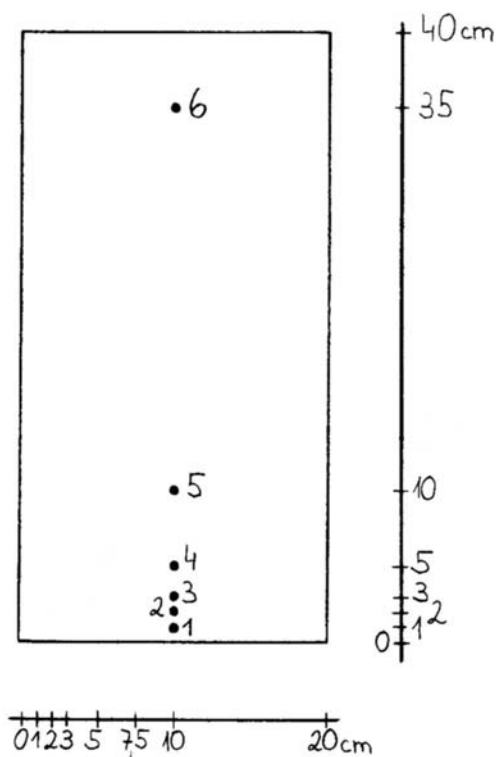
ANHANG C-2

Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen

Feuchtigkeit: 0,0 Gew.-%

Zuschlag: quarzhaltig

prEN: λ_1 (obere Grenzfunktion)

C.43 – C.48: Temperaturen im Balken 20/40

C.43: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 1

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	90	111,7	112,6	-22,6	-20,1	-0,9	-0,8
10	185	233,8	232,1	-47,1	-20,3	1,7	0,7
15	275	334,8	330,4	-55,4	-16,8	4,4	1,3
20	340	414,5	407,8	-67,8	-16,6	6,7	1,6
25	400	478,1	469,3	-69,3	-14,8	8,8	1,9
30	450	530,1	519,3	-69,3	-13,3	10,8	2,1
40	550	611,7	598,4	-48,4	-8,1	13,3	2,2
50	620	674,6	659,6	-39,6	-6,0	15,0	2,3
60	680	725,1	709,4	-29,4	-4,1	15,7	2,2
70	725	767,6	751,6	-26,6	-3,5	16,0	2,1
80	775	803,8	788,1	-13,1	-1,7	15,7	2,0
90	810	835,2	819,7	-9,7	-1,2	15,5	1,9
Mittelwert:				38,3	9,7	9,6	1,6

C.44: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 2

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	35	57,6	58,3	-23,3	-40,0	-0,7	-1,2
10	100	138,7	137,9	-37,9	-27,5	0,8	0,6
15	160	216,9	212,6	-52,6	-24,7	4,3	2,0
20	215	284,8	277,0	-62,0	-22,4	7,8	2,8
25	260	343,0	332,0	-72,0	-21,7	11,0	3,3
30	305	393,5	379,5	-74,5	-19,6	14,0	3,7
40	395	477,2	458,6	-63,6	-13,9	18,6	4,1
50	465	544,8	523,1	-58,1	-11,1	21,7	4,1
60	520	601,5	577,7	-57,7	-10,0	23,8	4,1
70	590	649,9	624,9	-34,9	-5,6	25,0	4,0
80	635	692,2	666,6	-31,6	-4,7	25,6	3,8
90	680	729,5	703,7	-23,7	-3,4	25,8	3,7
Mittelwert:				45,5	15,7	13,8	2,9

C.45: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 3

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	20	31,6	32,0	-12,0	-37,5	-0,4	-1,3
10	45	82,9	83,0	-38,0	-45,8	-0,1	-0,1
15	90	141,7	139,4	-49,4	-35,4	2,3	1,6
20	140	198,0	192,4	-52,4	-27,2	5,6	2,9
25	180	249,7	240,6	-60,6	-25,2	9,1	3,8
30	215	296,5	284,2	-69,2	-24,3	12,3	4,3
40	295	378,0	359,9	-64,9	-18,0	18,1	5,0
50	365	446,7	424,3	-59,3	-14,0	22,4	5,3
60	430	505,7	480,0	-50,0	-10,4	25,7	5,4
70	495	557,2	529,3	-34,3	-6,5	27,9	5,3
80	530	602,8	573,3	-43,3	-7,6	29,5	5,1
90	590	643,5	613,1	-23,1	-3,8	30,4	5,0
Mittelwert:				42,8	19,7	14,1	3,5

