

**Rechenprogramm INSTATCP
für 3D-Temperaturberechnungen
bei instationären Randbedingungen
unter Delphi und Windows**

von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM VII.0902,
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
und Dipl.-Ing. Boris Kownatzki, Berlin

Zusammenfassung

Das in Borland Delphi / Pascal für Windows 98/NT geschriebene [PC-Computerprogramm INSTATCP](#) dient zur Berechnung der Temperaturverteilung in Bauteilen unter Lösung der nichtlinearen, instationären Wärmeleitungsgleichung für den dreidimensionalen Fall. Es arbeitet nach der Methode der finiten Volumenelemente. Die Integration des Differentialgleichungssystems erfolgt mit einem sehr leistungsfähigen Prädiktor-Korrektor-Verfahren für steife Probleme. Das Programm benutzt quaderförmige bzw. gerade prismatische Volumenelemente. Es ist anwendbar auf aus verschiedenen Baustoffen zusammengesetzte Bauteilquerschnitte, berücksichtigt nichtlineare Wärmeübergangs- und Strahlungsrandbedingungen zwischen dreiecks- und rechteckförmigen Oberflächen sowie Temperatur- und Zeitabhängigkeiten der vorgegebenen Kennlinien. Es ist möglich, Phasenumwandlungen, d.h. Änderungen des Aggregatzustandes (Verdampfung oder Gefrieren der in Baustoffen vorhandenen Feuchte, Schmelzen von Eisschichten, Gefrieren von Wasserschichten u.a.), ebenso numerisch zu erfassen wie die konvektive Wärmeübertragung strömender Medien in Rohren und Kanälen und Wärmestromeinspeisungen. Die [Graphik- und Kurvenausgabe](#) erfolgt in Farbe auf dem Bildschirm (VGA) bzw. hochauflösend über PostScript / PCL auf Drucker (PostScript-Files in Farbe oder SW, PCL-Files in SW mit Schraffuren). Anhand einer Reihe von [Anwendungsbeispielen](#) wird das Anwendungsspektrum von PC-Programm INSTATCP erläutert.

Abstract

The [PC computer program INSTATCP](#) written in Borland Pascal for Borland Delphi under Windows 98/NT performs the transient heat transfer analysis of three-dimensional structures subjected to surface heat flux, convective and radiative heat transfer, internal heat generation and temperature boundary conditions. The non-linearity may be due to either temperature dependent material properties or non-linear boundary conditions. The program is applicable to structures comprised of one or more materials. It uses a network of cubic or prismatic volume elements, finite-volume method and a very efficient predictor-corrector differential equation system solver for stiff problems to facilitate consideration of non-linearity, radiation heat transfer between triangular/square areas, latent heat in the calculation of temperature in materials such as freezing of water into ice or humid concrete and convection heat transfer in flow through tubes and ducts. [Color graphics](#) are represented in VGA on screen or can be printed using PostScript/PCL on color/laser printer or file. By [worked examples](#) the usefulness of the PC computer program INSTATCP is demonstrated.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	4
2 Rechenprogramm INSTATCP	4
3 Dateneingabe von einer Eingabedatei	4
4 Graphikausgabe	4
5 Datenausgabe numerischer Daten auf eine Ausgabedatei	5
6 Anwendungsspektrum	5
7 Rechenzeiten und Anwendungsbeispiele	5
8 Literatur	7
8.1 Grundlagen Rechenprogramm	7
8.2 Umfeld Berechnung	7
8.3 Wärmebrückenprobleme u.a.	7
8.4 Hausschornsteine	8
8.5 Brandschutzproblemstellungen	8
8.6 Sonderprobleme	9
9 Beispiel 1: Schornsteinkonstruktion	10
10 Beispiel 2: Simulation der Unterfrierung einer Kunsteisbahn	13
11 Beispiel 3: Durchdringung eines Stahlträgers unter einer Betondecke durch eine Glaswand	16
12 Beispiel 4: Dreiseitig nach der ETK beflammt 12 x 24 cm ² Stahlbetonbalken mit Berücksichtigung der Verdampfung bei 100 °C	23
13 Beispiel 5: Reaktordruckdurchführung	26
13.1 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 1	29
13.2 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 2	31
13.3 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 3	32
13.4 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 4	33
13.5 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 5	35
13.6 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 6	37
13.7 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 7	39
13.8 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 8	40
13.9 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 9	41
13.10 Reaktordruckdurchführung - Errechnete Temperaturverläufe	43

1 Einleitung

Experimentelle Untersuchungen werden auf allen Gebieten immer mehr durch rechnerische Analysen und Computersimulationen ersetzt. Außer der damit verbundenen Kosten- und Zeitersparnis können bereits im Projektstadium mit geringem Aufwand Parametervariationen und Optimierungen einer Konstruktion vorgenommen werden. Bisher waren Berechnungen zur Beurteilung des Brand- und Wärmeschutzes komplizierter Baukonstruktionen eine Domäne von Großrechnern oder Workstations und meist Universitäten und wissenschaftlichen Instituten vorbehalten.

2 Rechenprogramm INSTATCP

Mit dem für instationäre Randbedingungen von der BAM in Borland Delphi/Object Pascal entwickelten Finite-Volumen-Programm INSTATCP [1-8] erhält nun der Praktiker ein Instrument, um geometrisch komplizierte, dreidimensionale Brand- und Wärmeschutzprobleme auch auf einem PC ab 64 MB-Hauptspeicher unter Windows 98 lösen zu können. Die Anzahl der Unbekannten richtet sich nur noch nach dem Hauptspeicherausbau und der tolerierten CPU-Rechenzeit und beträgt bei dieser Fassung 131040. Es werden gerade prismatische (2 parallele Dreieckselemente spannen im Raum das Volumenelement auf) und Rechteckelemente mit Knotenpunkten in den Ecken verwendet. Zur Vereinfachung der Knotennumerierung und damit wesentlichen Herabsetzung der Rechenzeit wurde eine Bandbreitenoptimierung nach Cuthill McKee mit der in [4, 5] beschriebenen RCM-Methode in das Programm integriert. Das zur Integration eingesetzte, sehr schnell rechnende, modifizierte [8] Mehrschrittverfahren, das nach der Prädiktor-Korrektor-Methode mit automatischer Schrittweitensteuerung arbeitet, liefert auch bei sehr unterschiedlichen Schichtdicken und Wärmeleitfähigkeiten der Baustoffe (steife Differentialgleichungen) verlässliche Resultate. Gerade für bewegte Medien bietet diese Methode den Vorzug, sehr schnell zu rechnen, vor allem im Fall von Luft als strömendem Medium mit seiner um den Faktor 1000 gegenüber üblichen Baustoffen oder Flüssigkeiten kleineren Wärmekapazität (sehr steifes Problem). Ebenfalls vorhanden sind Algorithmen zur Strahlungsberücksichtigung, zur Erfassung strömender Medien und von Phasenumwandlungen. Punktförmige Einzelwärmestromeinspeisungen können auch berücksichtigt werden.

3 Dateneingabe von einer Eingabedatei

Das Rechenprogramm gestattet die Koordinatengenerierung von Knoten auf Kreisbögen in Polarkoordinaten und eine Baustoffzuordnung von rohrförmigen Strukturen mit Laufanweisungen, eine Generierung von 6-Eck-Elementen mit dreieckigen Deckebenen in der Tiefe sowie eine Generierung von 8-Eck-Elementen mit rechteckigen Deckebenen in der Frontebene und in der Tiefe durch Vorgabe der Schichtdicken in der x-, y-Frontebene und den z-Ebenen. Die Dateneingabe erfolgt von einer Eingabedatei, die mit einem Editor oder einem beliebigen Preprocessor/Zwischenprogramm erstellt werden muß.

4 Graphikausgabe

Zur Kontrolle der vorgenommenen Elementaufteilung und der Zuordnung zu den Baustoffen und Wärmeübergangsbereichen ist eine farbige VGA-Darstellung der Elementaufteilungen mit Zoom-Ausschnitten in das Programm integriert. Auf dem Farbmonitor können im Dialog - auch in Teilbereichen - Isothermen bestimmt werden, Knoten mit

Temperaturwerten oder Knotennummern beschriftet werden und Informationen über die Knotenpunkte erhalten werden. Es kann zwischen einer maßstäblichen und einer normierten Darstellung gewählt werden. Letztere erlaubt, insbesondere bei Rechteckelementen, unterschiedliche Schichtdicken gleichgroß darzustellen. In einem Zeitraffer-effekt kann man für eine feste z-Ebene, z.B. die Frontebene, die Temperaturen über der Zeit oder zu einem beliebigen, aber festem Zeitpunkt, die zur Frontebene parallelen Knotenebenen vor- oder rückwärts "durchblättern". Eine Farb- oder SW-Darstellung der Knotentemperaturen bei fester Zeit über der Ortskoordinate z oder der Zeit auf dem Bildschirm ist ebenfalls möglich. Die Ergebnisse werden numerisch auf eine Ausgabedatei oder in Form von hochauflösenden Farb-/SW-Graphiken (Postscript, PCL, PCX) ausgegeben.

5 Datenausgabe numerischer Daten auf eine Ausgabedatei

Die wichtigsten Eingabedaten und die errechneten numerischen Werte wie Temperaturen, Wärmeströme, Massenumwandlungsverhältnisse werden auf eine Ausgabedatei gespeichert.

6 Anwendungsspektrum

Das Anwendungsspektrum des Programms ist sehr weitgefächert. Es reicht von der Berechnung brandbeanspruchter Bauteile mit Berücksichtigung der Verdampfungsvorgänge [2, 8, 20, 21, 23, 24] über fast alle Arten von 3D-Wärmebrückenproblemen [7-17], die Simulation von Sonneneinstrahlungsproblemen [26, 27] und Gefrier- und Auftauvorgängen [23, 25, 26] bis zur Erfassung strömender Medien, die nicht nur in Rohrleitungen, Bodenheizungen, erdverlegten oder oberirdischen Wasser- und Fernwärmeleitungen, brandbeanspruchten Lüftungsleitungen, Rauchgasabführungen, Haus- und Industrieschornsteinen [2, 3, 15, 18, 19], sondern auch bei technischen Wärmetauschern und geothermischen Anwendungen [28] auftreten.

7 Rechenzeiten und Anwendungsbeispiele

Die CPU-Rechenzeiten hängen vom PC-Prozessor, der Feinheit der Elementierung und der Bandbreite, d. h. der Knotenanzahl und Knotennumerierung, der rechnerisch simulierten Zeitdauer, den Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten der verwendeten Baustoffe und Medien sowie den Strömungsgeschwindigkeiten ab, sind also problemabhängig. So können hierzu keine allgemeinen Aussagen gemacht werden. Unter Windows 98 und Borland Delphi/Object Pascal ergeben sich mit dem Finite-Volumen-Programm INSTATCP jedoch relativ kurze Rechenzeiten. Sie betragen z.B. auf einem 300 MHz-Pentium-Rechner

- für das in [Beispiel 1](#) (vgl. Abb. 1a - 1c) behandelte stationäre Problem einer Schornsteinkonstruktion unter Berücksichtigung der Rauchgasbewegung im Schornsteinzug für 100 h Simulationszeit 1084 s,
- für die Simulation einer Eisbahnunterfrierung nach [Beispiel 2](#) (vgl. Abb. 2a – 2c) für ein Jahr Simulationszeit 2.5 s,
- für das stationäre Problem der Durchdringung eines Stahlträgers unter einer Betondecke durch eine Glaswand von innen nach außen nach [Beispiel 3](#) (vgl. Abb. 3a – 3g) bei Durchrechnung bis zum stationären Zustand bis 100 h 18 s,

- für die rechnerische Simulation der Brandbeanspruchung eines dreiseitig nach der ETK 90 min beflamnten 12 x 24 cm² -Stahlbetonbalkens mit Berücksichtigung der Verdampfung nach [Beispiel 4](#) (vgl. Abb. 4a – 4c) 91 s und
- für 30 min Simulationszeitdauer bei der Reaktordruckdurchführung nach [Beispiel 5](#) (vgl. Abb. 5a - 5s) mit einer Brandbeanspruchung von 800 °C von der Ringraumseite 53 s.

8 Literatur

8.1 Grundlagen Rechenprogramm

- [1] Croft, D.R.; Liley, D.G.: Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations. London: Applied Science Publishers Ltd., 1977, 283 pages
- [2] Rudolphi, R.: Anspruchsvolle dreidimensionale Temperaturberechnungen bei instationären Randbedingungen. wksb 43 (1998), H. 41, S. 40-46
- [3] Müller, R.: Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen. Anwendung auf das Heizdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen. Dissertation, TU Clausthal, 1989, 130 Seiten, bzw. BAM-Forschungsbericht Nr. 185, 1992, 71 Seiten
- [4] Schwarz, H.R.: Methode der finiten Elemente. 3. Auflage. Stuttgart: B.G. Teubner, 1991, 435 Seiten
- [5] Schwarz, H.R.: FORTRAN-Programme zur Methode der finiten Elemente. 3. Auflage. Stuttgart: B.G. Teubner, 1991, 223 Seiten
- [6] Schwarzott, W.: Ein Elementverfahren zum Berechnen von Temperaturfeldern. Forsch.Ing.Wesen 38(1972) Nr. 6, S. 165-171
- [7] Liebau, F.; Rudolphi, R.: Berechnung von Temperatur- und Wärmestromverteilungen mittels algebraischer Mehrgittermethoden auf der Basis der Methode der finiten Volumen bei allgemeiner Triangulierung mit Winkeln über 90°. BAM-Forschungsbericht Nr. 227, 1998, 53 Seiten
- [8] Liebau, F.; Rudolphi, R.: Das Verfahren von Gear mit BICG-Löser. Grundlagen, Algorithmen und Anwendungen auf Temperaturberechnungen aus dem Brand- und Wärmeschutz. BAM-Forschungsbericht Nr. 247, 2000, 60 Seiten

8.2 Umfeld Berechnung

- [9] Liersch, K.W.: Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen. Band 1: Vorhangfassaden. Bauphysikalische Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes. Wiesbaden/Berlin: Bauverlag 1981, 154 Seiten
Band 4: Dächer; Anwendungstechnische Grundlagen. Wiesbaden/Berlin: Bauverlag 1990, 272 Seiten
- [10] Wendehorst: Bautechnische Zahlentafeln. 27. Auflage. Stuttgart: B.G. Teubner, 1996. Siehe das von R. Jenisch bearbeitete Kapitel "Bauphysik", Abschnitt 1.3 "Wärmebrücken"

8.3 Wärmebrückenprobleme u.a.

- [11] Rudolphi, R.; Müller, R.: Bauphysikalische Temperaturberechnungen in FORTRAN. Band 1: Zwei- bzw. dreidimensionale stationäre Probleme des Wärmeschutzes. Stuttgart: B.G. Teubner, 1985, 227 Seiten
- [12] Rudolphi, R.; Müller, R.: Logiciel STAT3DD. Calculs FORTRAN des champs de températures en bi- ou en tridimensionnel à l'aide d'éléments cubiques en régime stationnaire sur PC. Accompagné du logiciel STAT3DD en FORTRAN sur CD-ROM, de 4 exemples d'application avec calculs complets sur CD-ROM et de 29 figures. Fribourg Suisse (Freiburg in der Schweiz): Editions Universitaires (Universitätsverlag), 2000, 102 Seiten

- [13] Kasper, F.-J.; Müller, R.; Rudolphi, R.: Numerische Untersuchungen zum Tauwasserrisiko von Mauerwerksaußenwinkeln und Ecken in Gebäuden. Schadenprisma (17) 1988, Nr. 3, S. 43-52, Nr. 4, S. 53-59, bzw. BAM-Forschungsbericht Nr. 168, 1990, 53 Seiten
- [14] Müller, R.; Rudolphi, R.; Liersch, K.W.: Numerische Untersuchung der Wärmedämmung profilierter Dämmplatten für Wellplattendächer bei stationären Randbedingungen. wksb 26 (1989), H. 26, S. 27-31
- [15] Rudolphi, R.; Kownatzki, B.: PC-Computersimulation von Tauwasserschäden und Wärmebrückenwirkungen mit Dreiecks- und Rechteckelementen. Teil 1: wksb 40, Neue Folge (1995), H. 36, S. 35-42
Teil 2: wksb 41 (1996), H. 37, Titelbild (Schornstein-Wand-Konstruktion), S. 2-11
- [16] Berger, R.; Cziesielski, E.; Müller, R.; Rudolphi, R.: 3D-Wärmebrückenberechnungen bei hinterlüfteten Außenwandkonstruktionen zur Reduzierung der Energieverluste im Bereich der Verankerungskonstruktionen. wksb 42, Neue Folge (1997), H. 39, S. 7-21
- [17] Käser, R.: Reportage: Sommerlicher Wärmeschutz, It's cool. TROCKENBAU AKUSTIK (1997), H. 3, 4 Seiten

8.4 Hausschornsteine

- [18] Müller, R.; Rudolphi, R.: Zur numerischen Ermittlung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Hausschornsteinen. Bauphysik 11 (1989), H. 6, Titelseite sowie S. 211-218
- [19] Müller, R.; Rudolphi, R.: Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6 mit abgedruckten FORTRAN-Sourcelistings sowie unter MS-DOS lauffähigen Programmen und kompletten Anwendungsbeispielen auf Diskette. BAM-Forschungsbericht Nr. 159, Mai 1989, 144 Seiten

8.5 Brandschutzproblemstellungen

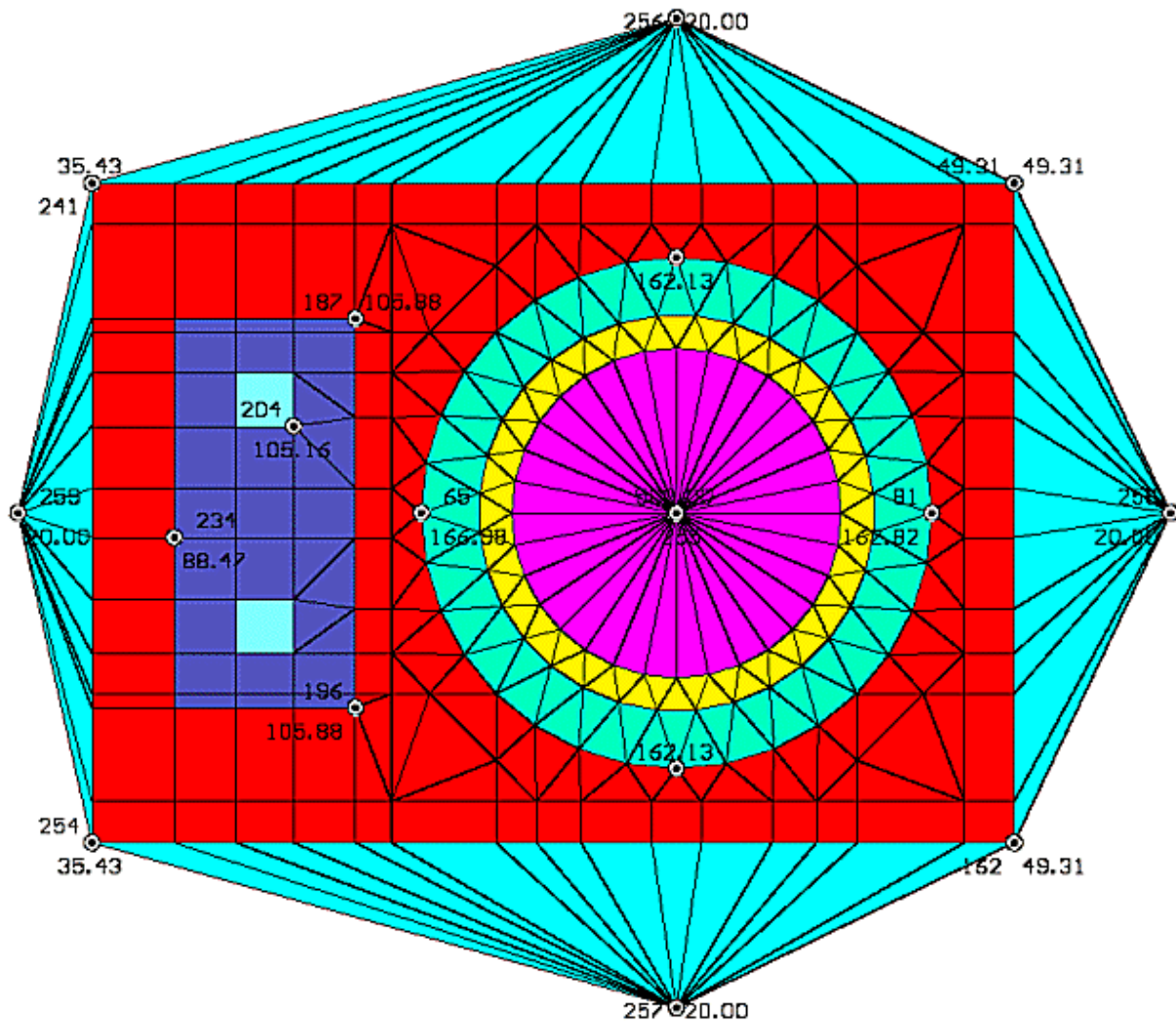
- [20] Ehm, H.: Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen. Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, 1966
- [21] Kordina, K.; Ehm, H.; von Postel, R.: Erwärmungsvorgänge an balkenartigen Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 230. Berlin : Wilhelm Ernst & Sohn, 1975, 118 Seiten
- [22] Rudolphi, R.: Zur Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen. Dissertation, TU Berlin, 1979, 199 Seiten bzw. BAM-Forschungsbericht Nr. 72, 1980, 127 Seiten
- [23] Rudolphi, R.; Müller, R.: ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz. Mit abgedrucktem ALGOL-Sourcelisting sowie kompletten Anwendungsbeispielen. BAM-Forschungsbericht Nr. 74, 1980, 163 Seiten
- [24] Paasch, S.; Müller, R.; Rudolphi, R.; Schriever, R.: Numerische Ableitung von thermischen Stoffeigenschaften oder Größen aus Brandprüfungen an unbedeckten und bedeckten Stahlstützen - Möglichkeiten und Grenzen - BAM-Forschungsbericht Nr. 236, 2000, 143 Seiten

8.6 Sonderprobleme

- [25] Cziesielski, E.: Gutachtliche Stellungnahme Nr. VR 1087 vom 12.1.79 zur Kunst-
eisbahn des Sport- und Erholungszentrums Berlin, Institut für Baukonstruktionen
und Festigkeit, TU Berlin, 16 Seiten u. 5 Beilagen
- [26] Rohrmann, R.G.; Rudolphi, R.: Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen-
und Brückenbeläge. BAM-Forschungsbericht Nr. 53, Oktober 1978, 68 Seiten
- [27] Herold, Ch.; Müller, R.; Rudolphi, R., Vater, E.-J.: U-Bahn-Abdichtungsschäden
bei Sonneneinstrahlung. Vorausberechnung und experimentelle Simulation.
Tiefbau/ Ingenieurbau/Straßenbau 25 (1983), H. 3, S. 101-107
- [28] Ghazi Wakili, K.; Frank, Th.; Baumgartner, Th.: Erdwärmennutzung für Raumklima-
tisierung; Rechenmodell für Luft/ Erdregister. In: Bericht zum 7. Schweizerischen
Status-Seminar am 17./18. September 1992 in der ETH-Zürich zur Energiefor-
schung im Hochbau, S. 147-156. Dübendorf: Eidgenössische Materialprüfungs-
und Forschungsanstalt (EMPA)/ Koordinierungsstelle für Wärmeforschung im
Hochbau (KWH), Sept. 1992

9 Beispiel 1: Schornsteinkonstruktion

BAM - INSTATGR - SCHIED1A - 14.12.98 14:54:28 - NKN = 259



WAERMEBRUECKE3D, MANTELST SJH20/2ROHRE, 100ORHOL, G, SCHIED1A.DA-E=1, TAU= 100.00 h

K= 255, NKS=2072, X=0.00000, Y=0.00000, Z=0.00000 m, T=500.0 °C








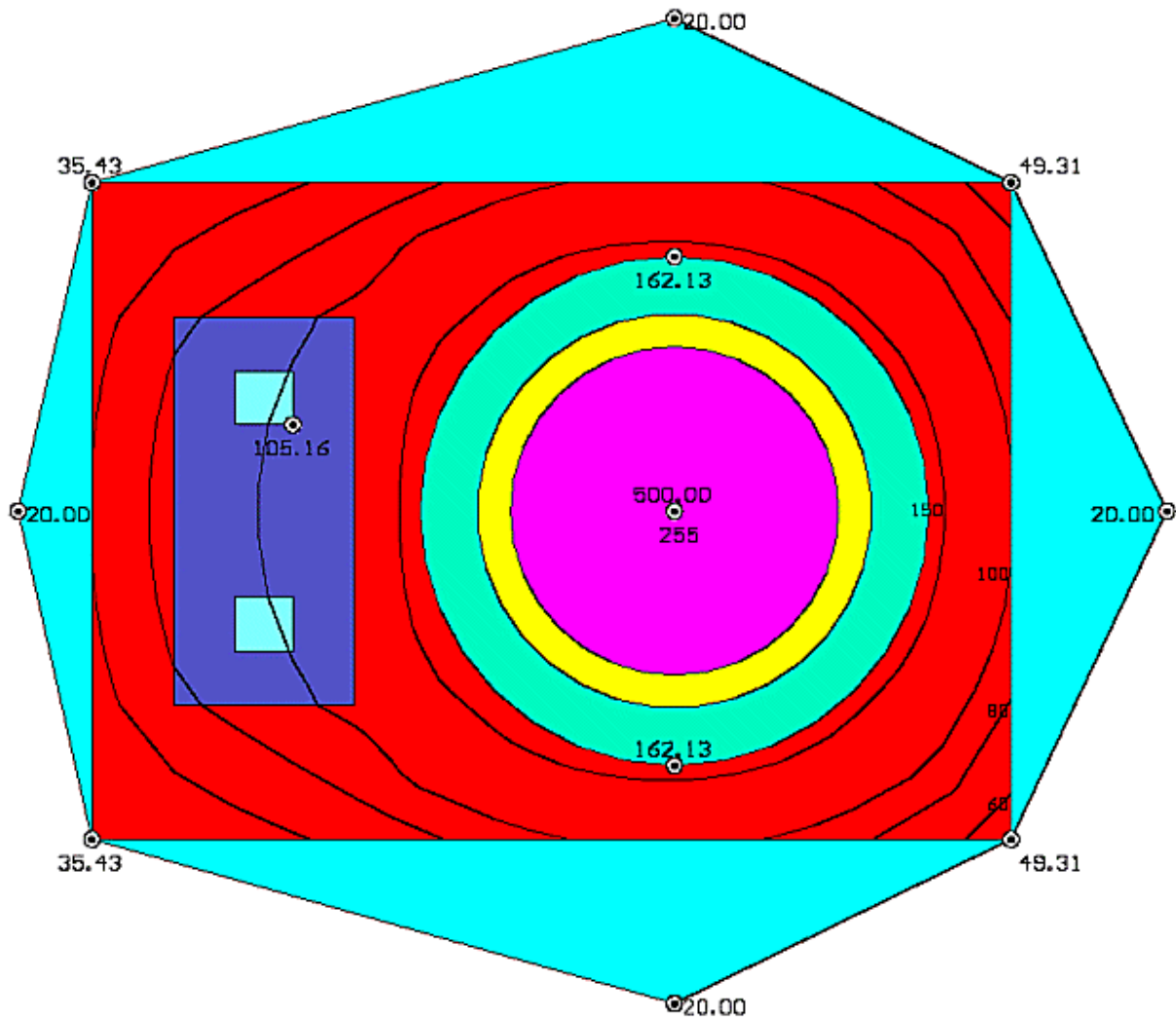
	2, WUE_AUSSEN	--> AL=5.880 W/(m²K)
	5, MANTELSTEIN, LAM	--> LA=0.450 W/(m K)
	8, DAEMMSTOFF, LAM	--> LA=FK(T)
	11, SCHAMOTTE, LAM	--> LA=1.100 W/(m K)
	14, LUFT, LAM	--> LA=FK(T)
	17, SCHAUMSTOFF, LAM	--> LA=0.035 W/(m K)
	20, ABGAS, LAM	--> LA=FK(T)

Abb. 1a: Schornsteinkonstruktion – Elementaufteilung der Knotenebene 1 (Frontebene)

BAM - INSTATGR - SCHIED1A - 14.12.98 14:42:45 - NKN = 259



WAERMEBRUECKE3D, MANTELST SJH20/2ROHRE, 1000RHOL, G, SCHIED1A.DA-E=1, TAU= 100.00 h

K= 204, NKS=2072, X=-0.05250, Y=-0.23250, Z=0.00000 m, T=105.1 °C

2	WUE AUSSEN	--> AL=5.880 W/(m²K)
5	MANTELSTEIN, LAM	--> LA=0.450 W/(m K)
8	DAEMMSTOFF, LAM	--> LA=FK(T)
11	SCHAMOTTE, LAM	--> LA=1.100 W/(m K)
14	LUFT, LAM	--> LA=FK(T)
17	SCHAUMSTOFF, LAM	--> LA=0.035 W/(m K)
20	ABGAS, LAM	--> LA=FK(T)

Abb. 1b: Schornsteinkonstruktion – Isothermenverlauf in Knotenebene 1 zum Zeitpunkt 100 h

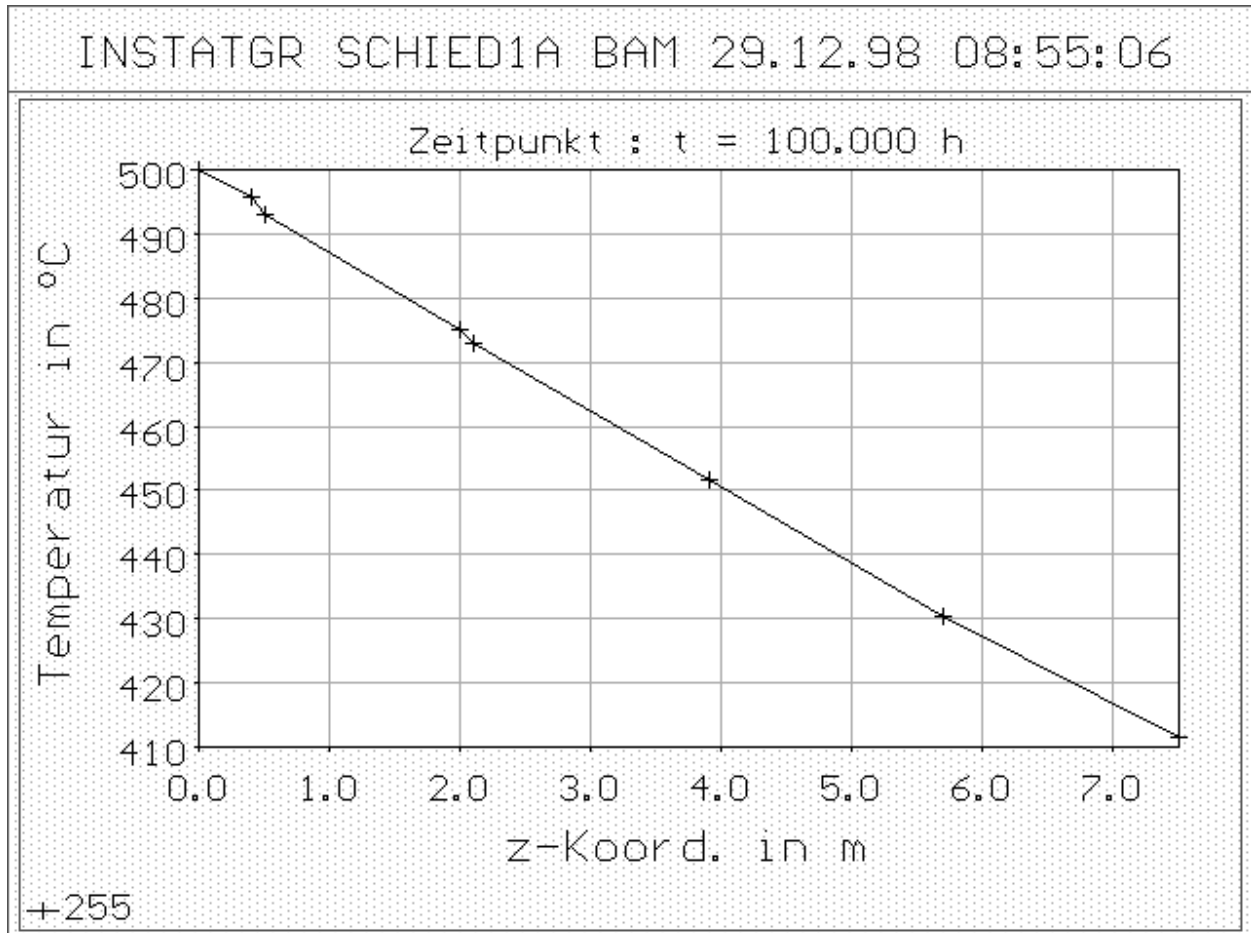


Abb. 1c: Schornsteinkonstruktion – Im Schornsteinzug unter Berücksichtigung der Rauchgasbewegung errechneter Temperaturverlauf über der z-Achse von unten nach oben (0 ... 7,5 m, 8 Knotenebenen)

10 Beispiel 2: Simulation der Unterfrierung einer Kunsteisbahn

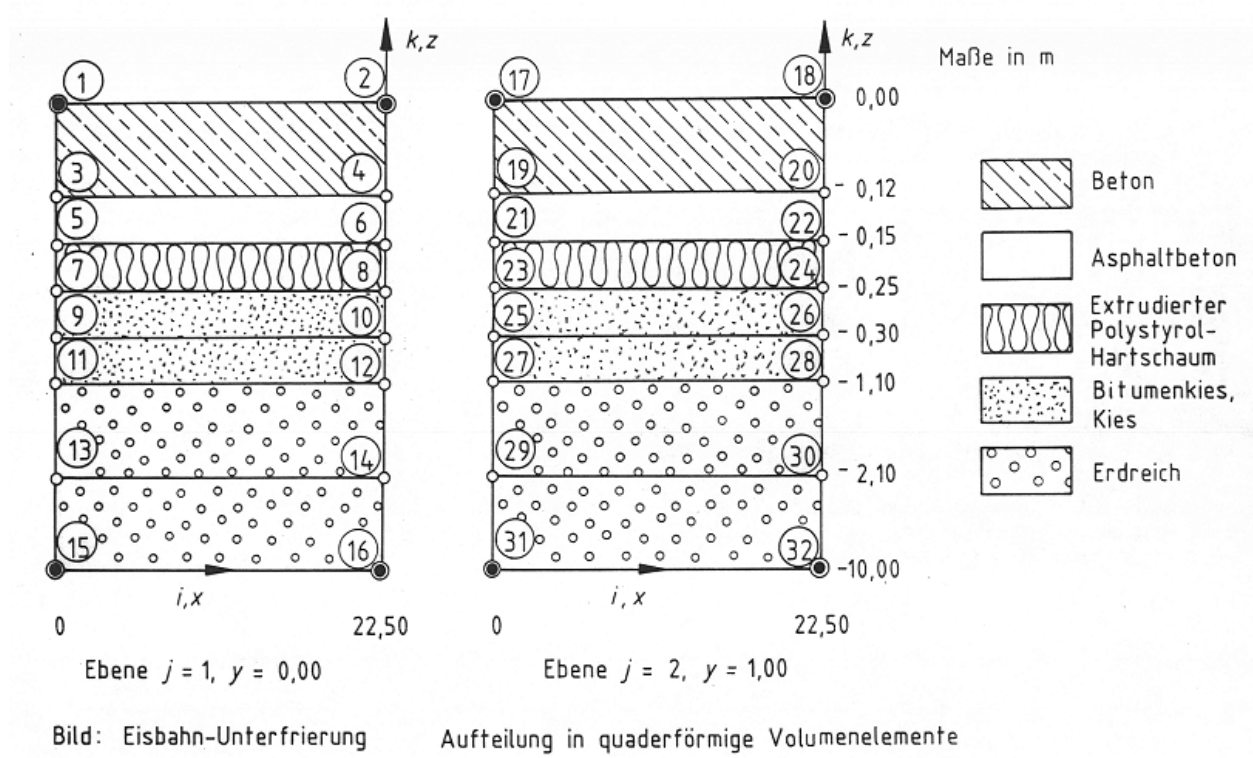
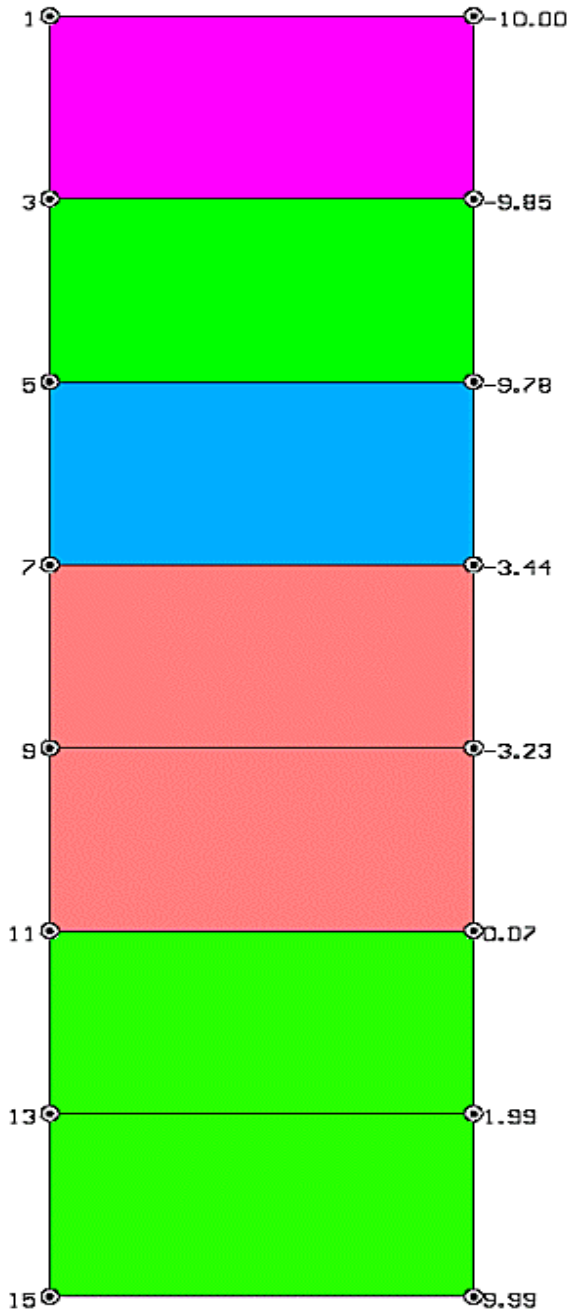