C.46: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 4

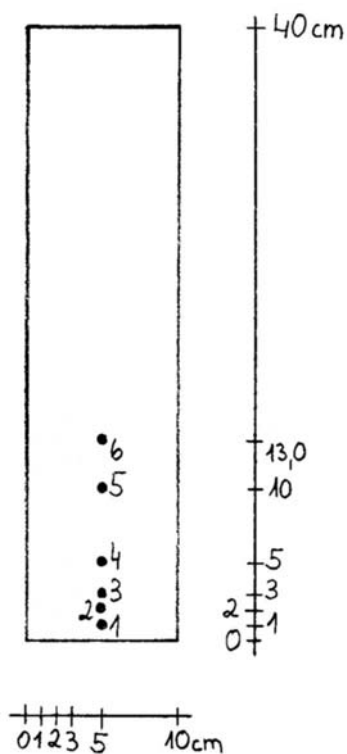
Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10	14,0	14,1	-4,1	-29,1	-0,1	-0,7
10	20	32,2	32,5	-12,5	-38,5	-0,3	-0,9
15	30	62,4	62,4	-32,4	-51,9	0,0	0,0
20	45	98,9	97,5	-52,5	-53,8	1,4	1,4
25	70	137,6	133,9	-63,9	-47,7	3,7	2,8
30	90	176,2	169,5	-79,5	-46,9	6,7	4,0
40	145	249,1	236,3	-91,3	-38,6	12,8	5,4
50	205	314,9	296,5	-91,5	-30,9	18,4	6,2
60	260	373,8	350,8	-90,8	-25,9	23,0	6,6
70	310	426,8	400,0	-90,0	-22,5	26,8	6,7
80	360	474,6	444,9	-84,9	-19,1	29,7	6,7
90	415	518,2	486,2	-71,2	-14,6	32,0	6,6
Mittelwert:				58,8	32,3	11,9	3,7

C.47: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 5

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10	10,5	10,5	-0,5	-4,4	0,0	0,0
10	10	15,0	15,2	-5,2	-34,4	-0,2	-1,4
15	15	27,5	27,8	-12,8	-46,1	-0,3	-1,1
20	20	47,7	48,0	-28,0	-58,3	-0,3	-0,5
25	25	73,5	73,1	-48,1	-65,8	0,4	0,5
30	35	102,5	100,8	-65,8	-65,3	1,7	1,7
40	60	164,1	157,3	-97,3	-61,9	6,8	4,3
50	95	223,6	211,1	-116,1	-55,0	12,6	6,0
60	130	279,2	261,5	-131,5	-50,3	17,7	6,8
70	175	330,6	308,3	-133,3	-43,2	22,3	7,2
80	210	377,9	351,6	-141,6	-40,3	26,3	7,5
90	255	421,6	392,0	-137,0	-35,0	29,5	7,5
Mittelwert:				70,6	43,1	9,1	3,4

C.48: Temperaturen im Balken 20/40 am Punkt 6

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10	10,1	10,1	-0,1	-1,0	0,0	0,0
10	10	11,2	11,2	-1,2	-10,7	0,0	0,0
15	10	15,3	15,5	-5,5	-35,5	-0,2	-1,3
20	15	23,8	24,0	-9,0	-37,5	-0,2	-0,8
25	20	36,2	36,3	-16,3	-44,9	-0,1	-0,3
30	25	51,6	51,4	-26,4	-51,4	0,2	0,4
40	45	87,3	86,0	-41,0	-47,7	1,3	1,5
50	70	126,1	121,9	-51,9	-42,6	4,2	3,4
60	100	163,5	155,7	-55,7	-35,8	7,8	5,0
70	135	198,4	187,0	-52,0	-27,8	11,4	6,1
80	175	230,7	215,8	-40,8	-18,9	14,9	6,9
90	205	260,4	242,4	-37,4	-15,4	18,0	7,4
Mittelwert:				25,9	28,4	4,5	2,5

C.49 – C.54: Temperaturen im Balken 10/40

C.49: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 1

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	95	117,5	118,2	-23,2	-19,6	-0,7	-0,6
10	215	256,0	253,7	-38,7	-15,3	2,3	0,9
15	320	374,9	369,1	-49,1	-13,3	5,8	1,6
20	420	469,1	460,7	-40,7	-8,8	8,4	1,8
25	480	543,6	533,5	-53,5	-10,0	10,1	1,9
30	545	603,9	593,0	-48,0		10,9	1,8
40	650	695,7	684,4	-34,4	-5,0	11,3	1,7
50	720	763,0	752,3	-32,3	-4,3	10,7	1,4
60	785	815,2	805,4	-20,4	-2,5	9,8	1,2
Mittelwert:				34,0	8,7	7,0	1,3

C.50: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 2

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	50	64,0	64,7	-14,7	-22,7	-0,7	-1,1
10	155	166,3	164,9	-9,9	-6,0	1,4	0,8
15	250	269,3	262,7	-12,7	-4,8	6,6	2,5
20	325	359,1	348,1	-23,1	-6,6	11,0	3,2
25	415	435,3	421,0	-6,0	-1,4	14,3	3,4
30	470	499,9	483,4	-13,4	-2,8	16,5	3,4
40	575	603,1	584,8	-9,8	-1,7	18,3	3,1
50	665	681,8	663,6	1,4	0,2	18,2	2,7
60		744,1	726,9	8,1	1,1	17,2	2,4
Mittelwert:				9,9	4,7	10,4	2,3