Abb. 2a: Simulation der Unterfrierung einer Kunsteisbahn – Elementaufteilung

BAM - INSTATGR - EISBRE1J - 29.12.98 09:05:48 - NKN = 17



EISBAHNUNTERFRIERUNG MIT WAERMED/KIESKOFFER, 1 J, EISBRIJ.DAT-E=1, TAU= 215.00 d

K=11, NKS=34, X=1.10000, Y=0.00000, Z=0.00000 m, T=0.07 °C

1	STAHLBETON	LAM	--> LA=2.330 W/(m K)
4	ASPHALT-BETON	LAM	--> LA=1.370 W/(m K)
7	EXTR. POLYST.-HARTSCH.	LAM	--> LA=0.046 W/(m K)
10	BITUMENKIES, KIES	LAMO	--> LA=0.700 W/(m K)
18	ERDREICH	LAMO	--> LA=1.400 W/(m K)

Abb. 2b: Simulation der Unterfrierung einer Kunsteisbahn – Unter der Kunsteisbahn nach 215 Tagen errechnete Temperaturverteilung (normierte Darstellung)

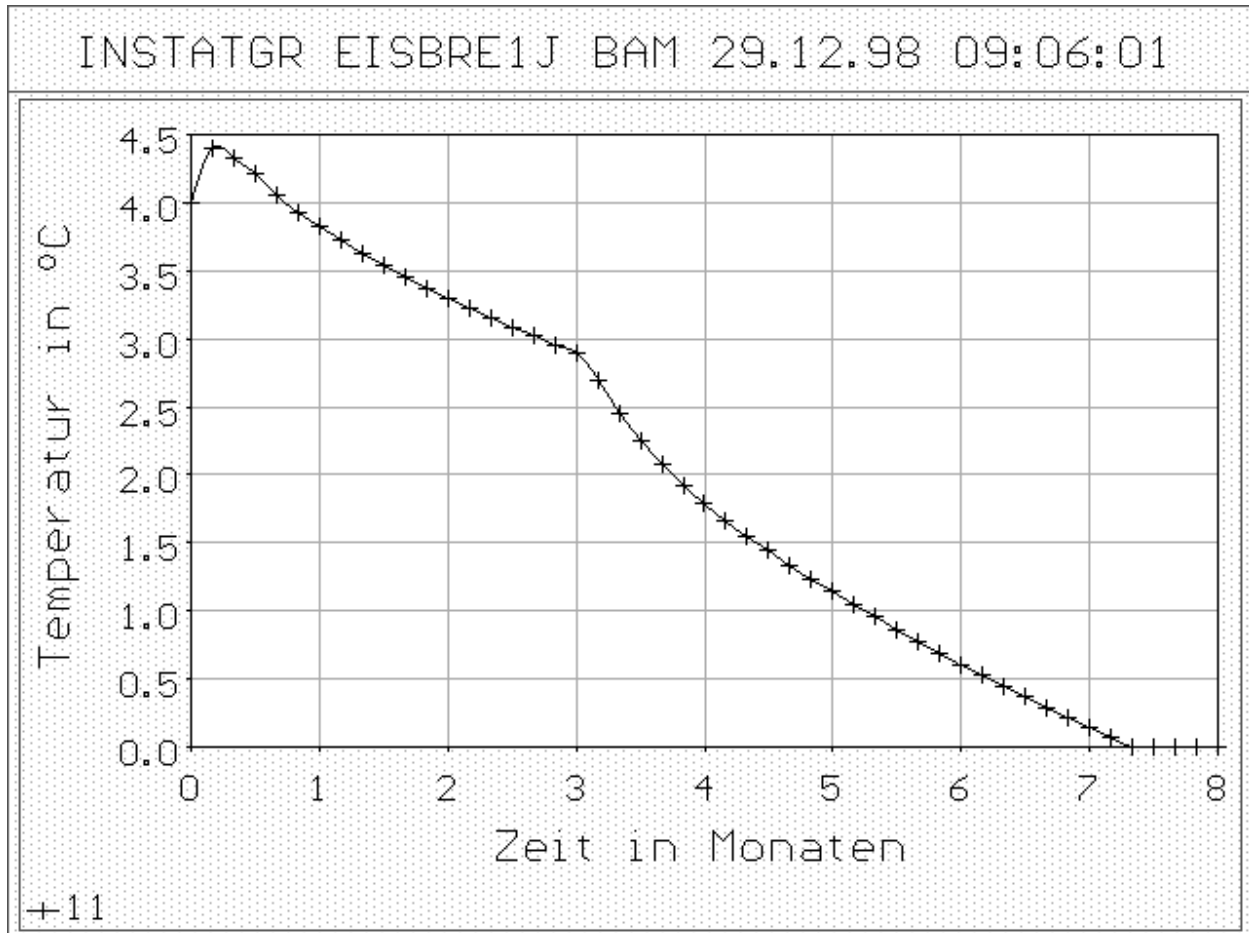


Abb. 2c: Simulation der Unterfrierung einer Kunsteisbahn – An der Unterkante des Kieskoffers in Knoten 11 über 7 Monate errechneter Temperatur- Zeitverlauf

11 Beispiel 3: Durchdringung eines Stahlträgers unter einer Betondecke durch eine Glaswand

BAM - INSTATGR - TR100H - 29.12.98 09:20:33 - NKN = 126

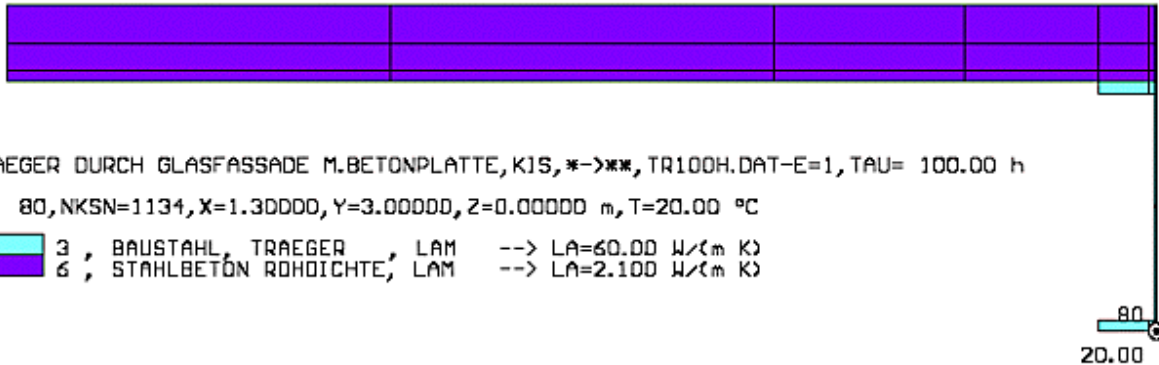


Abb. 3a: Durchdringung eines Stahlträgers unter einer 20 cm dicken Betondecke durch eine Glaswand von innen nach außen (9 Knotenebenen) – Elementaufteilung der Knotenebene 1 auf der Innenraumseite in maßstäblicher Darstellung ohne Wärmeübergangselemente

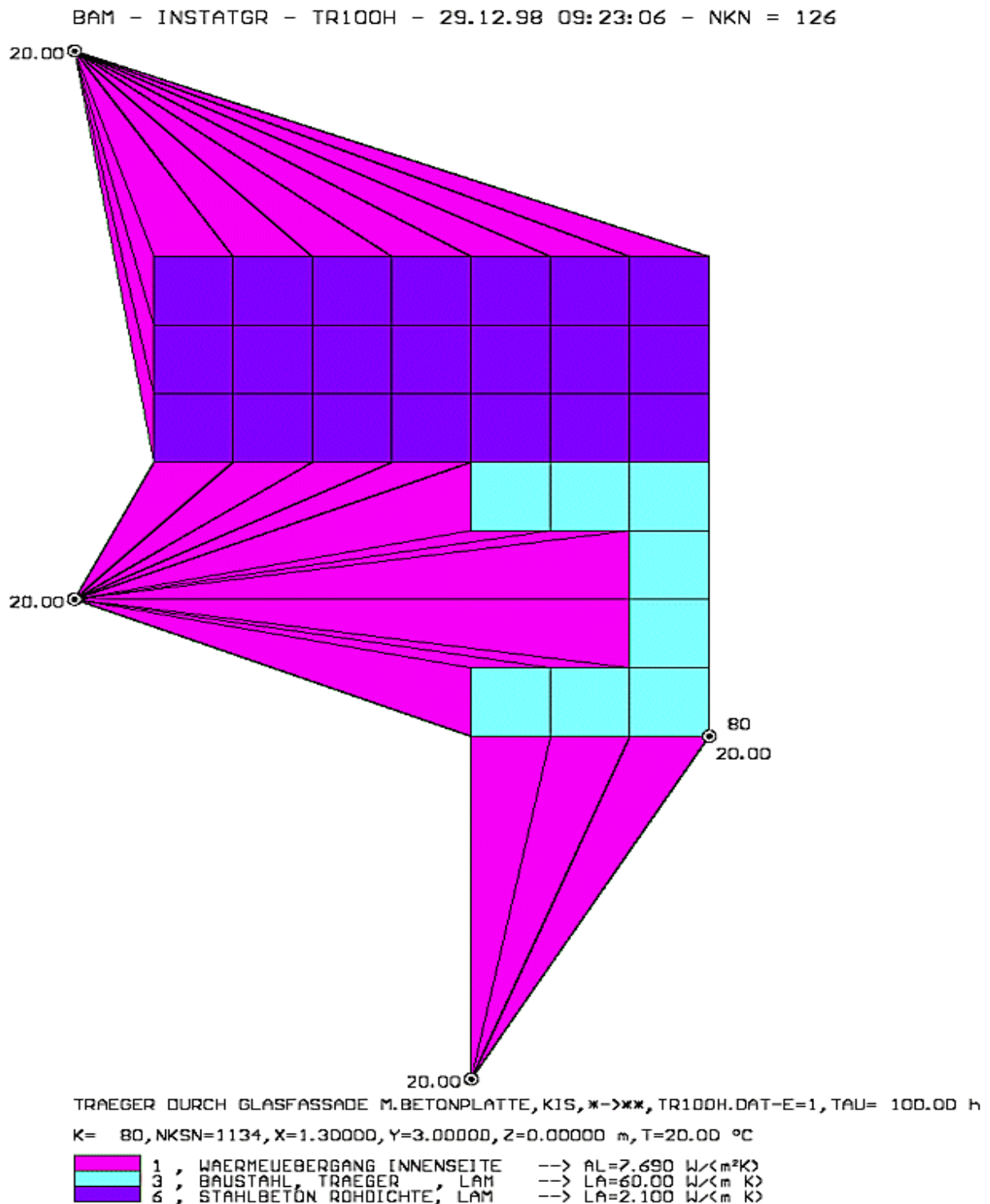
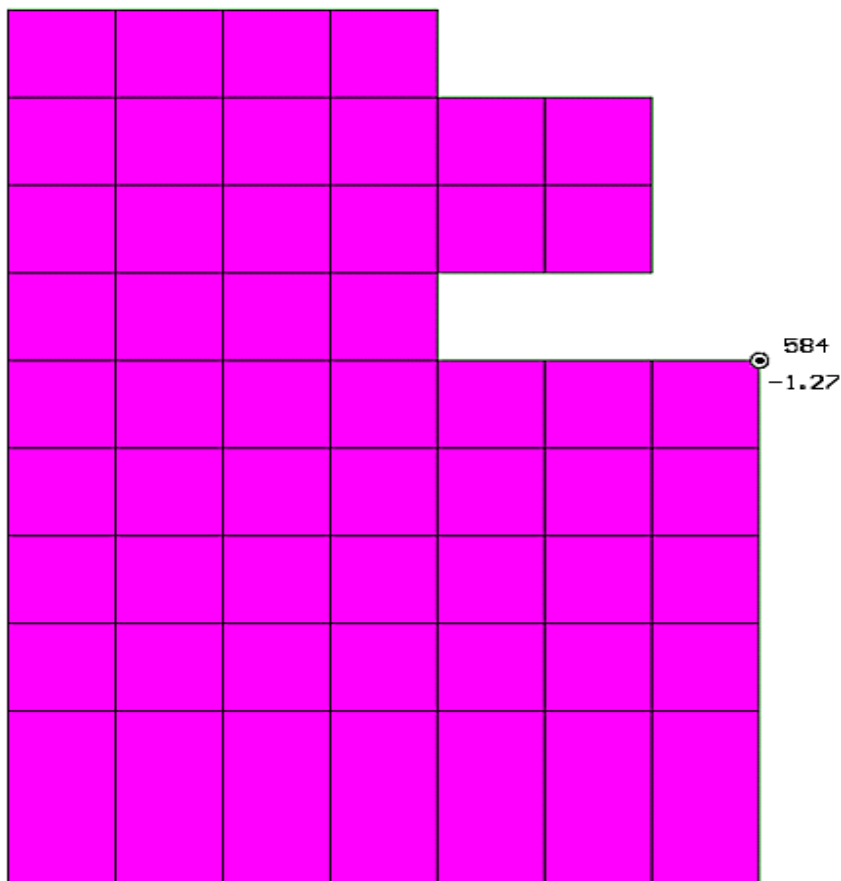
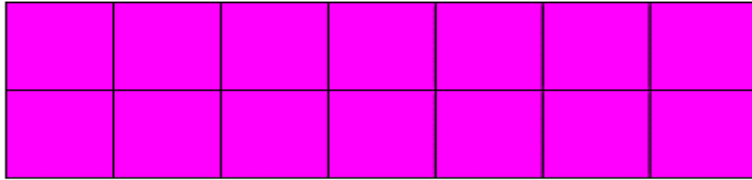


Abb. 3b: Durchdringung eines Stahlträgers unter einer 20 cm dicken Betondecke durch eine Glaswand von innen nach außen (9 Knotenebenen) – Elementaufteilung der Knotenebene 1 auf der Innenraumseite in normierter Darstellung mit Wärmeübergangselementen

BAM - INSTATGR - TR100H - 29.12.98 09:27:41 - NKN = 126



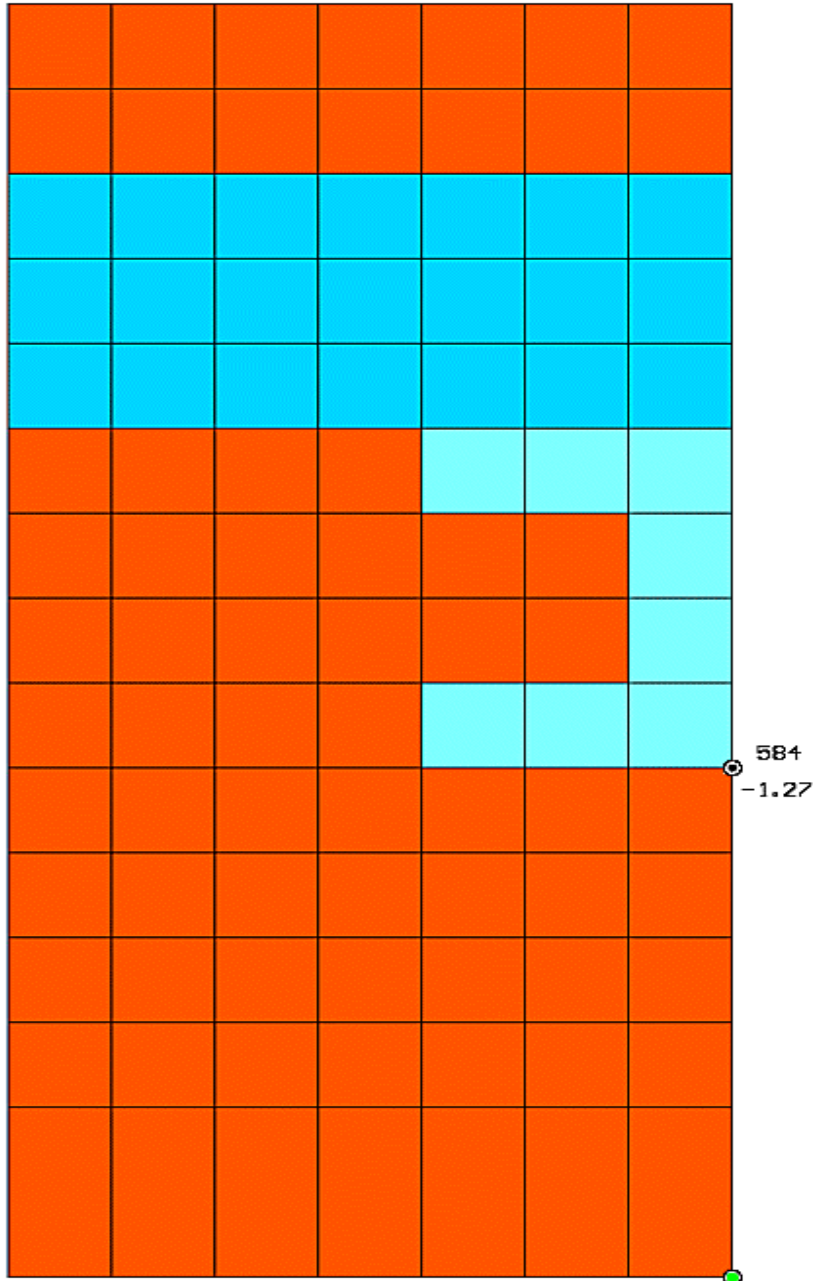
TRAEGER DURCH GLASFASSADE M.BETONPLATTE, KIS, *->**, TR100H.DAT-E=5, TAU= 100.00 h

K= 584, NKS=1134, X=1.30000, Y=3.00000, Z=3.96000 m, T=-1.27 °C

 1 , WAERMEUEBERGANG INNENSEITE --> AL=7.690 W/(m²K)

Abb. 3c: Durchdringung eines Stahlträgers unter einer 20 cm dicken Betondecke durch eine Glaswand von innen nach außen (9 Knotenebenen) – Wärmeübergangselemente auf der Innenoberfläche der Glaswandebene (Knotenebene 5) in normierter Darstellung

BAM - INSTATGR - TR100H - 29.12.98 09:24:14 - NKN = 126



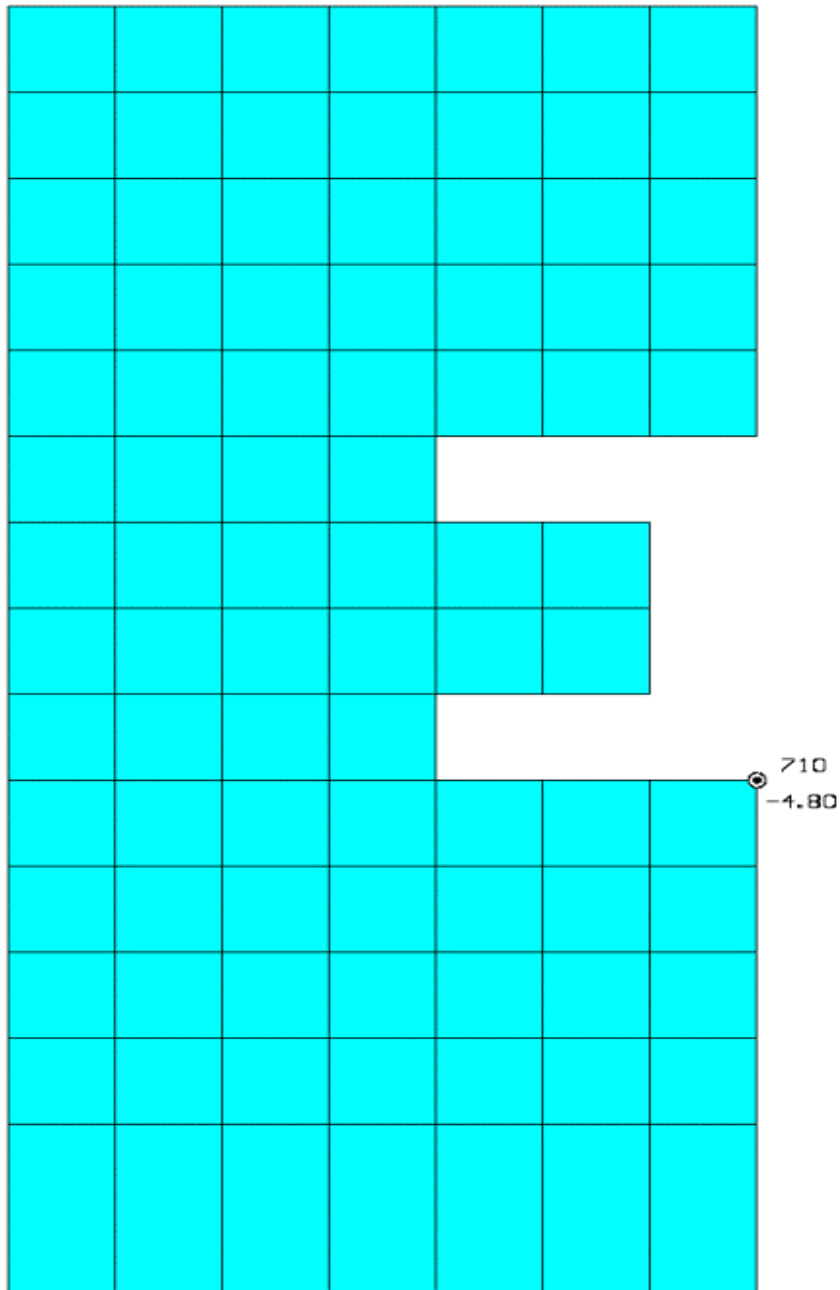
TRAEGER DURCH GLASSASSADE M.BETONPLATTE, KIS, *->***, TR100H.DAT-E=5, TAU= 100.00 h