C.51: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 3

Zeit [min]	Messung	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	[°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	30	38,5	39,0	-9,0	-23,1	-0,5	-1,3
10	85	114,7	114,8	-29,8	-26,0	-0,1	-0,1
15	170	204,5	199,6	-29,6	-14,8	4,9	2,5
20	250	288,7	278,5	-28,5	-10,2	10,2	3,7
25	330	363,4	349,0	-19,0	-5,4	14,4	4,1
30	385		411,3	-26,3	-6,4	17,6	4,3
40	490	536,9	515,9	-25,9	-5,0	21,0	4,1
50	600	621,7	599,9	0,1	0,0	21,8	3,6
60	680	690,1	668,6	11,4	1,7	21,5	3,2
Mittelwert:				18,0	9,3	11,2	2,7

C.52: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 4

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	25	21,6	21,9	3,1	14,2	-0,3	-1,4
10	60	69,4	70,4	-10,4	-14,8	-1,0	-1,4
15	120	140,0	138,6	-18,6	-13,4	1,4	1,0
20	180	214,2	207,2	-27,2	-13,1	7,0	3,4
25	250	283,9	271,9	-21,9	-8,1	12,0	4,4
30	310	347,5	331,3	-21,3	-6,4	16,2	4,9
40	420	456,7	434,7	-14,7	-3,4	22,0	5,1
50	525	545,8	521,5	3,5	0,7	24,3	4,7
60	615	619,6	594,6	20,4	3,4	25,0	4,2
Mittelwert:				14,1	7,8	10,9	3,1

C.53: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 5

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	15	17,9	18,1	-3,1	-17,1	-0,2	-1,1
10	45	52,7	53,5	-8,5	-15,9	-0,8	-1,5
15	95	107,5	107,8	-12,8	-11,9	-0,3	-0,3
20	140	170,3	166,7	-26,7	-16,0	3,6	2,2
25	200	231,9	223,4	-23,4	-10,5	8,5	3,8
30	250	290,0	277,1	-27,1	-9,8	12,9	4,7
40	345	393,4	373,5	-28,5	-7,6	19,9	5,3
50	440	480,9	456,5	-16,5	-3,6	24,4	5,3
60	525	555,5	529,1	-4,1	-0,8	26,4	5,0
Mittelwert:				15,1	9,3	9,7	2,9

C.54: Temperaturen im Balken 10/40 am Punkt 6

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	[°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	10	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	10	17,9	18,1	-8,1	-44,8	-0,2	-1,1
10	35	52,3	53,1	-18,1	-34,1	-0,8	-1,5
15	75	105,8	106,5	-31,5	-29,6	-0,7	-0,7
20	130	167,5	164,3	-34,3	-20,9	3,2	1,9
25	180	227,9	219,8	-39,8	-18,1	8,1	3,7
30	230	284,9	272,5	-42,5	-15,6	12,4	4,6
40	320	386,4	367,1	-47,1	-12,8	19,3	5,3
50	410	472,7	448,7	-38,7	-8,6	24,0	5,3
60	480	546,5	520,2	-40,2	-7,7	26,3	5,1
Mittelwert:				30,0	19,2	9,5	2,9

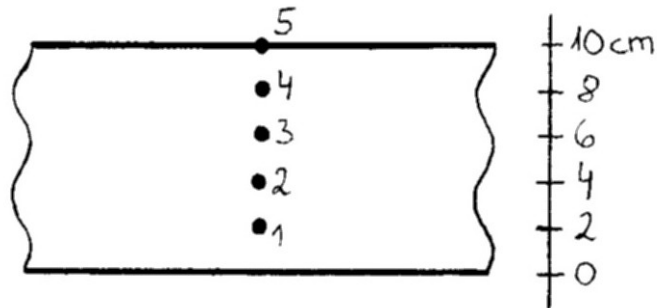
ANHANG C-3

Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen

Feuchtigkeit: 1,5 Gew.-%

Zuschlag: quarzhaltig

prEN: λ_1 (obere Grenzfunktion)

C.55 – C.59: Temperaturen in der 10cm dicken Wand

C.55: Temperaturen in der 10cm dicken Wand am Punkt 1

Zeit [min]	Messung	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	305	377,8	363,8	-58,8	-16,2	14,0	3,8
60	460	558,0	533,3	-73,3	-13,7	24,7	4,6
90	630	665,3	635,8	-5,8	-0,9	29,5	4,6
Mittelwert:				34,5	7,7	17,1	3,3

C.56: Temperaturen in der 10cm dicken Wand am Punkt 2

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	180	197,1	189,1	-9,1	-4,8	8,0	4,2
60	295	358,6	336,9	-41,9	-12,4	21,7	6,4
90	410	467,6	436,7	-26,7	-6,1	30,9	7,1
120	515	547,7	511,5	3,5	0,7	36,2	7,1
180	700	648,6	608,1	91,9	15,1	40,5	6,7
Mittelwert:				28,9	6,5	22,9	5,3

C.57: Temperaturen in der 10cm dicken Wand am Punkt 3

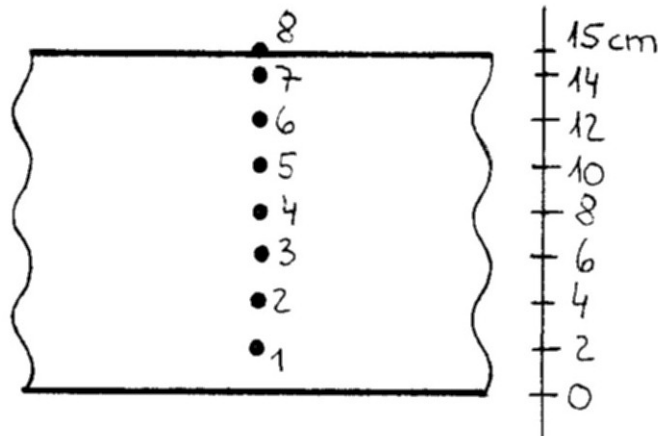
Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	110	106,7	104,5	5,5	5,3	2,2	2,1
60	200	235,4	220,4	-20,4	-9,3	15,0	6,8
90	285	338,2	312,6	-27,6	-8,8	25,6	8,2
120	360	412,9	381,3	-21,3	-5,6	31,6	8,3
180	495	502,7	465,2	29,8	6,4	37,5	8,1
Mittelwert:				17,4	5,9	18,7	5,6

C.58: Temperaturen in der 10cm dicken Wand am Punkt 4

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	70	67,1	66,9	3,1	4,6	0,2	0,3
60	130	160,4	151,4	-21,4	-14,1	9,0	5,9
90	205	253,9	233,8	-28,8	-12,3	20,1	8,6
120	260	317,3	292,1	-32,1	-11,0	25,2	8,6
180	370	387,9	357,7	12,3	3,4	30,2	8,4
Mittelwert:				16,3	7,6	14,1	5,3

C.59: Temperaturen in der 10cm dicken Wand am Punkt 5

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	50	52,6	52,7	-2,7	-5,1	-0,1	-0,2
60	90	124,5	118,6	-28,6	-24,1	5,9	5,0
90	145	200,8	185,1	-40,1	-21,7	15,7	8,5
120	185	247,2	228,4	-43,4	-19,0	18,8	8,2
180	285	293,9	271,9	13,1	4,8	22,0	8,1
Mittelwert:				21,3	12,5	10,4	5,0

C.60 – C.67: Temperaturen in der 15cm dicken Wand

C.60: Temperaturen in der 15cm dicken Wand am Punkt 1

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	305	377,5	363,5	-58,5	-16,1	14,0	3,9
60	450	554,9	530,0	-80,0	-15,1	24,9	4,7
90	635	657,4	627,7	7,3	1,2	29,7	4,7
Mittelwert:				36,5	8,1	17,2	3,3

C.61: Temperaturen in der 15cm dicken Wand am Punkt 2

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	180	196,5	188,2	-8,2	-4,4	8,3	4,4
60	285	352,1	330,3	-45,3	-13,7	21,8	6,6
90	400	452,7	422,7	-22,7	-5,4	30,0	7,1
120	510	527,6	492,0	18,0	3,7	35,6	7,2
180	700	637,2	594,7	105,3	17,7	42,5	7,1
Mittelwert:				33,3	7,5	23,0	5,4

C.62: Temperaturen in der 15cm dicken Wand am Punkt 3

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	115	104,7	102,1	12,9	12,6	2,6	2,5
60	190	223,5	209,0	-19,0	-9,1	14,5	6,9
90	275	314,4	291,1	-16,1	-5,5	23,3	8,0
120	360	385,4	355,5	4,5	1,3	29,9	8,4
180	495	493,5	453,6	41,4	9,1	39,9	8,8
Mittelwert:				15,7	6,3	18,4	5,8

C.63: Temperaturen in der 15cm dicken Wand am Punkt 4

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	65	61,3	60,8	4,2	6,9	0,5	0,8
60	135	141,2	133,7	1,3	1,0	7,5	5,6
90	190	219,0	202,7	-12,7	-6,3	16,3	8,0
120	250	283,9	261,0	-11,0	-4,2	22,9	8,8
180	365	386,4	352,3	12,7	3,6	34,1	9,7
Mittelwert:				7,0	3,7	13,6	5,5

C.64: Temperaturen in der 15cm dicken Wand am Punkt 5

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	40	39,1	39,1	0,9	2,3	0,0	0,0
60	90	94,1	91,4	-1,4	-1,5	2,7	3,0
90	140	153,5	143,6	-3,6	-2,5	9,9	6,9
120	175	210,8	194,0	-19,0	-9,8	16,8	8,7
180	275	306,0	277,7	-2,7	-1,0	28,3	10,2
Mittelwert:				4,6	2,9	9,6	4,8

C.65: Temperaturen in der 15cm dicken Wand am Punkt 6

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	30	28,5	28,6	1,4	4,9	-0,1	-0,3
60	65	67,7	66,4	-1,4	-2,1	1,3	2,0
90	95	113,1	108,1	-13,1	-12,1	5,0	4,6
120	125	159,0	147,4	-22,4	-15,2	11,6	7,9
180	205	245,3	222,2	-17,2	-7,7	23,1	10,4
Mittelwert:				9,3	7,0	6,9	4,2