K= 624, NKS=1134, X=1.95000, Y=3.00000, Z=3.96000 m, T=10.96 °C

3	BAUSTAHL, TRAEGER	LAM	--> LA=60.00 W/(m K)
9	MF-PLATTE	LAM	--> LA=0.040 W/(m K)
12	VERGLASUNG, K-WERT 2.0	LAM	--> LA=0.120 W/(m K)

Abb. 3d: Durchdringung eines Stahlträgers unter einer 20 cm dicken Betondecke durch eine Glaswand von innen nach außen (9 Knotenebenen) – Elementaufteilung der Glaswandebene (Knotenebene 5, Dicke 4 cm, k-Wert 2,0 W/(m²K)) in normierter Darstellung

BAM - INSTATGR - TR100H - 29.12.98 09:28:00 - NKN = 126



TRAEGER DURCH GLASFASSADE M.BETONPLATTE, KIS, *->***, TR100H.DAT-E=6, TAU= 100.00 h
K= 710, NKS=1134, X=1.30000, Y=3.00000, Z=4.00000 m, T=-4.80 °C


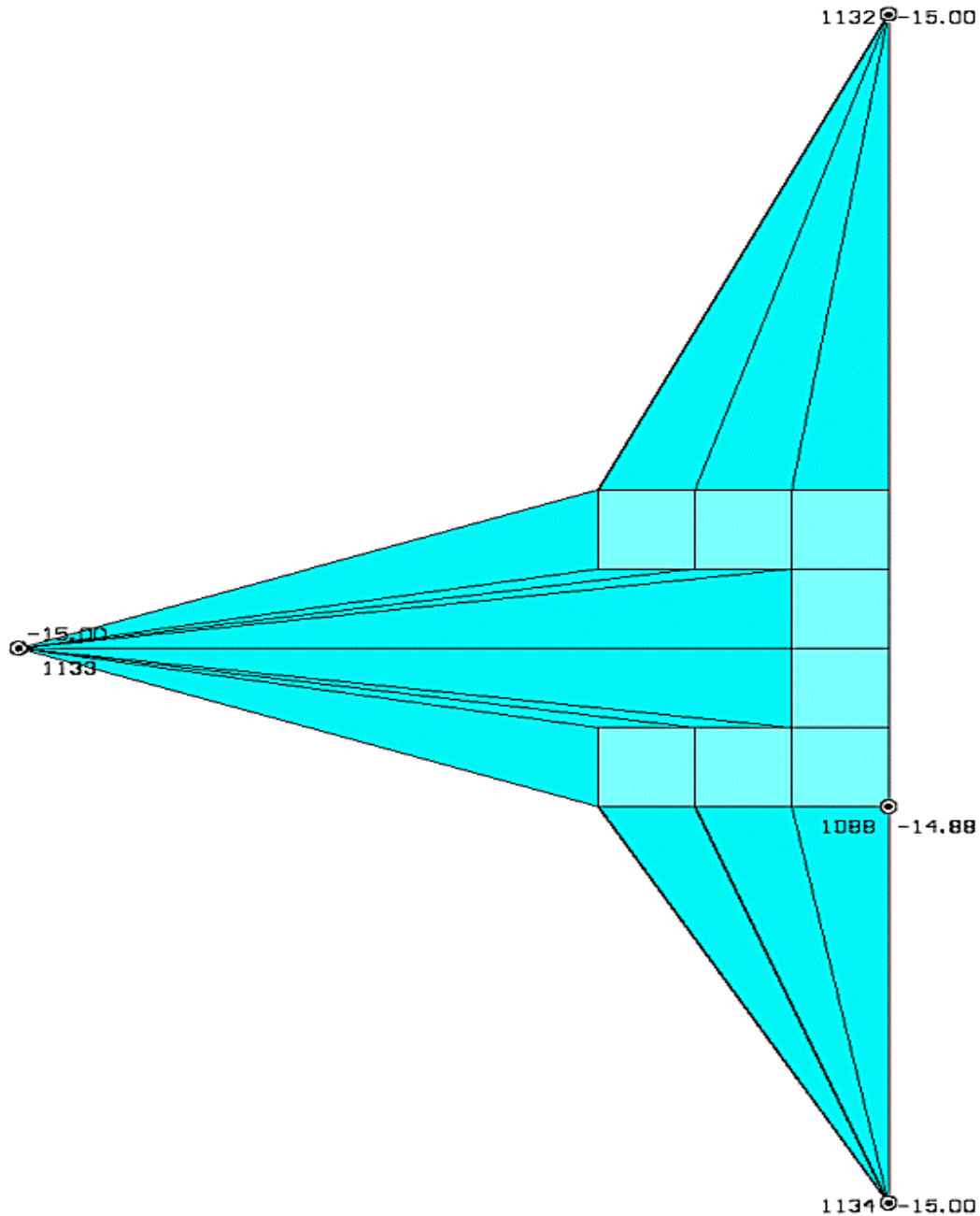
 2 , WAERMEUEBERGANG AUSSENSEITE --> AL=25.00 W/(m²K)

Abb. 3e: Durchdringung eines Stahlträgers unter einer 20 cm dicken Betondecke durch eine Glaswand von innen nach außen (9 Knotenebenen) – Wärmeübergangselemente auf der Außenoberfläche der Glaswandebene (Knotenebene 6) in normierter Darstellung

BAM - INSTATGR - TR100H - 04.01.99 08:17:49 - NKN = 126



TRAEGER DURCH GLASFASSADE M.BETONPLATTE, K1S, *->**, TR100H.DAT-E=9, TAU= 100.00 h
K=1088, NKS=1134, X=1.30000, Y=3.00000, Z=5.00000 m, T=-14.88 °C

	2 ; WAERMEUEBERGANG AUSSENSEITE	--> AL=25.00 W/(m²K)
	3 ; BAUSTAHL, TRAEGER , LAM	--> LA=60.00 W/(m K)

Abb. 3f: Durchdringung eines Stahlträgers unter einer 20 cm dicken Betondecke durch eine Glaswand von innen nach außen (9 Knotenebenen) – Elementaufteilung der Knotenebene 9 (letzte) auf der Kaltseite in normierter Darstellung mit Wärmeübergangselementen

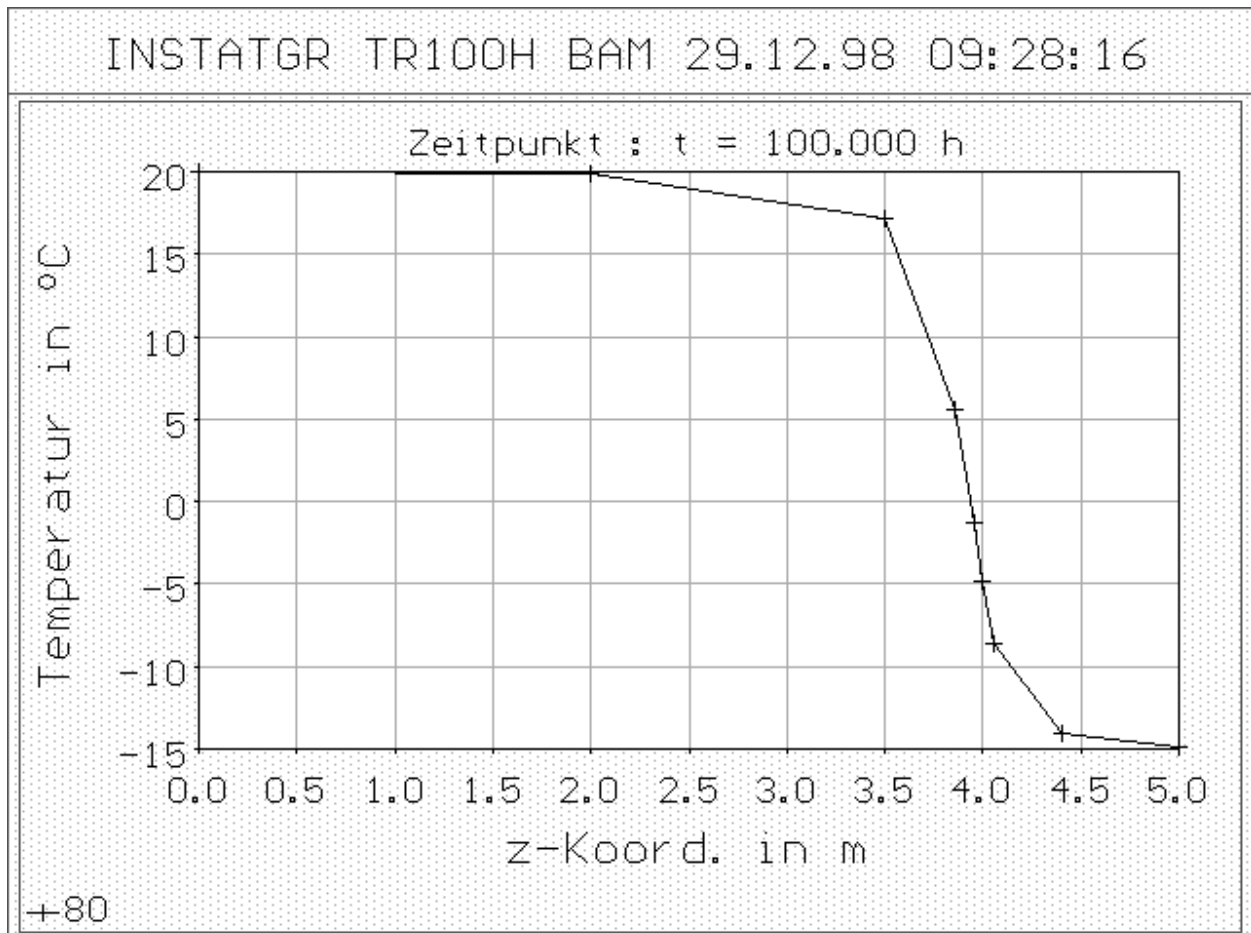


Abb. 3g: Durchdringung eines Stahlträgers unter einer 20 cm dicken Betondecke durch eine Glaswand von innen nach außen (9 Knotenebenen) – In der Mitte des Unterflansches über 5 m Trägerlänge von innen nach außen errechneter Temperaturverlauf (Knoten 80)

12 Beispiel 4: Dreiseitig nach der ETK beflammtter 12 x 24 cm² Stahlbetonbalken mit Berücksichtigung der Verdampfung bei 100 °C

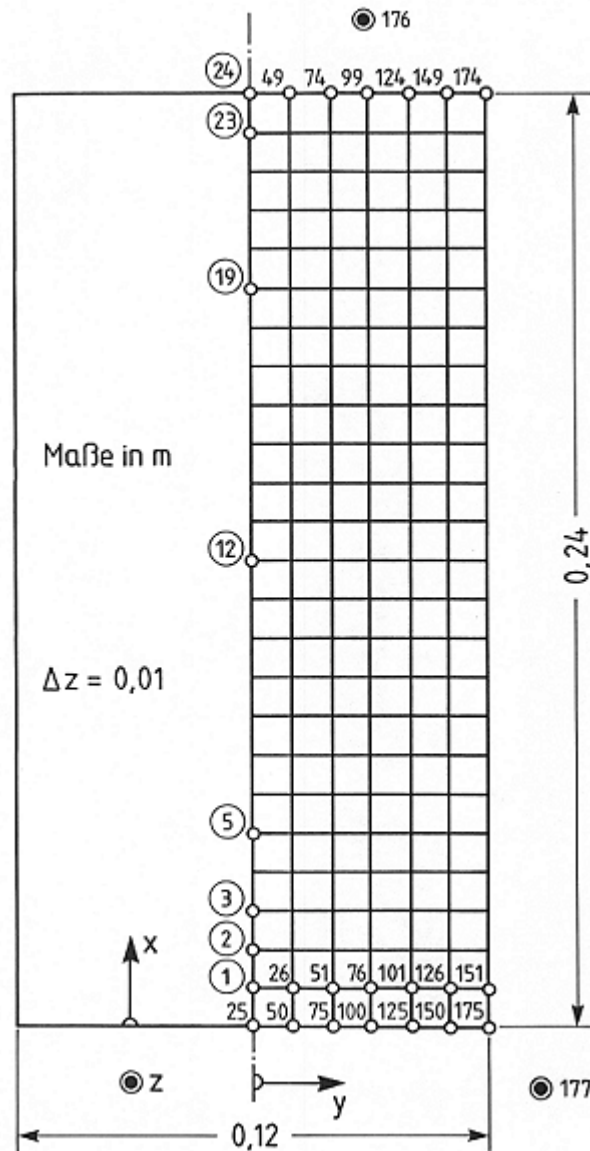


Abb. 4a: Dreiseitig nach der ETK beflammtter 12 x 24 cm² Stahlbetonbalken mit Berücksichtigung der Verdampfung bei 100 °C – Elementaufteilung der 1. von insgesamt 2 Knotenebenen

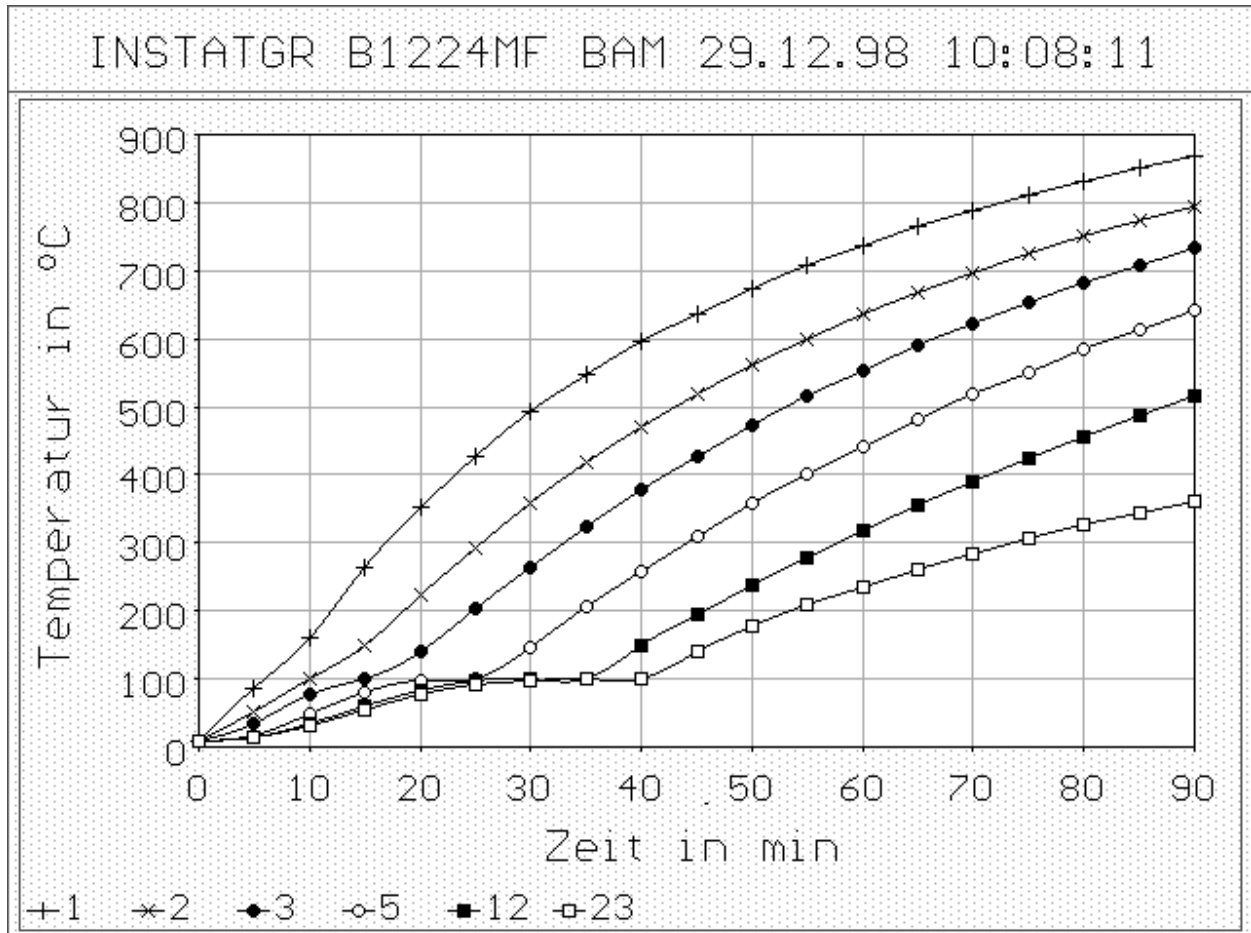


Abb. 4b: Dreiseitig nach der ETK beflammt 12 x 24 cm² Stahlbetonbalken mit Berücksichtigung der Verdampfung bei 100 °C – An einzelnen Knotenpunkten der Symmetrieachse errechnete Temperatur-Zeit-Kurven