C.66: Temperaturen in der 15cm dicken Wand am Punkt 7

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	30	24,2	24,3	5,7	23,5	-0,1	-0,4
60	55	53,6	53,0	2,0	3,8	0,6	1,1
90	70	92,0	89,0	-19,0	-21,3	3,0	3,4
120	85	126,0	118,2	-33,2	-28,1	7,8	6,6
180	155	199,4	180,7	-25,7	-14,2	18,7	10,3
Mittelwert:				14,3	15,2	5,0	3,6

C.67: Temperaturen in der 15cm dicken Wand am Punkt 8

Zeit [min]	Messung [°C]	ENV [°C]	prEN [°C]	Messung-prEN [°C]	Messung-prEN [%]	ENV-prEN [°C]	ENV-prEN [%]
0	20	20,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	35	23,6	23,7	11,3	47,7	-0,1	-0,4
60	50	50,3	49,8	0,2	0,4	0,5	1,0
90	65	85,6	83,0	-18,0	-21,7	2,6	3,1
120	80	115,8	108,9	-28,9	-26,5	6,9	6,3
180	145	180,8	164,3	-19,3	-11,7	16,5	10,0
Mittelwert:				13,0	18,0	4,4	3,5

ANHANG D

Temperaturfeld

D.1 – D.2	Stütze 1
D.3 – D.4	Stütze 2
D.5 – D.6	Stütze 3
D.7 – D.8	Stütze 4
D.9 – D.10	Balken 1
D.11 – D.12	Balken 2

Stütze 1

D.1: Temperaturfeld nach ENV 1992-1-2 im Stützenquerschnitt zur 109. Brandminute (Beton) [°C]

1000. 952. 919. 896. 880. 870. 864. 862. 864. 870. 880. 896. 919. 952. 1000.
 952. 840. 761. 706. 670. 646. 633. 628. 633. 646. 670. 706. 761. 840. 952.
 919. 761. 651. 575. 525. 493. 474. 468. 474. 493. 525. 575. 651. 761. 919.
 896. 706. 575. 486. 426. 388. 366. 359. 366. 388. 426. 486. 575. 706. 896.
 880. 670. 525. 426. 360. 316. 291. 283. 291. 316. 360. 426. 525. 670. 880.
 870. 646. 493. 388. 316. 269. 241. 232. 241. 269. 316. 388. 493. 646. 870.
 864. 633. 474. 366. 291. 241. 211. 201. 211. 241. 291. 366. 474. 633. 864.
 862. 628. 468. 359. 283. 232. 201. 190. 201. 232. 283. 359. 468. 628. 862.
 864. 633. 474. 366. 291. 241. 211. 201. 211. 241. 291. 366. 474. 633. 864.
 870. 646. 493. 388. 316. 269. 241. 232. 241. 269. 316. 388. 493. 646. 870.
 880. 670. 525. 426. 360. 316. 291. 283. 291. 316. 360. 426. 525. 670. 880.
 896. 706. 575. 486. 426. 388. 366. 359. 366. 388. 426. 486. 575. 706. 896.
 919. 761. 651. 575. 525. 493. 474. 468. 474. 493. 525. 575. 651. 761. 919.
 952. 840. 761. 706. 670. 646. 633. 628. 633. 646. 670. 706. 761. 840. 952.
 1000. 952. 919. 896. 880. 870. 864. 862. 864. 870. 880. 896. 919. 952. 1000.

D.2: Temperaturfeld nach prEN 1992-1-2 im Stützenquerschnitt zur 120. Brandminute (Beton) [°C]

1015. 965. 931. 906. 890. 879. 873. 871. 873. 879. 890. 906. 931. 965. 1015.
 965. 846. 763. 706. 667. 643. 629. 624. 629. 643. 667. 706. 763. 846. 965.
 931. 763. 649. 573. 522. 490. 472. 466. 472. 490. 522. 573. 649. 763. 931.
 906. 706. 573. 485. 426. 389. 368. 361. 368. 389. 426. 485. 573. 706. 906.
 890. 667. 522. 426. 363. 322. 298. 291. 298. 322. 363. 426. 522. 667. 890.
 879. 643. 490. 389. 322. 278. 253. 244. 253. 278. 322. 389. 490. 643. 879.
 873. 629. 472. 368. 298. 253. 226. 217. 226. 253. 298. 368. 472. 629. 873.
 871. 624. 466. 361. 291. 244. 217. 208. 217. 244. 291. 361. 466. 624. 871.
 873. 629. 472. 368. 298. 253. 226. 217. 226. 253. 298. 368. 472. 629. 873.
 879. 643. 490. 389. 322. 278. 253. 244. 253. 278. 322. 389. 490. 643. 879.
 890. 667. 522. 426. 363. 322. 298. 291. 298. 322. 363. 426. 522. 667. 890.
 906. 706. 573. 485. 426. 389. 368. 361. 368. 389. 426. 485. 573. 706. 906.
 931. 763. 649. 573. 522. 490. 472. 466. 472. 490. 522. 573. 649. 763. 931.
 965. 846. 763. 706. 667. 643. 629. 624. 629. 643. 667. 706. 763. 846. 965.
 1015. 965. 931. 906. 890. 879. 873. 871. 873. 879. 890. 906. 931. 965. 1015.

Stütze 2**D.3: Temperaturfeld nach ENV 1992-1-2 im Stützenquerschnitt zur 99. Brandminute (Beton) [°C]**

983. 931. 897. 873. 857. 846. 840. 839. 840. 846. 857. 873. 897. 931. 983.
 931. 813. 731. 675. 638. 615. 602. 598. 602. 615. 638. 675. 731. 813. 931.
 897. 731. 618. 542. 491. 459. 441. 436. 441. 459. 491. 542. 618. 731. 897.
 873. 675. 542. 452. 392. 354. 332. 325. 332. 354. 392. 452. 542. 675. 873.
 857. 638. 491. 392. 325. 282. 256. 248. 256. 282. 325. 392. 491. 638. 857.
 846. 615. 459. 354. 282. 233. 205. 195. 205. 233. 282. 354. 459. 615. 846.
 840. 602. 441. 332. 256. 205. 173. 162. 173. 205. 256. 332. 441. 602. 840.
 839. 598. 436. 325. 248. 195. 162. 151. 162. 195. 248. 325. 436. 598. 839.
 840. 602. 441. 332. 256. 205. 173. 162. 173. 205. 256. 332. 441. 602. 840.
 846. 615. 459. 354. 282. 233. 205. 195. 205. 233. 282. 354. 459. 615. 846.
 857. 638. 491. 392. 325. 282. 256. 248. 256. 282. 325. 392. 491. 638. 857.
 873. 675. 542. 452. 392. 354. 332. 325. 332. 354. 392. 452. 542. 675. 873.
 897. 731. 618. 542. 491. 459. 441. 436. 441. 459. 491. 542. 618. 731. 897.
 931. 813. 731. 675. 638. 615. 602. 598. 602. 615. 638. 675. 731. 813. 931.
 983. 931. 897. 873. 857. 846. 840. 839. 840. 846. 857. 873. 897. 931. 983.

D.4: Temperaturfeld nach prEN 1992-1-2 im Stützenquerschnitt zur 109. Brandminute (Beton) [°C]

998. 945. 909. 884. 867. 856. 850. 848. 850. 856. 867. 884. 909. 945. 998.
 945. 819. 733. 675. 637. 612. 599. 594. 599. 612. 637. 675. 733. 819. 945.
 909. 733. 616. 540. 489. 457. 440. 434. 440. 457. 489. 540. 616. 733. 909.
 884. 675. 540. 451. 393. 356. 335. 329. 335. 356. 393. 451. 540. 675. 884.
 867. 637. 489. 393. 330. 288. 265. 257. 265. 288. 330. 393. 489. 637. 867.
 856. 612. 457. 356. 288. 244. 217. 208. 217. 244. 288. 356. 457. 612. 856.
 850. 599. 440. 335. 265. 217. 188. 178. 188. 217. 265. 335. 440. 599. 850.
 848. 594. 434. 329. 257. 208. 178. 168. 178. 208. 257. 329. 434. 594. 848.
 850. 599. 440. 335. 265. 217. 188. 178. 188. 217. 265. 335. 440. 599. 850.
 856. 612. 457. 356. 288. 244. 217. 208. 217. 244. 288. 356. 457. 612. 856.
 867. 637. 489. 393. 330. 288. 265. 257. 265. 288. 330. 393. 489. 637. 867.
 884. 675. 540. 451. 393. 356. 335. 329. 335. 356. 393. 451. 540. 675. 884.
 909. 733. 616. 540. 489. 457. 440. 434. 440. 457. 489. 540. 616. 733. 909.
 945. 819. 733. 675. 637. 612. 599. 594. 599. 612. 637. 675. 733. 819. 945.
 998. 945. 909. 884. 867. 856. 850. 848. 850. 856. 867. 884. 909. 945. 998.

Stütze 3

D.5: Temperaturfeld nach ENV 1992-1-2 im Stützenquerschnitt zur 55. Brandminute (Beton) [°C]

871. 796. 755. 730. 720. 720. 730. 755. 796. 871.
796. 639. 548. 498. 475. 475. 498. 548. 639. 796.
755. 548. 429. 363. 333. 333. 363. 429. 548. 755.
730. 498. 363. 287. 252. 252. 287. 363. 498. 730.
720. 475. 333. 252. 213. 213. 252. 333. 475. 720.
720. 475. 333. 252. 213. 213. 252. 333. 475. 720.
730. 498. 363. 287. 252. 252. 287. 363. 498. 730.
755. 548. 429. 363. 333. 333. 363. 429. 548. 755.
796. 639. 548. 498. 475. 475. 498. 548. 639. 796.
871. 796. 755. 730. 720. 720. 730. 755. 796. 871.