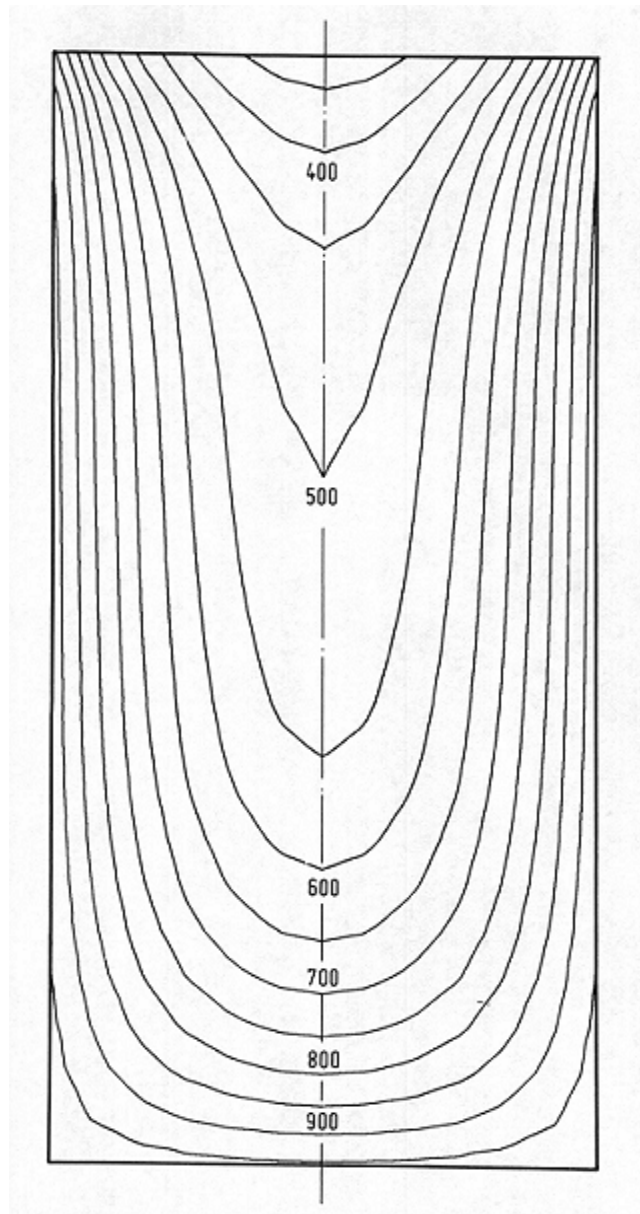


Abb. 4c: Dreiseitig nach der ETK beflamelter 12 x 24 cm² Stahlbetonbalken mit Berücksichtigung der Verdampfung bei 100 °C – Isothermenverlauf zum Zeitpunkt 90 Minuten

13 Beispiel 5: Reaktordruckdurchführung

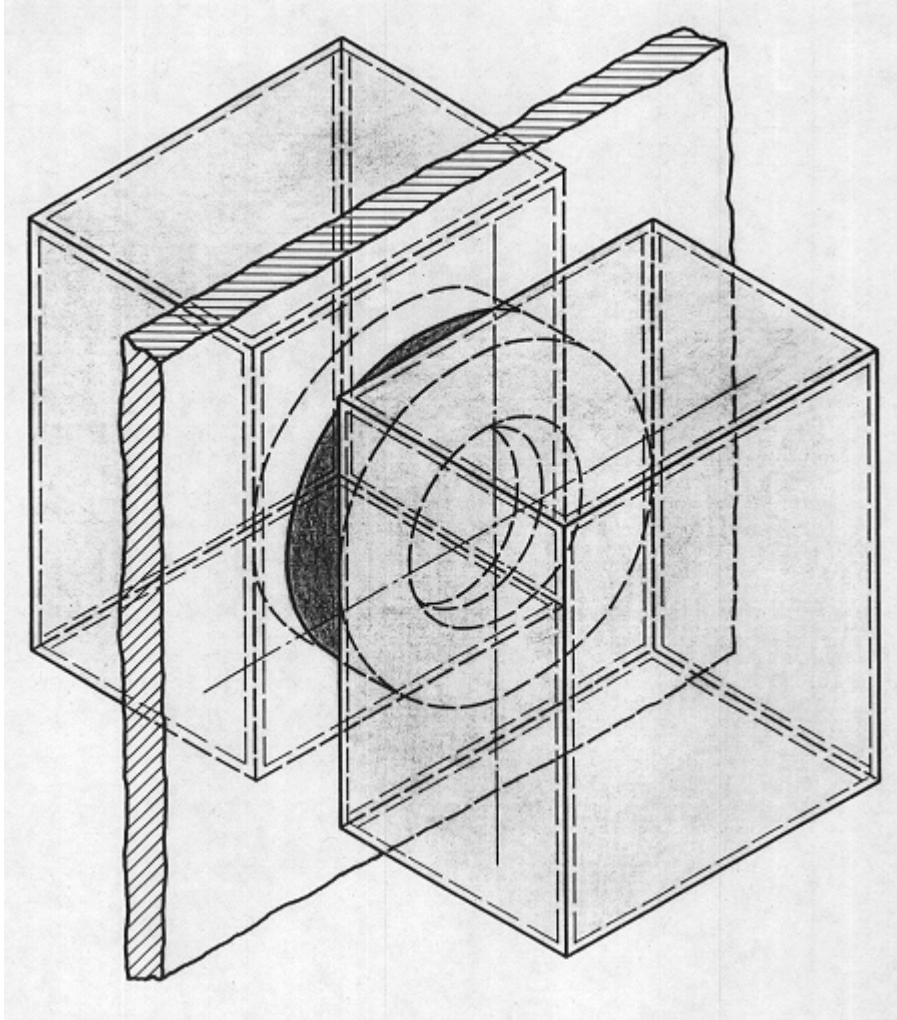


Abb. 5a: Reaktordruckdurchführung – Perspektivische Darstellung

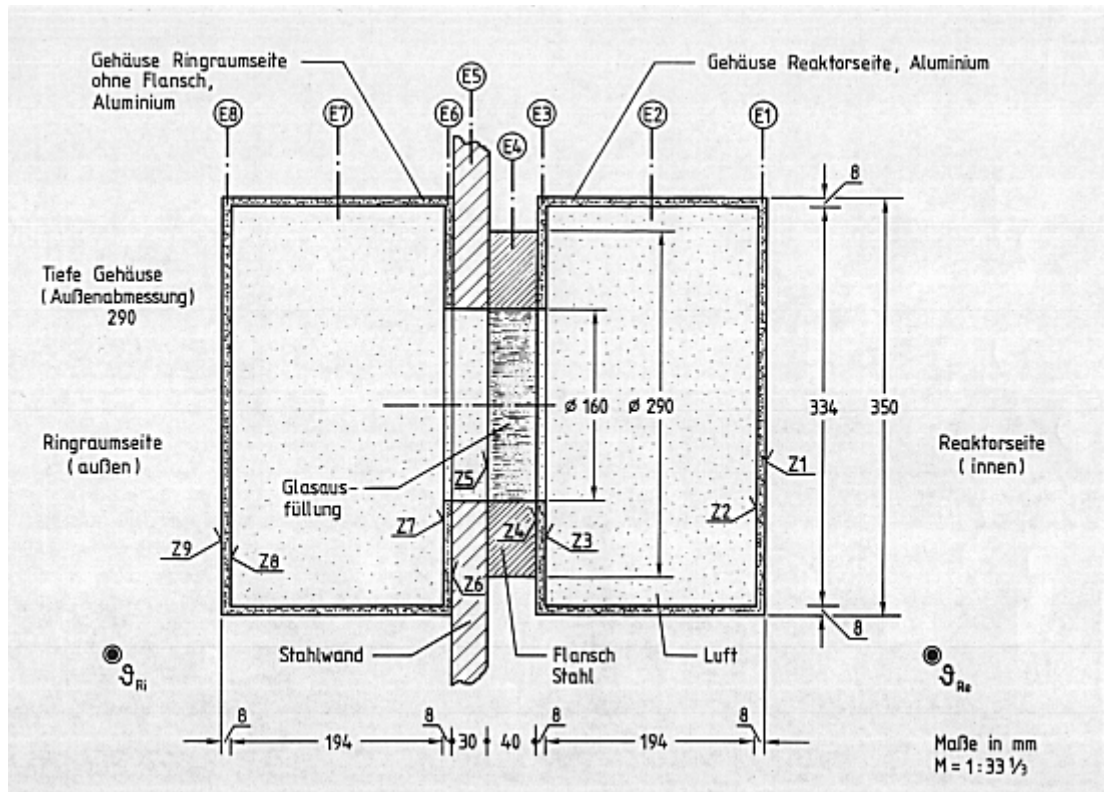


Abb. 5b: Reaktordruckdurchführung – Schnittbild mit den 8 eingezeichneten Schichten (E) und 9 Knotenebenen (Z)

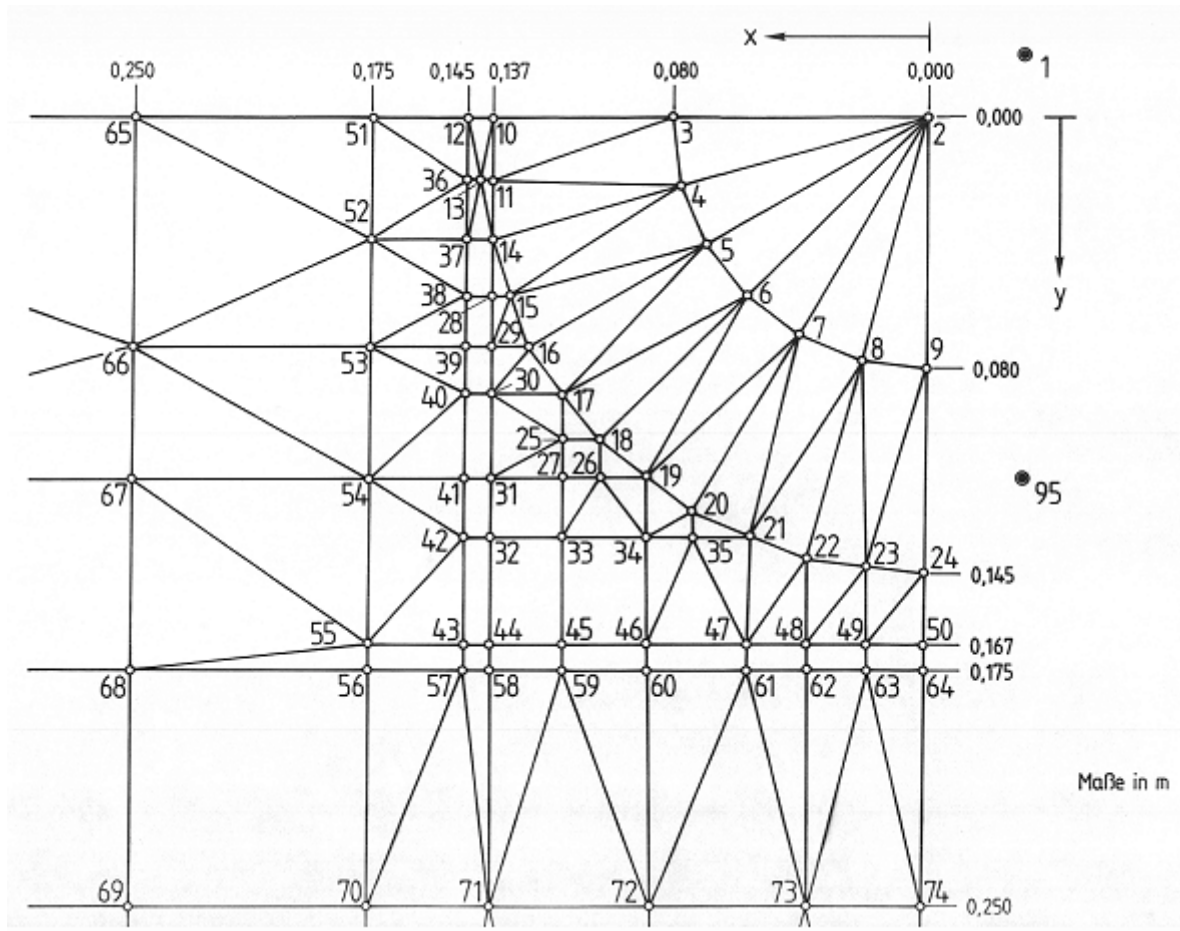
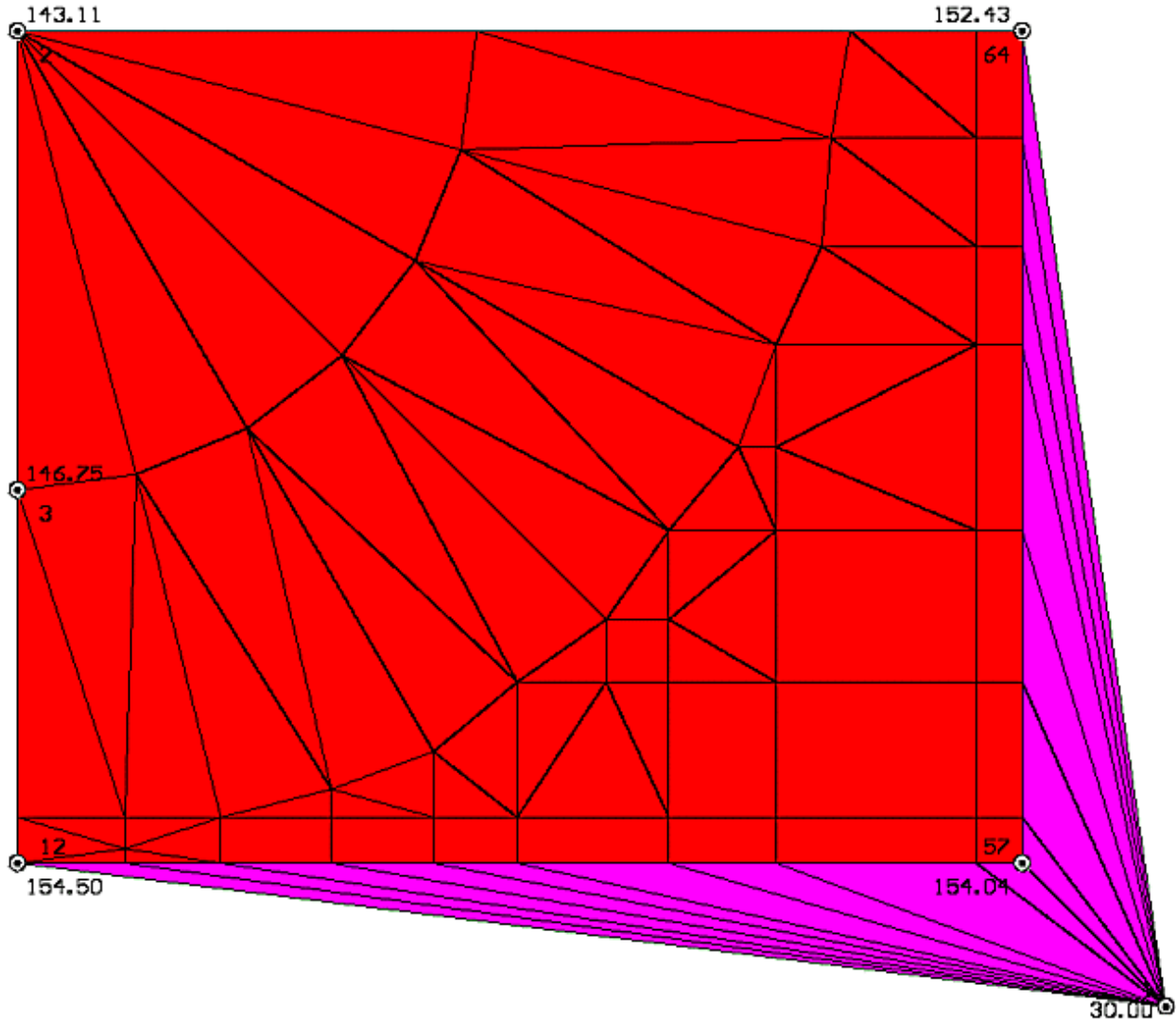


Abb. 5c: Reaktordruckdurchführung – Teilausschnitt der Elementaufteilung der Frontebene

13.1 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 1

BAM - INSTATGR - DR30MIN - 29.12.98 11:06:15 - NKN = 95



REAKTORDRUCKDURCHFUEHRUNG, SIMULATIONSZEITD.30MIN, DR30MIN.DAT-E=1, TAU= 1800.00 s

K= 1, NKS=855, X=0.17000, Y=0.20000, Z=0.00000 m, T=30.00 °C

1, WAERMEUEBERGANG REAKTORSEITE --> AL=8.000 W/(m²K)
 6, ALUMINIUM, GEHAEUSE REAKTORSEITE, LAM --> LA=221.0 W/(m K)

Abb. 5d: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 1 (Frontebene) mit seitlichen Wärmeübergangselementen

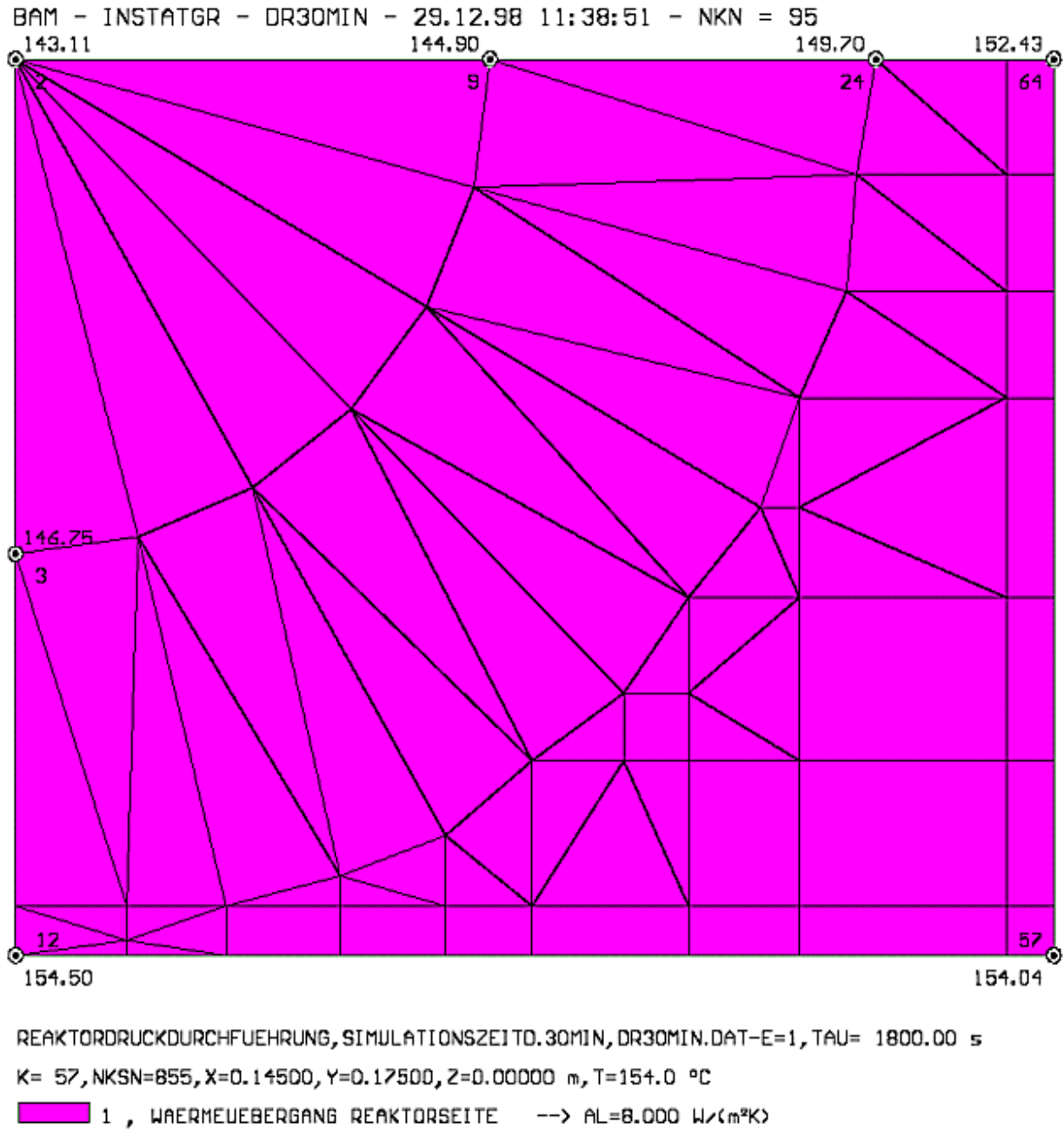
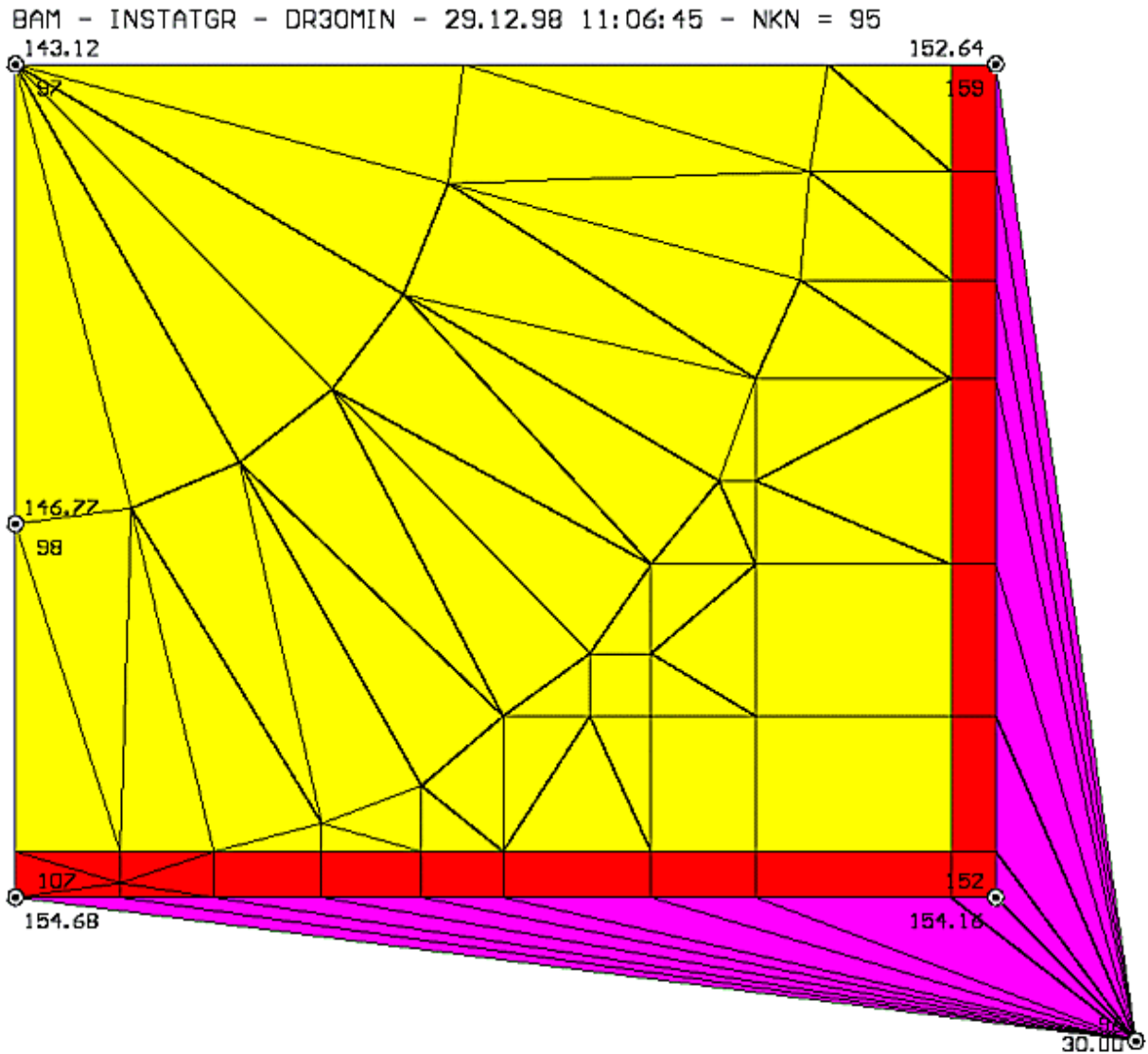