D.6: Temperaturfeld nach prEN 1992-1-2 im Stützenquerschnitt zur 60. Brandminute (Beton) [°C]

886. 810. 768. 743. 732. 732. 743. 768. 810. 886.
810. 645. 552. 501. 478. 478. 501. 552. 645. 810.
768. 552. 433. 368. 339. 339. 368. 433. 552. 768.
743. 501. 368. 296. 263. 263. 296. 368. 501. 743.
732. 478. 339. 263. 228. 228. 263. 339. 478. 732.
732. 478. 339. 263. 228. 228. 263. 339. 478. 732.
743. 501. 368. 296. 263. 263. 296. 368. 501. 743.
768. 552. 433. 368. 339. 339. 368. 433. 552. 768.
810. 645. 552. 501. 478. 478. 501. 552. 645. 810.
886. 810. 768. 743. 732. 732. 743. 768. 810. 886.

Stütze 4

D.7: Temperaturfeld nach ENV 1992-1-2 im Stützenquerschnitt zur 53. Brandminute (Beton) [°C]

863. 787. 745. 720. 710. 710. 720. 745. 787. 863.
787. 627. 535. 485. 462. 462. 485. 535. 627. 787.
745. 535. 416. 349. 319. 319. 349. 416. 535. 745.
720. 485. 349. 273. 237. 237. 273. 349. 485. 720.
710. 462. 319. 237. 197. 197. 237. 319. 462. 710.
710. 462. 319. 237. 197. 197. 237. 319. 462. 710.
720. 485. 349. 273. 237. 237. 273. 349. 485. 720.
745. 535. 416. 349. 319. 319. 349. 416. 535. 745.
787. 627. 535. 485. 462. 462. 485. 535. 627. 787.
863. 787. 745. 720. 710. 710. 720. 745. 787. 863.

D.8: Temperaturfeld nach prEN 1992-1-2 im Stützenquerschnitt zur 56. Brandminute (Beton) [°C]

872. 793. 750. 725. 714. 714. 725. 750. 793. 872.
793. 623. 529. 478. 455. 455. 478. 529. 623. 793.
750. 529. 409. 344. 315. 315. 344. 409. 529. 750.
725. 478. 344. 271. 237. 237. 271. 344. 478. 725.
714. 455. 315. 237. 200. 200. 237. 315. 455. 714.
714. 455. 315. 237. 200. 200. 237. 315. 455. 714.
725. 478. 344. 271. 237. 237. 271. 344. 478. 725.
750. 529. 409. 344. 315. 315. 344. 409. 529. 750.
793. 623. 529. 478. 455. 455. 478. 529. 623. 793.
872. 793. 750. 725. 714. 714. 725. 750. 793. 872.

Balken 1**D.9: Temperaturfeld nach ENV 1992-1-2 im Bauteilquerschnitt zur 101. Brandminute (Beton) [°C]**

999. 970. 952. 939. 931. 925. 922. 920. 919. 918. 917. 917. 916. 913. 910. 897. 883. 768.
 972. 911. 870. 842. 824. 812. 804. 800. 797. 795. 794. 793. 790. 786. 777. 756. 710. 574.
 952. 863. 803. 763. 736. 720. 709. 703. 699. 697. 695. 693. 689. 683. 671. 644. 588. 475.
 936. 825. 750. 701. 669. 648. 636. 628. 623. 620. 618. 615. 611. 604. 589. 560. 504. 412.
 924. 797. 711. 655. 618. 595. 581. 572. 567. 563. 561. 558. 553. 545. 529. 499. 447. 369.
 915. 777. 684. 623. 584. 559. 544. 534. 528. 524. 522. 518. 513. 505. 488. 459. 410. 341.
 910. 765. 668. 604. 563. 538. 522. 512. 506. 502. 499. 495. 490. 481. 464. 435. 389. 325.
 908. 761. 662. 598. 557. 531. 514. 504. 498. 494. 491. 488. 483. 473. 456. 428. 382. 319.
 910. 765. 668. 604. 563. 538. 522. 512. 506. 502. 499. 495. 490. 481. 464. 435. 389. 325.
 915. 777. 684. 623. 584. 559. 544. 534. 528. 524. 522. 518. 513. 505. 488. 459. 410. 341.
 924. 797. 711. 655. 618. 595. 581. 572. 567. 563. 561. 558. 553. 545. 529. 499. 447. 369.
 936. 825. 750. 701. 669. 648. 636. 628. 623. 620. 618. 615. 611. 604. 589. 560. 504. 412.
 952. 863. 803. 763. 736. 720. 709. 703. 699. 697. 695. 693. 689. 683. 671. 644. 588. 475.
 972. 911. 870. 842. 824. 812. 804. 800. 797. 795. 794. 793. 790. 786. 777. 756. 710. 574.
 999. 970. 952. 939. 931. 925. 922. 920. 919. 918. 917. 917. 916. 913. 910. 897. 883. 768.