Abb. 5e: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 1 (Frontebene) mit zur Frontebene parallelen Wärmeübergangselementen

13.2 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 2



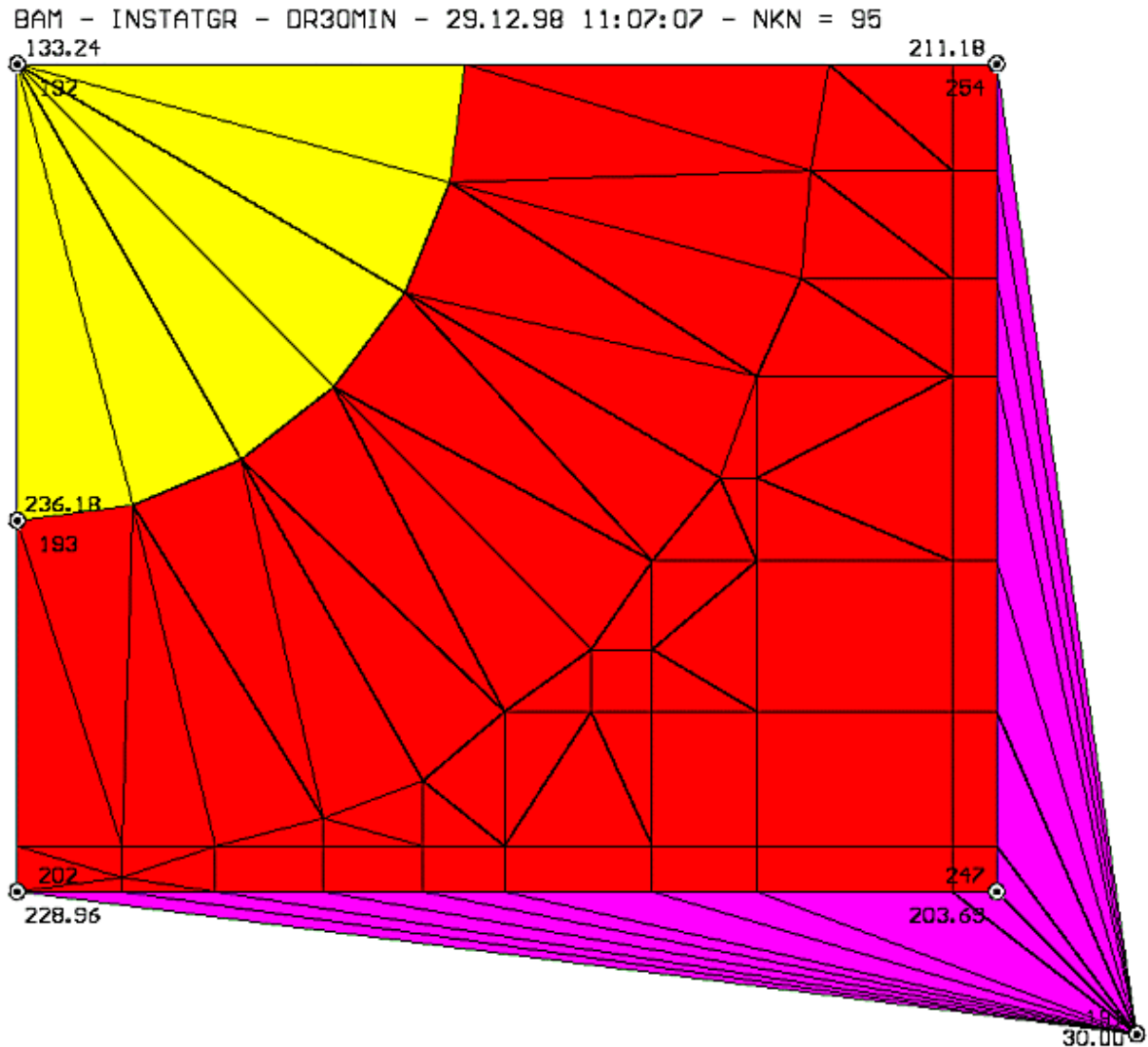
REAKTORDRUCKDURCHFUEHRUNG, SIMULATIONSZEITD.30MIN, DR30MIN.DAT-E=2, TAU= 1800.00 s

K= 96, NKS=855, X=0.17000, Y=0.20000, Z=0.00800 m, T=30.00 °C

	1, WAERMEUEBERGANG REAKTORSEITE	--> AL=8.000 W/(m²K)
	6, ALUMINIUM, GEHAEUSE REAKTORSEITE, LAM	--> LA=221.0 W/(m K)
	18, LUFT, GEHAEUSE, REAKTORSEITE, LAM	--> LA=0.020 W/(m K)

Abb. 5f: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 2 mit seitlichen Wärmeübergangselementen

13.3 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 3



REAKTORDRUCKDURCHFUEHRUNG, SIMULATIONSZEITD.30MIN, DR30MIN.DAT-E=3, TAU= 1800.00 s

K=191, NKS=855, X=0.17000, Y=0.20000, Z=0.20200 m, T=30.00 °C

	1, WAERMEUEBERGANG REAKTORSEITE	--> AL=8.000 W/(m²K)
	6, ALUMINIUM, GEHAEUSE REAKTORSEITE, LAM	--> LA=221.0 W/(m K)
	18, LUFT, GEHAEUSE, REAKTORSEITE, LAM	--> LA=0.020 W/(m K)

Abb. 5g: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 3 mit seitlichen Wärmeübergangselementen

13.4 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 4

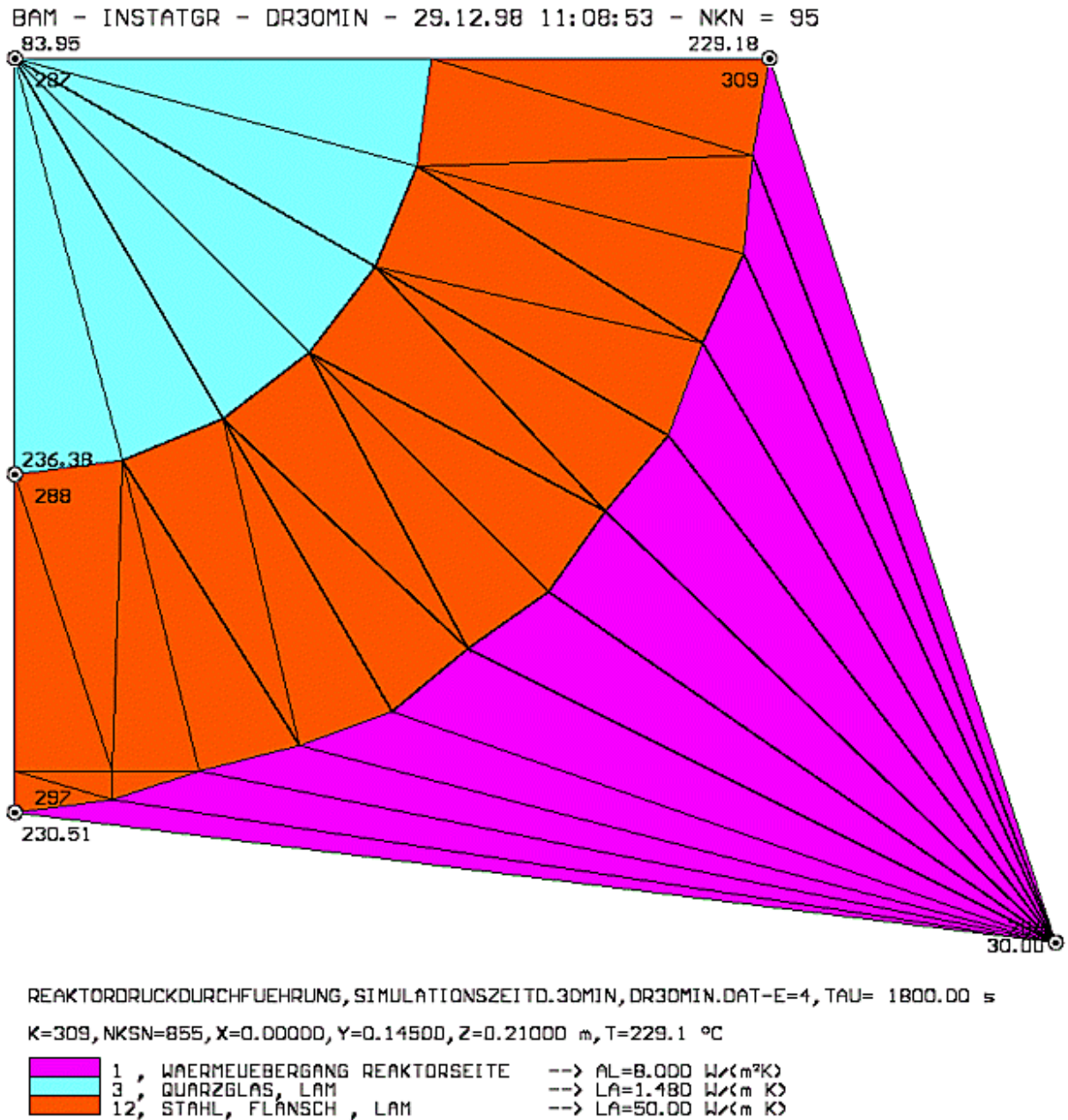
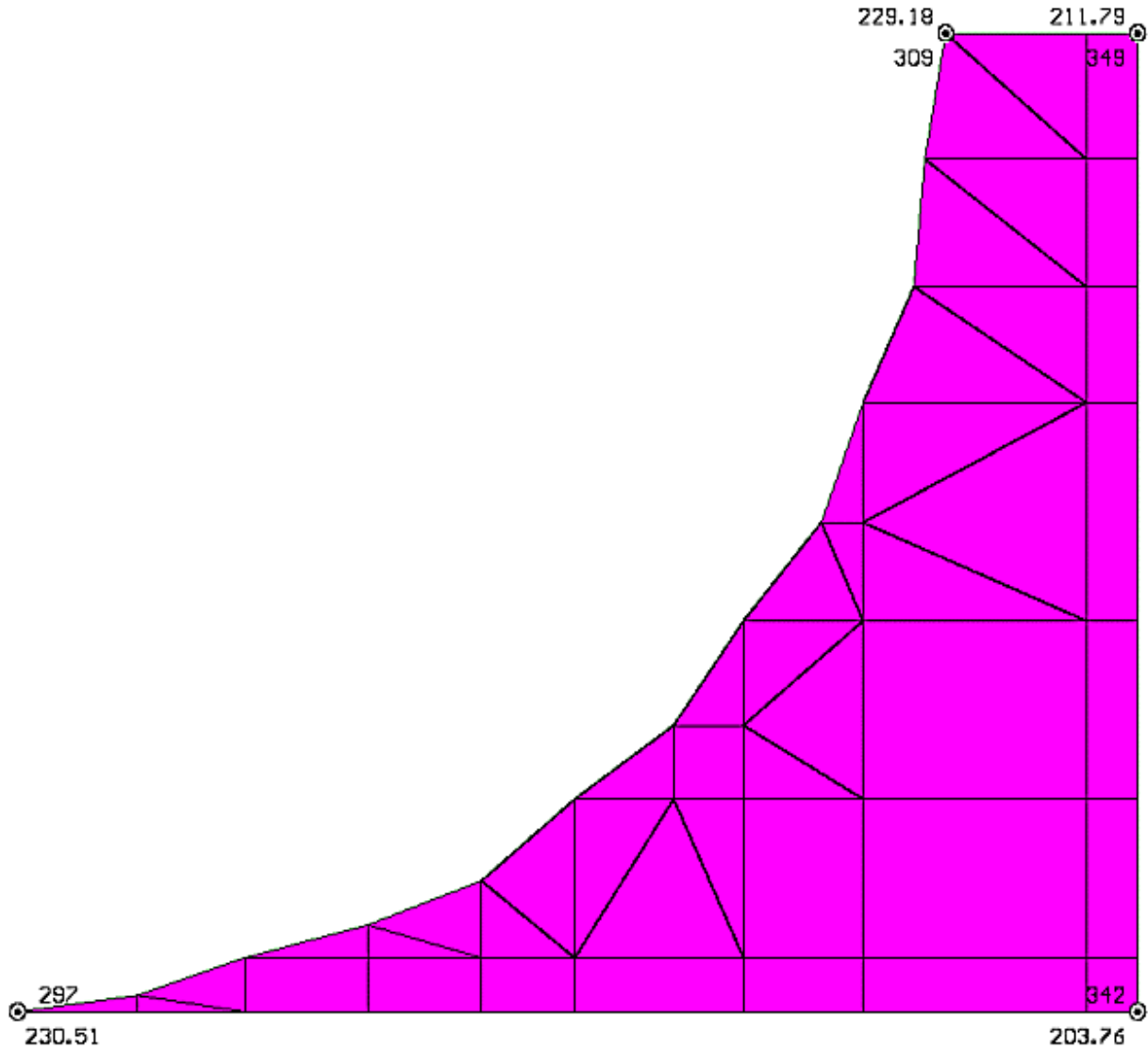


Abb. 5h: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 4 mit seitlichen Wärmeübergangselementen

BAM - INSTATGR - DR30MIN - 29.12.98 11:41:16 - NKN = 95



REAKTORDRUCKDURCHFUEHRUNG, SIMULATIONSZEITD.30MIN, DR30MIN.DAT-E=4, TAU= 1800.00 s

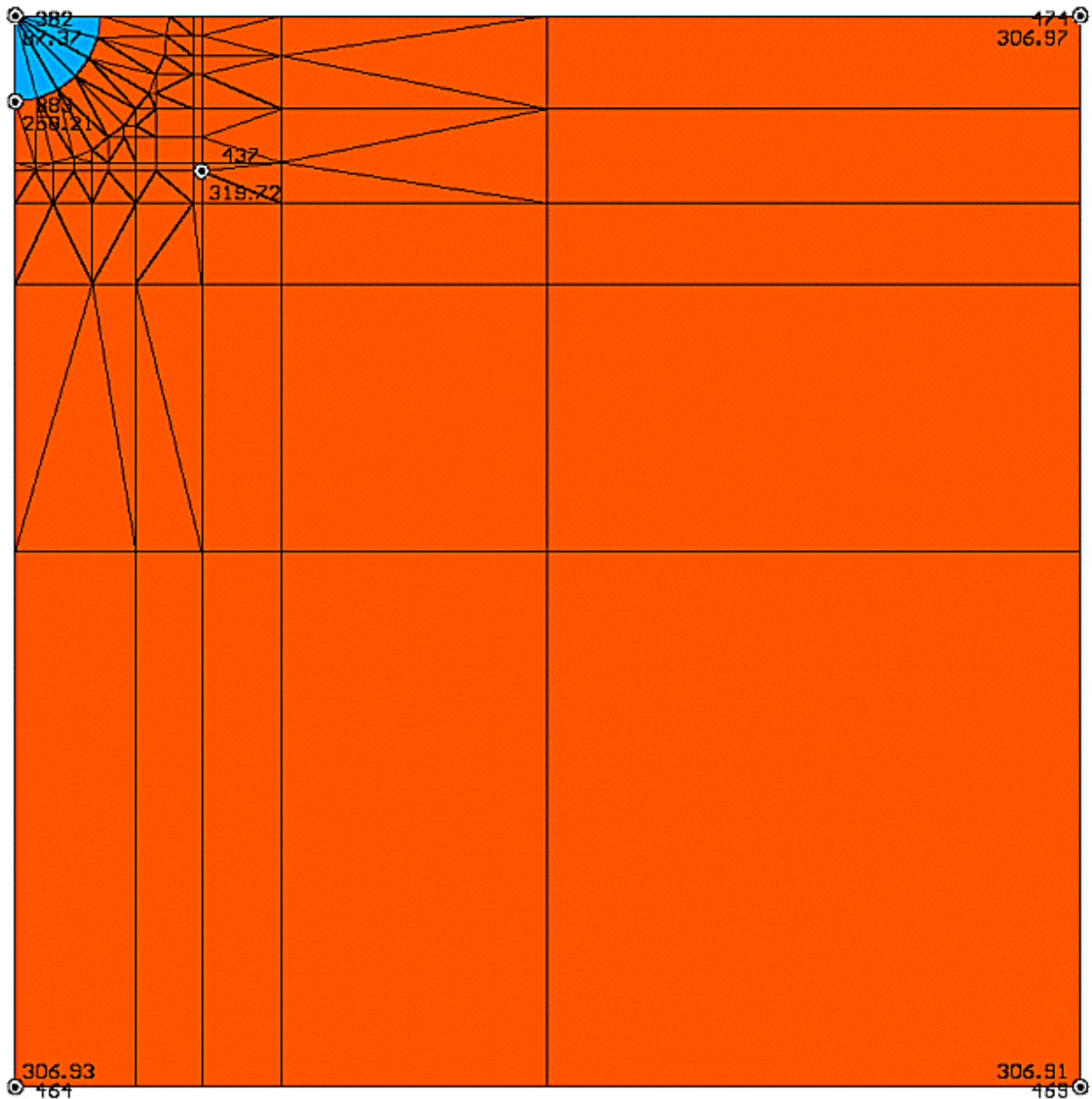
K=342, NKS=855, X=0.14500, Y=0.17500, Z=0.21000 m, T=203.7 °C

 1 , WAERMEUEBERGANG REAKTORSEITE --> AL=8.000 W/(m²K)

Abb. 5i: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 4 mit zur Knotenebene parallelen Wärmeübergangselementen

13.5 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 5

BAM - INSTATGR - DR30MIN - 29.12.98 11:12:01 - NKN = 95



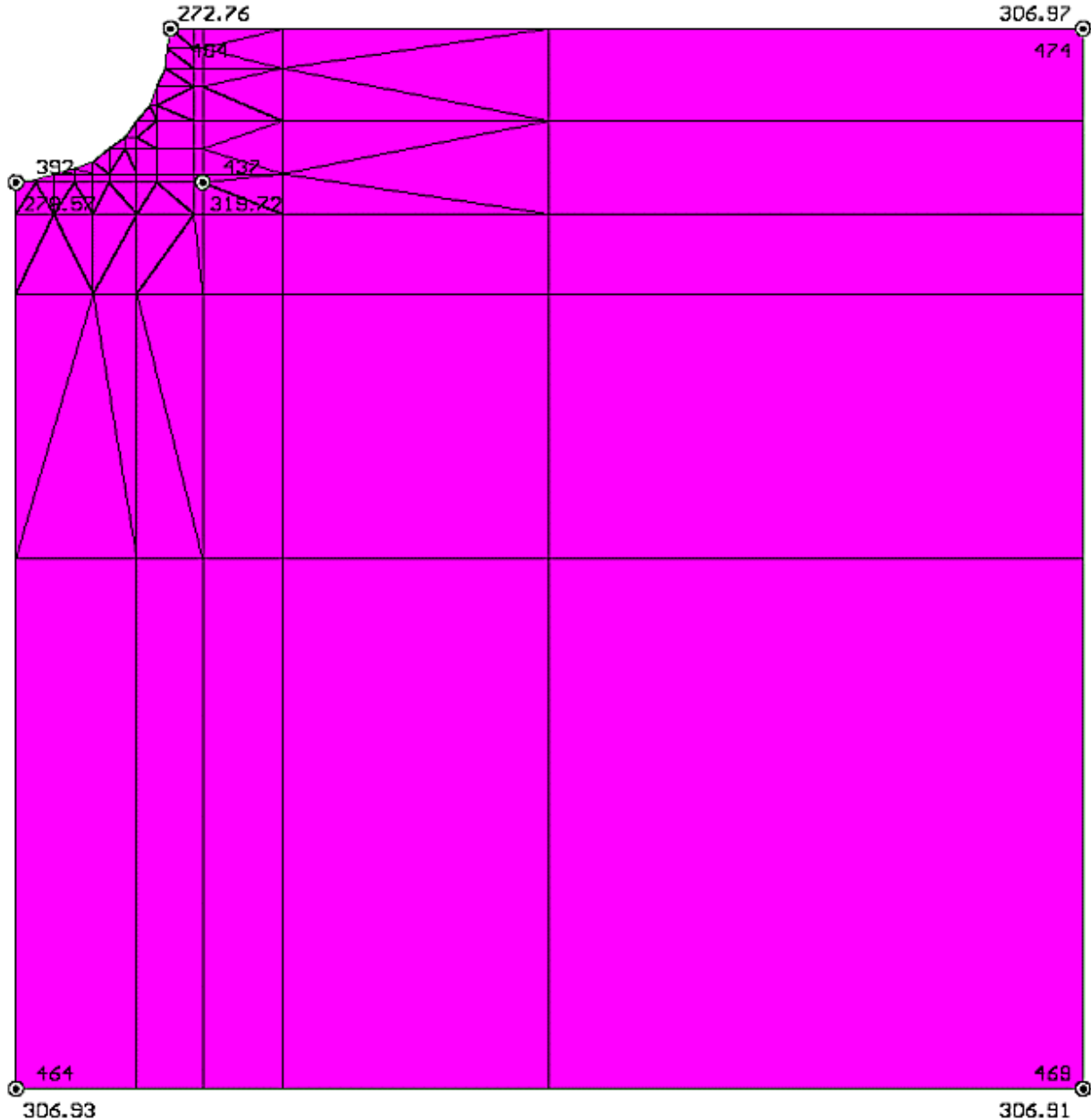
REAKTORDRUCKDURCHFUEHRUNG, SIMULATIONSZEIT 0.30MIN, DR30MIN.DAT-E=5, TAU= 1800.00 s

K=469, NKS=855, X=1.00000, Y=1.00000, Z=0.25000 m, T=306.9 °C

	15, STAHL, WAND, LAM	--> LA=50.00 W/(m K)
	21, LUFT, GEHAEUSE, RINGRAUMSEITE, LAM	--> LA=0.020 W/(m K)

Abb. 5j: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 5

BAM - INSTATGR - DR30MIN - 29.12.98 11:45:59 - NKN = 95



REAKTORDRUCKDURCHFUEHRUNG, SIMULATIONSZEIT 0.30MIN, DR30MIN.DAT-E=5, TAU= 1800.00 s

K=469, NKS=855, X=1.00000, Y=1.00000, Z=0.25000 m, T=306.9 °C

1 , WAERMEUEBERGANG REAKTORSEITE --> AL=8.000 W/(m²K)

Abb. 5k: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 5 mit zur Knotenebene parallelen Wärmeübergangselementen

13.6 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 6

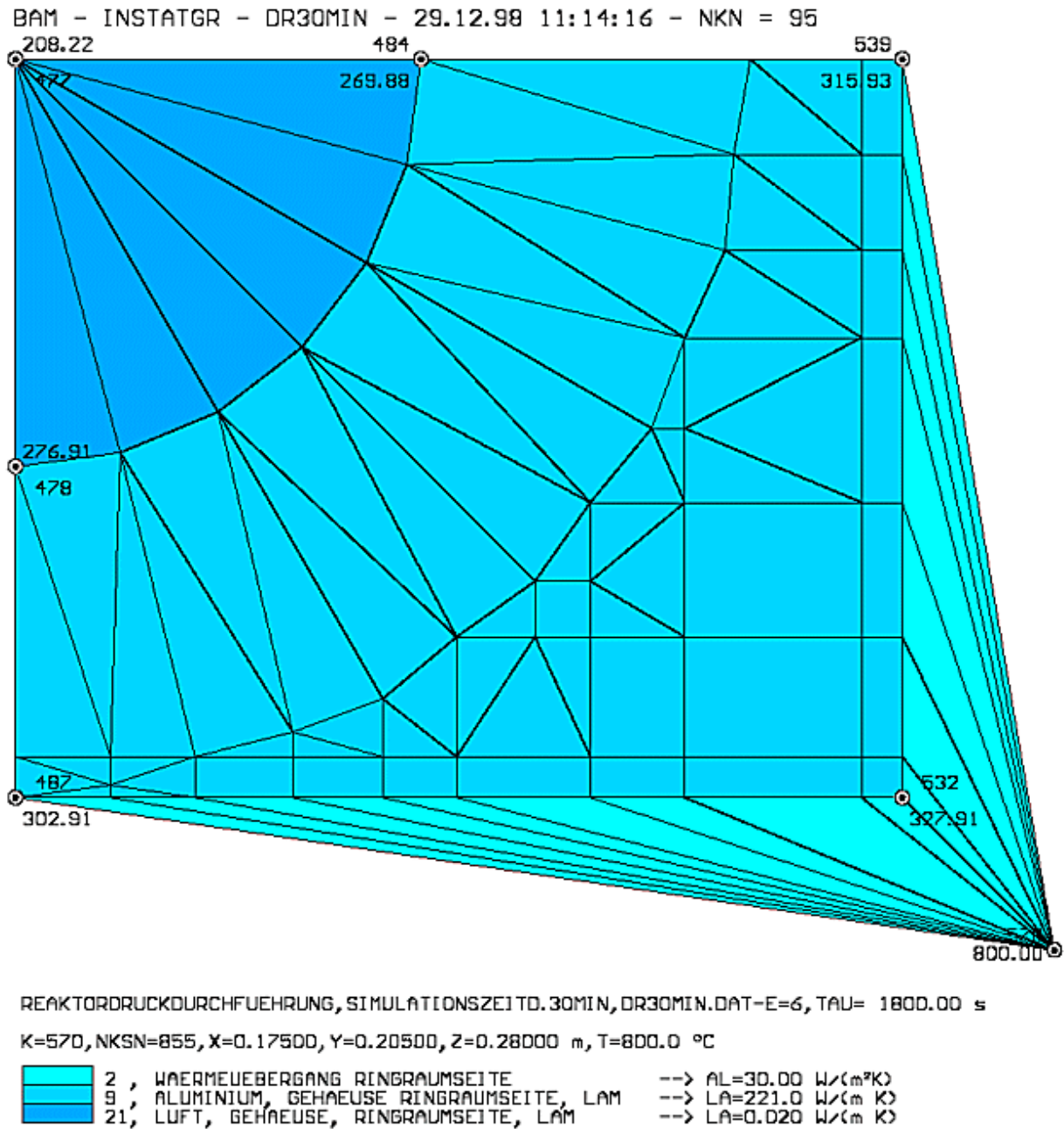
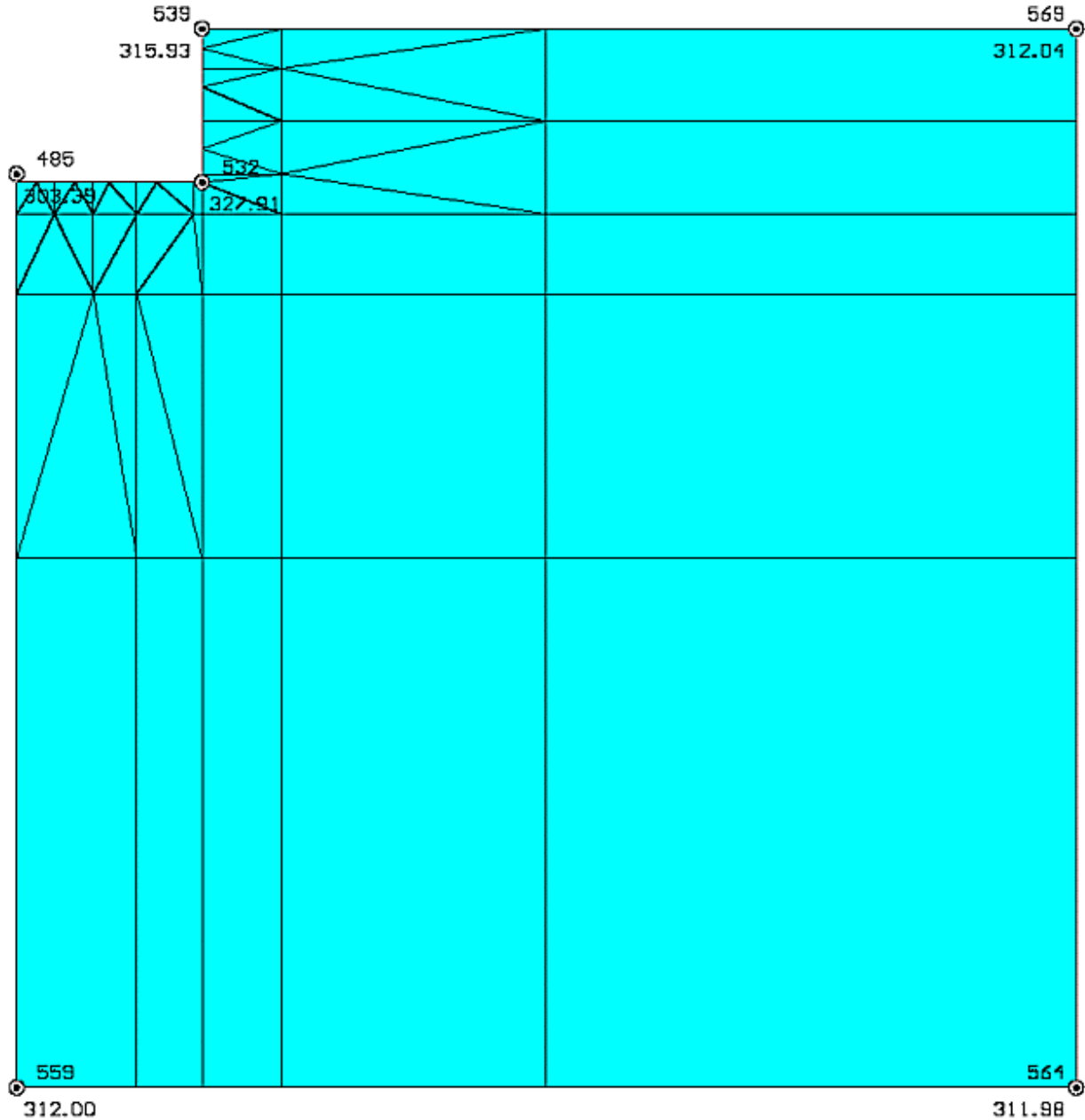


Abb. 5l: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 6 mit seitlichen Wärmeübergangselementen

BAM - INSTATGR - DR30MIN - 29.12.98 12:01:39 - NKN = 95



REAKTORDRUCKDURCHFUEHRUNG, SIMULATIONSZEIT 0.30MIN, DR30MIN.DAT-E=6, TAU= 1800.00 s

K=564, NKS=855, X=1.00000, Y=1.00000, Z=0.28000 m, T=311.9 °C

2 , WAERMEUEBERGANG RINGRAUMSEITE --> AL=30.00 W/(m²K)

Abb. 5m: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 6 mit zur Knotenebene parallelen Wärmeübergangselementen

13.7 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 7

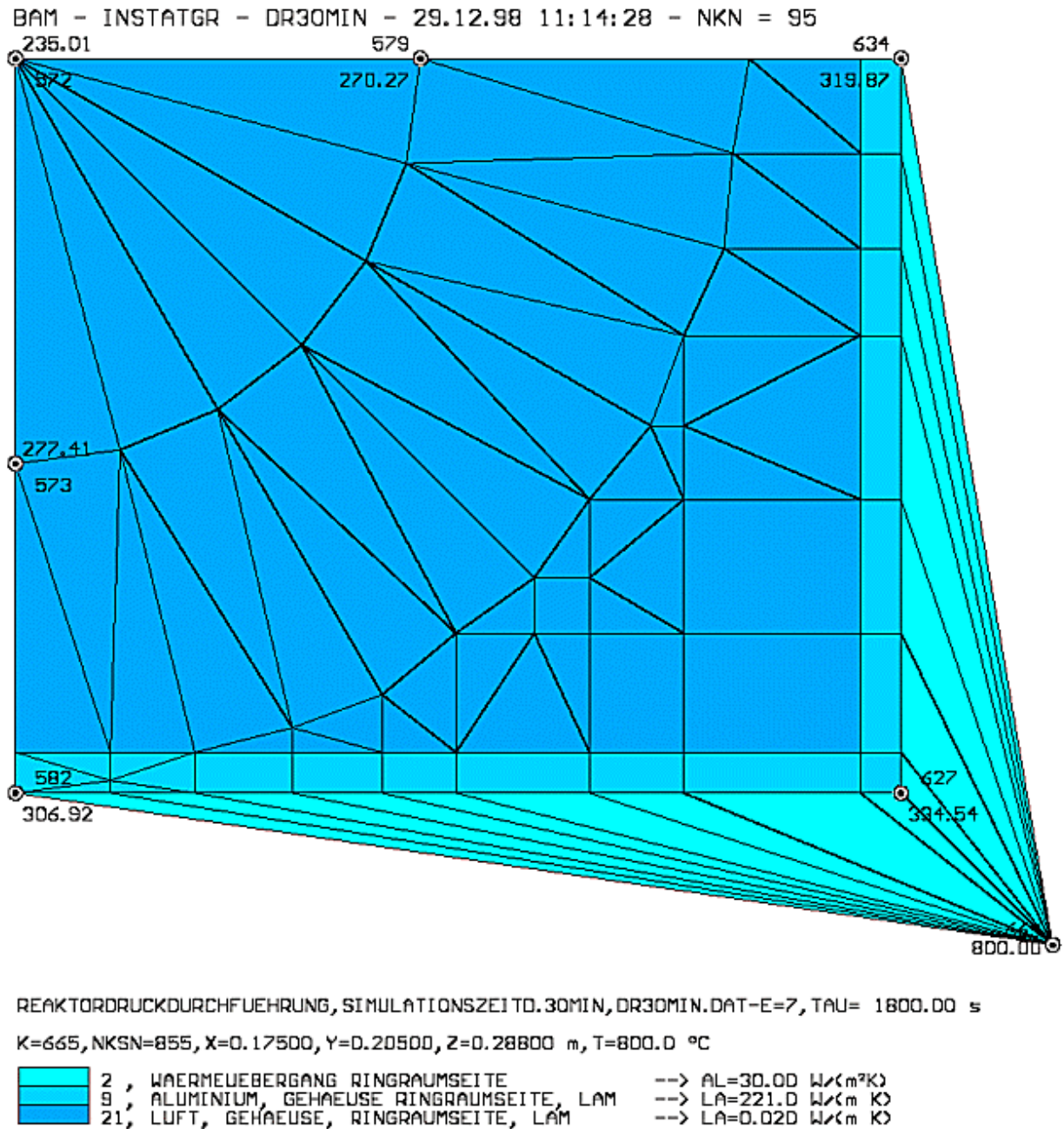
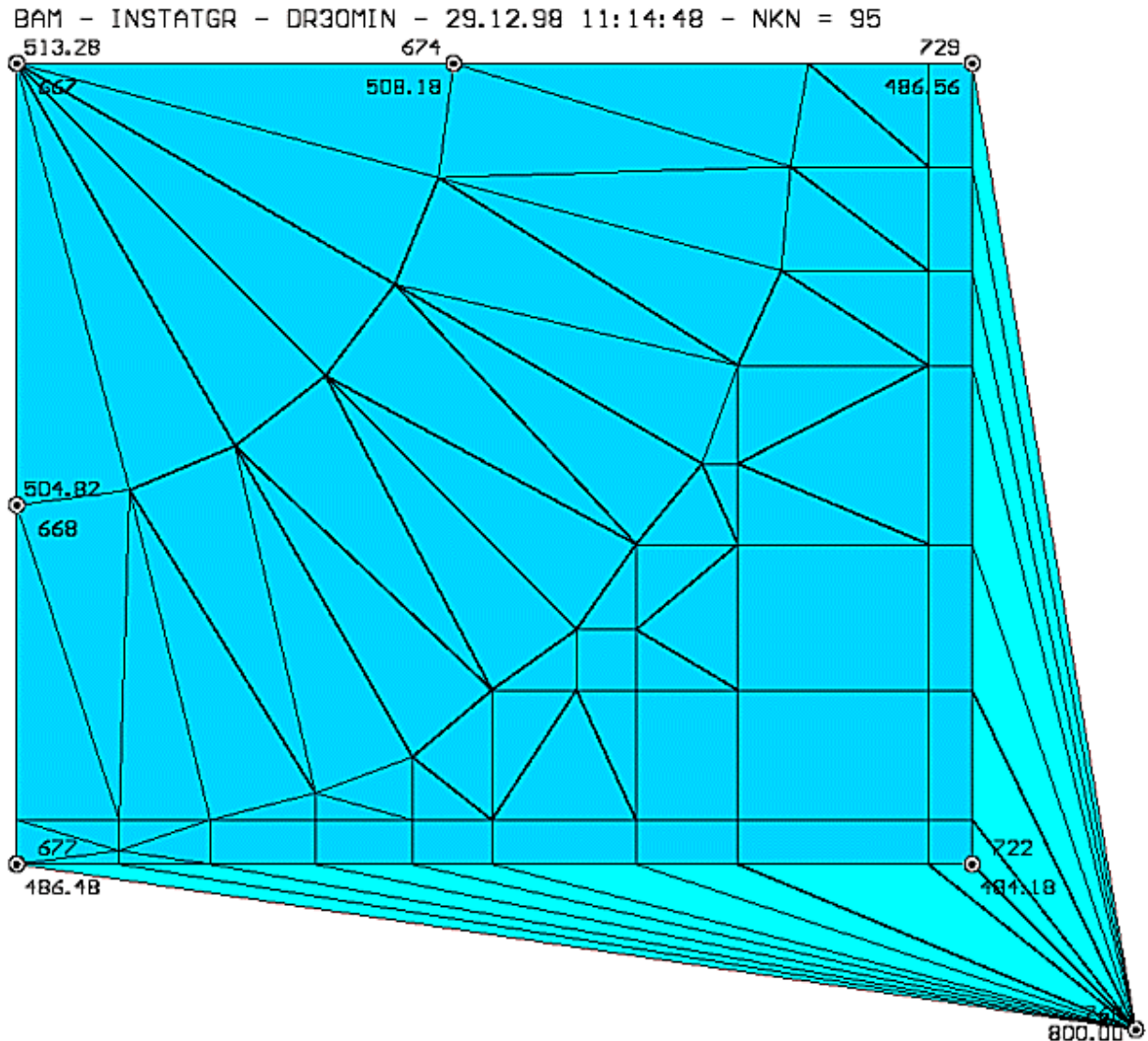