D.10: Temperaturfeld nach prEN 1992-1-2 im Bauteilquerschnitt zur 110. Brandminute (Beton) [°C]

1012. 984. 966. 953. 945. 939. 936. 933. 932. 931. 931. 929. 929. 925. 923. 907. 893. 772.
 985. 922. 878. 849. 830. 817. 809. 804. 801. 799. 798. 796. 793. 788. 777. 754. 703. 558.
 965. 871. 808. 766. 739. 721. 710. 703. 699. 696. 694. 691. 688. 680. 666. 637. 576. 460.
 948. 831. 753. 702. 669. 648. 635. 627. 622. 618. 616. 613. 608. 600. 583. 552. 493. 398.
 936. 802. 713. 656. 619. 595. 581. 571. 566. 562. 559. 556. 551. 541. 524. 492. 437. 357.
 927. 781. 685. 624. 584. 559. 544. 534. 528. 524. 521. 517. 512. 502. 484. 452. 401. 331.
 922. 769. 669. 605. 564. 538. 522. 512. 506. 502. 498. 495. 489. 479. 461. 429. 381. 316.
 920. 765. 664. 599. 558. 532. 515. 505. 499. 494. 491. 487. 482. 471. 453. 422. 374. 311.
 922. 769. 669. 605. 564. 538. 522. 512. 506. 502. 498. 495. 489. 479. 461. 429. 381. 316.
 927. 781. 685. 624. 584. 559. 544. 534. 528. 524. 521. 517. 512. 502. 484. 452. 401. 331.
 936. 802. 713. 656. 619. 595. 581. 571. 566. 562. 559. 556. 551. 541. 524. 492. 437. 357.
 948. 831. 753. 702. 669. 648. 635. 627. 622. 618. 616. 613. 608. 600. 583. 552. 493. 398.
 965. 871. 808. 766. 739. 721. 710. 703. 699. 696. 694. 691. 688. 680. 666. 637. 576. 460.
 985. 922. 878. 849. 830. 817. 809. 804. 801. 799. 798. 796. 793. 788. 777. 754. 703. 558.
 1012. 984. 966. 953. 945. 939. 936. 933. 932. 931. 931. 929. 929. 925. 923. 907. 893. 772.

Balken 2

D.11: Temperaturfeld nach ENV 1992-1-2 im Bauteilquerschnitt zur 117. Brandminute (Beton) [°C]

1010. 966. 936. 914. 899. 889. 882. 878. 875. 873. 872. 872. 871. 870. 868. 865. 860. 844. 822. 707.
966. 864. 792. 742. 708. 685. 670. 660. 653. 649. 646. 645. 643. 641. 637. 630. 618. 592. 539. 426.
938. 795. 696. 628. 582. 551. 530. 517. 508. 502. 499. 496. 494. 491. 486. 478. 463. 437. 391. 323.
919. 753. 637. 559. 506. 471. 447. 431. 421. 415. 411. 408. 405. 402. 396. 387. 373. 349. 313. 265.
911. 733. 610. 527. 471. 433. 408. 392. 381. 374. 370. 366. 363. 360. 354. 345. 331. 309. 278. 238.
911. 733. 610. 527. 471. 433. 408. 392. 381. 374. 370. 366. 363. 360. 354. 345. 331. 309. 278. 238.
919. 753. 637. 559. 506. 471. 447. 431. 421. 415. 411. 408. 405. 402. 396. 387. 373. 349. 313. 265.
938. 795. 696. 628. 582. 551. 530. 517. 508. 502. 499. 496. 494. 491. 486. 478. 463. 437. 391. 323.
966. 864. 792. 742. 708. 685. 670. 660. 653. 649. 646. 645. 643. 641. 637. 630. 618. 592. 539. 426.
1010. 966. 936. 914. 899. 889. 882. 878. 875. 873. 872. 872. 871. 870. 868. 865. 860. 844. 822. 707.

D.12: Temperaturfeld nach prEN 1992-1-2 im Bauteilquerschnitt zur 127. Brandminute (Beton) [°C]

1022. 976. 945. 923. 907. 896. 889. 884. 881. 879. 878. 877. 876. 875. 874. 869. 864. 846. 825. 706.
977. 868. 792. 740. 704. 680. 664. 653. 646. 642. 639. 637. 635. 632. 628. 620. 606. 579. 522. 405.
947. 796. 692. 623. 576. 545. 524. 510. 501. 496. 492. 489. 487. 483. 478. 469. 453. 425. 378. 311.
928. 752. 633. 555. 502. 467. 444. 428. 418. 412. 407. 404. 401. 397. 392. 382. 366. 342. 305. 257.
919. 731. 606. 523. 468. 431. 406. 390. 380. 373. 368. 365. 362. 358. 352. 342. 327. 305. 273. 232.
919. 731. 606. 523. 468. 431. 406. 390. 380. 373. 368. 365. 362. 358. 352. 342. 327. 305. 273. 232.
928. 752. 633. 555. 502. 467. 444. 428. 418. 412. 407. 404. 401. 397. 392. 382. 366. 342. 305. 257.
947. 796. 692. 623. 576. 545. 524. 510. 501. 496. 492. 489. 487. 483. 478. 469. 453. 425. 378. 311.
977. 868. 792. 740. 704. 680. 664. 653. 646. 642. 639. 637. 635. 632. 628. 620. 606. 579. 522. 405.
1022. 976. 945. 923. 907. 896. 889. 884. 881. 879. 878. 877. 876. 875. 874. 869. 864. 846. 825. 706.