Abb. 5n: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 7 mit seitlichen Wärmeübergangselementen

13.8 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 8



REAKTORDRUCKDURCHFUEHRUNG, SIMULATIONSZEIT 0.30MIN, DR30MIN.DAT-E=8, TAU= 1800.00 s

K=760, NKS=855, X=0.17500, Y=0.20500, Z=0.48200 m, T=800.0 °C

	2 , WAERMEUEBERGANG RINGRAUMSEITE	--> AL=30.00 W/(m²K)
	8 , ALUMINIUM, GEHAEUSE RINGRAUMSEITE, LAM	--> LA=221.0 W/(m K)

Abb. 50: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 8 mit seitlichen Wärmeübergangselementen

13.9 Reaktordruckdurchführung - Knotenebene 9

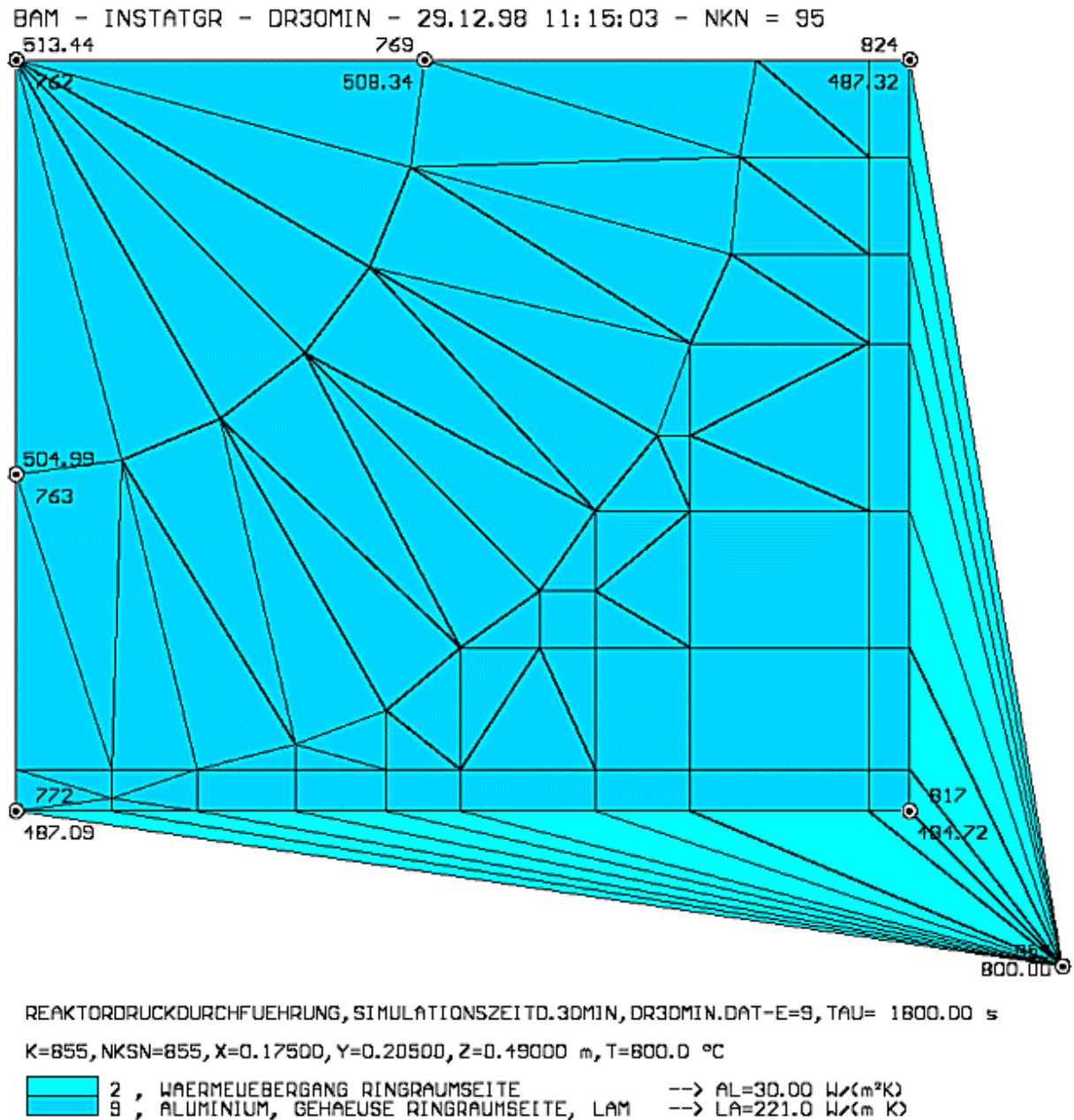
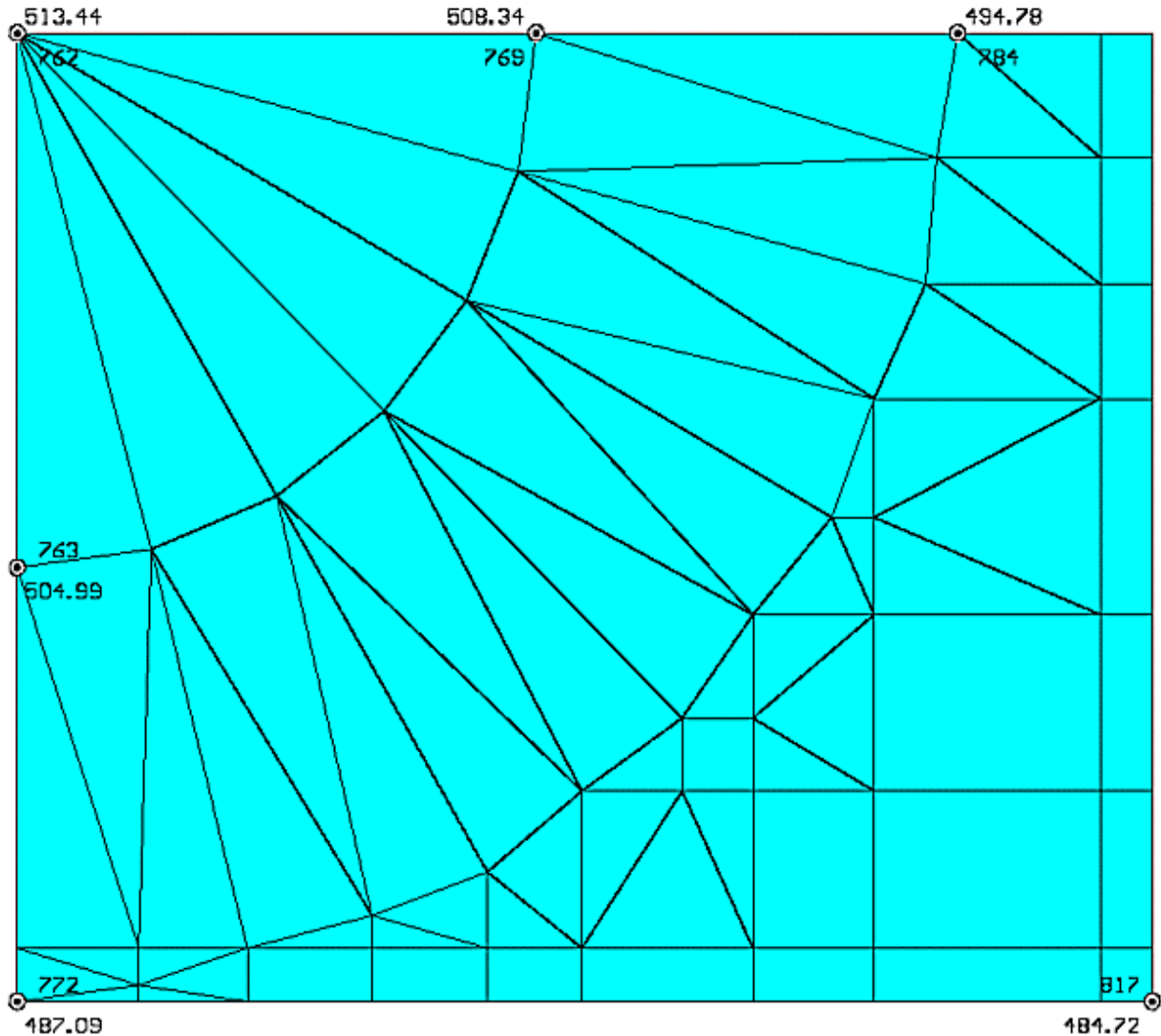


Abb. 5p: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 9 mit seitlichen Wärmeübergangselementen

BAM - INSTATGR - DR30MIN - 29.12.98 11:47:49 - NKN = 95



REAKTORDRUCKDURCHFUEHRUNG, SIMULATIONSZEITD.30MIN, DR30MIN.DAT-E=9, TAU= 1800.00 s

K=817, NKS=855, X=0.14500, Y=0.17500, Z=0.49000 m, T=484.7 °C

2 , WAERMEUEBERGANG RINGRAUMSEITE --> AL=30.00 W/(m²K)

Abb. 5q: Reaktordruckdurchführung – Elementaufteilung der Knotenebene 9 mit zur Knotenebene parallelen Wärmeübergangselementen

13.10 Reaktordruckdurchführung - Errechnete Temperaturverläufe

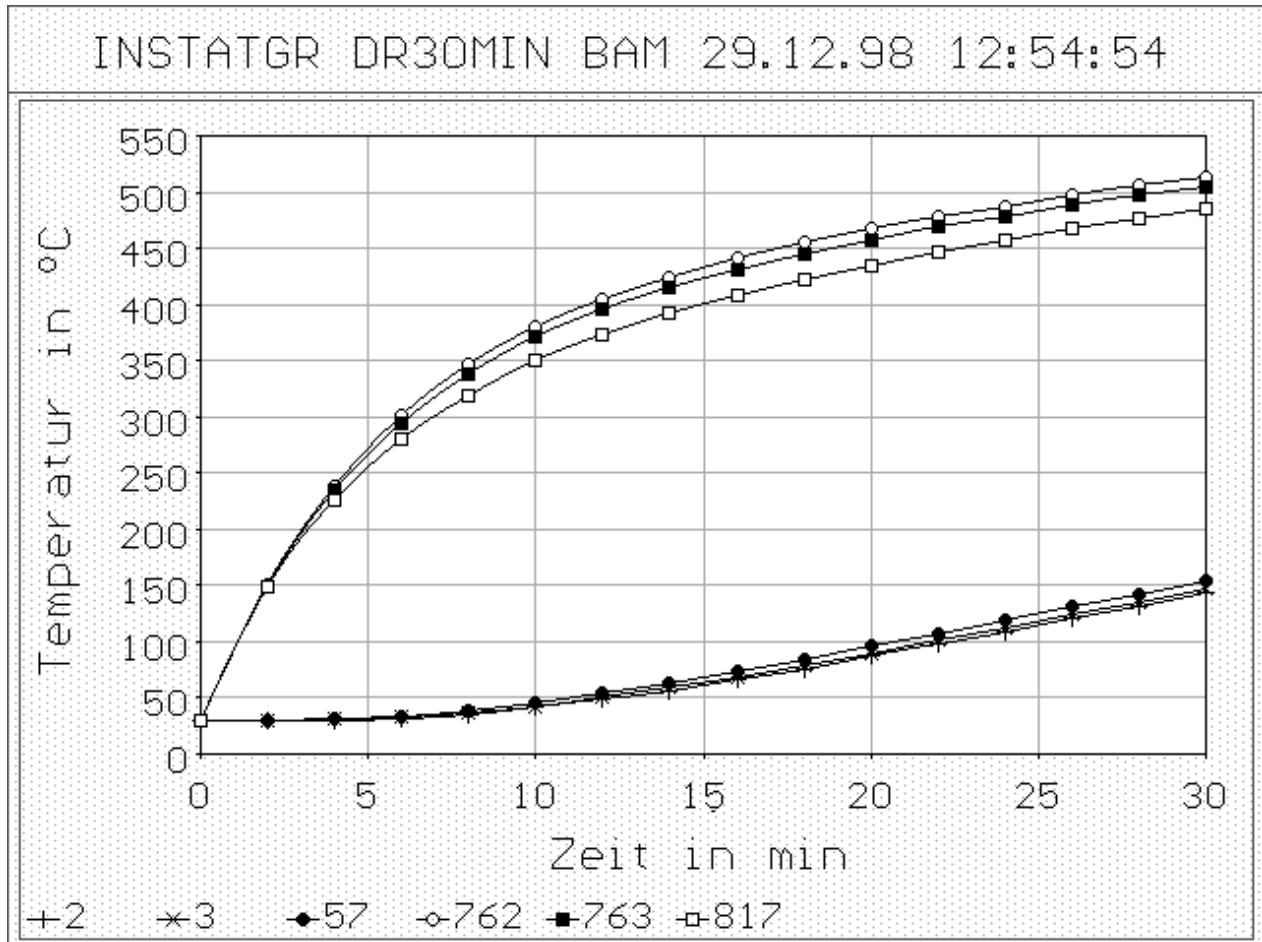


Abb. 5r: Reaktordruckdurchführung – In den Knoten 2, 3 und 57 (Reaktorseite) sowie 762, 763 und 817 (Ringraumseite) errechnete Temperatur-Zeit-Verläufe

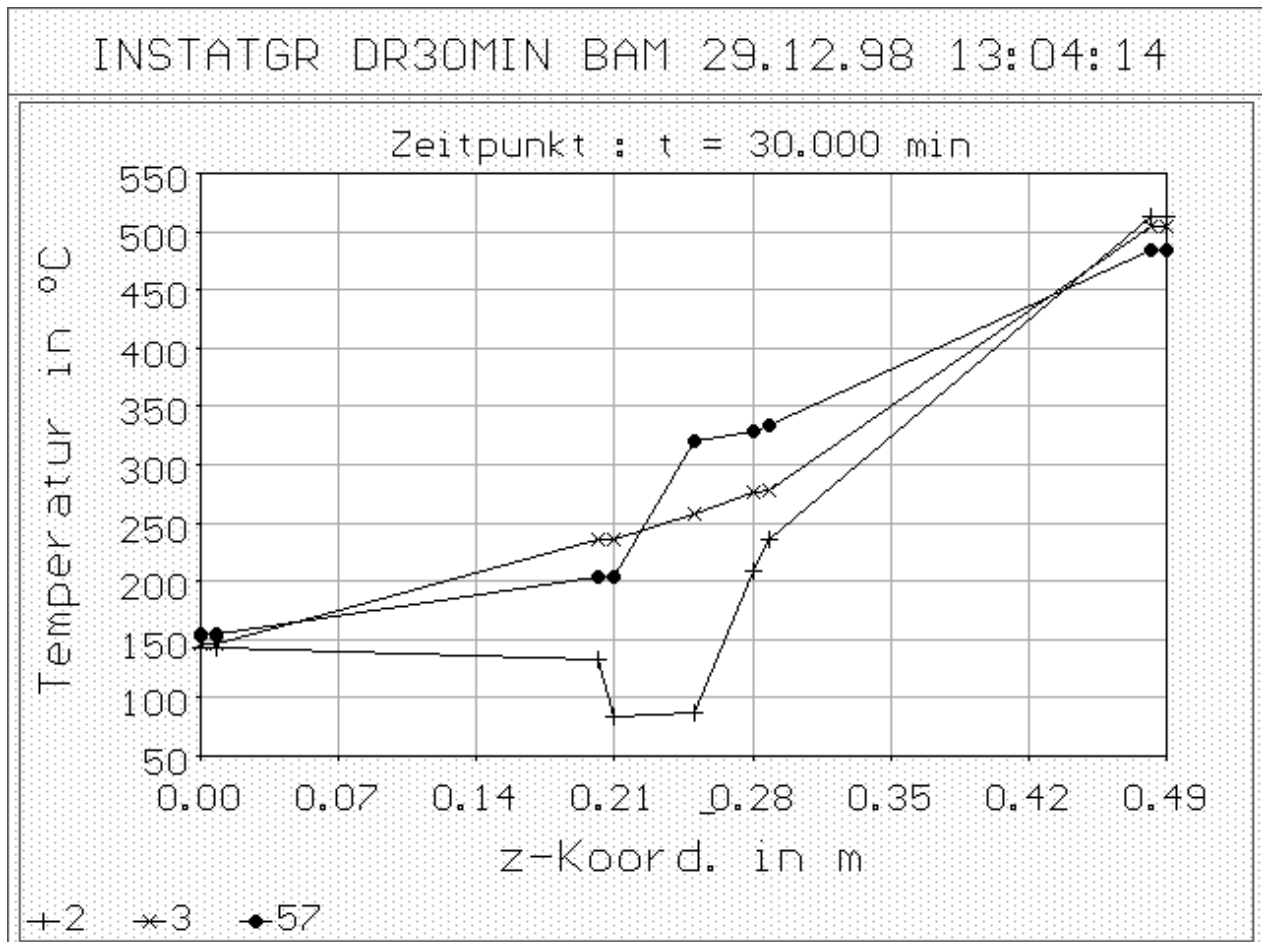


Abb. 5s: Reaktordruckdurchführung – Temperaturverläufe für die Knoten 2, 3 und 57 von der Ringraumseite zur Reaktorseite nach einer halbstündigen Brandbeanspruchung von 800 °C auf der Ringraumseite