

EUR 476.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

STUDIE ÜBER DEN EINFLUSS DES HB-GEHALTES
IM ORGANISCHEN KÜHLMITTEL
AUF DIE KOSTEN DER STROMERZEUGUNG
EINES 250 MWe-ORGEL-REAKTORS

von

P. TAUCH

1963



ORGEL-Programm

Generaldirektion Forschung und Ausbildung

HINWEIS

Das vorliegende Dokument ist im Rahmen des Forschungsprogramms der Kommission der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ausgearbeitet worden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Euratomkommission, ihre Vertragspartner und alle in deren Namen handelnden Personen :

- 1° — keine Gewähr dafür übernehmen, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind oder dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden und Verfahren nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt ;
- 2° — keine Haftung für die Schäden übernehmen, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen oder der in diesem Dokument beschriebenen technischen Anordnungen, Methoden oder Verfahren entstehen könnten.

Dieser Bericht wird zum Preise von 50,— bfrs. verkauft. Bestellungen sind zu richten an : PRESSES ACADEMIQUES EUROPEENNES — 98, chaussée de Charleroi, Brüssel 6.

Die Zahlung ist zu leisten durch Überweisung

- an die BANQUE DE LA SOCIETE GENERALE (Agence Ma Campagne) — Brüssel — Konto Nr. 964.558 ;
- an die BELGIAN AMERICAN BANK AND TRUST COMPANY — New York — Konto Nr. 121.86 ;
- an die LLOYDS BANK (Foreign) Ltd. — 10 Moor-gate, London E.C.2,

als Bezug ist anzugeben : « EUR 476.d — Studie über den Einfluss des HB-Gehaltes im organischen Kühlmittel auf die Kosten der Stromerzeugung eines 250 MWe-Organ-Reactors ».

Das vorliegende Dokument wurde an Hand des besten Abdruckes vervielfältigt, der zur Verfügung stand.

STUDY ON THE INFLUENCE OF HB CONTENTS IN ORGANIC COOLANT ON ELECTRICITY PRODUCTION COSTS IN A 250 MWe ORGEL REACTOR by P. TAUCH

European Atomic Energy Community — EURATOM
ORGEL Program
Directorate-General for Research and Training
Brussels, November 1963 — pages 34 — figures 13.

The optimum percentage of high boiling residues (HB) in organic coolant (OM-2) of a 250 MWe ORGEL Power Plant and the influence on the energy production cost is determined. Independently from the radiolytic destruction rate the HB-content ought to be inferior to 20 %. Supposing a zero or first order rate the optimum percentage is situated at 5 % HB.

E U R 4 7 6 . d

STUDY ON THE INFLUENCE OF HB CONTENTS IN ORGANIC COOLANT ON ELECTRICITY PRODUCTION COSTS IN A 250 MWe ORGEL REACTOR by P. TAUCH

European Atomic Energy Community — EURATOM
ORGEL Program
Directorate-General for Research and Training
Brussels, November 1963 — pages 34 — figures 13.

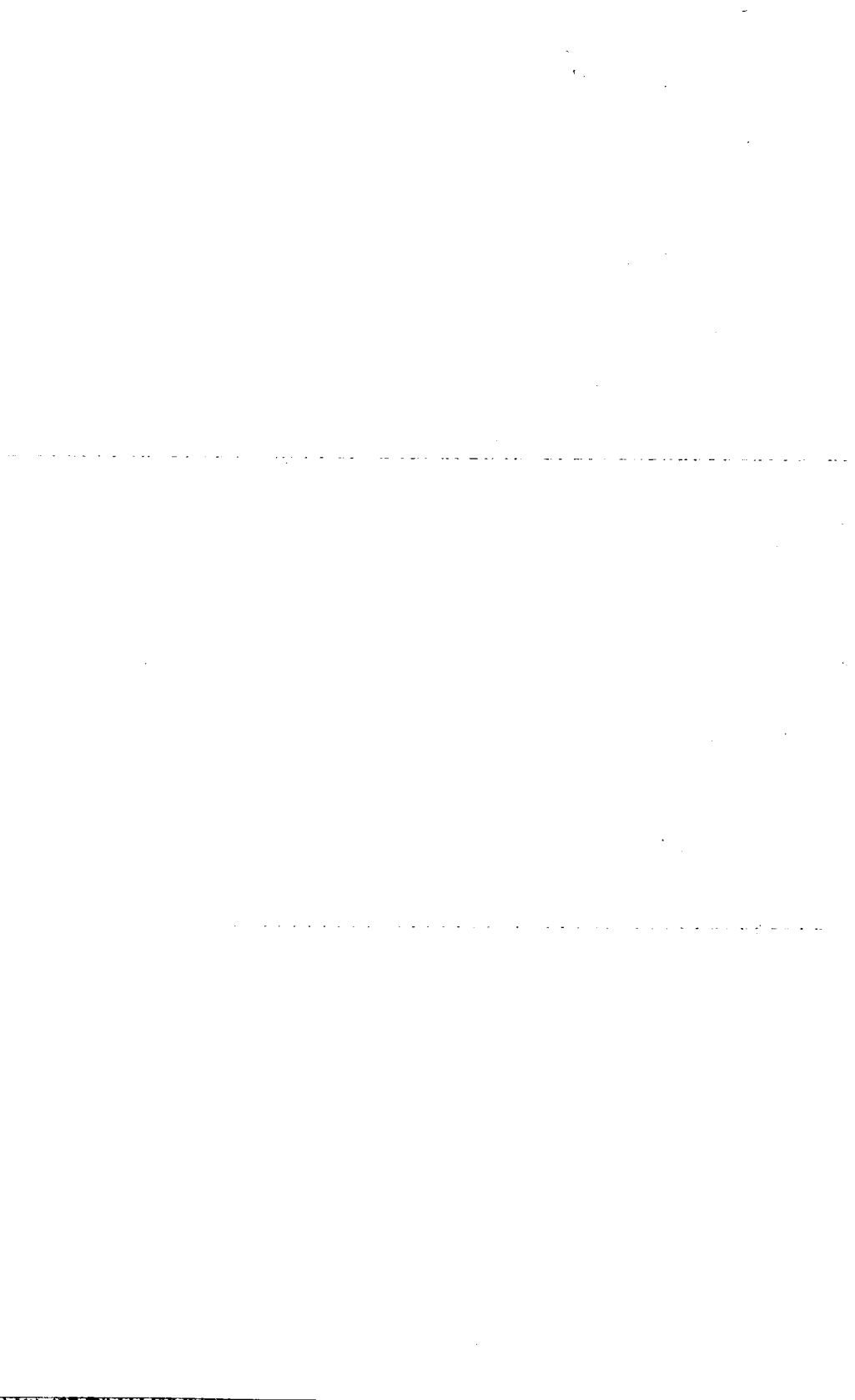
The optimum percentage of high boiling residues (HB) in organic coolant (OM-2) of a 250 MWe ORGEL Power Plant and the influence on the energy production cost is determined. Independently from the radiolytic destruction rate the HB-content ought to be inferior to 20 %. Supposing a zero or first order rate the optimum percentage is situated at 5 % HB.

E U R 4 7 6 . d

STUDY ON THE INFLUENCE OF HB CONTENTS IN ORGANIC COOLANT ON ELECTRICITY PRODUCTION COSTS IN A 250 MWe ORGEL REACTOR by P. TAUCH

European Atomic Energy Community — EURATOM
ORGEL Program
Directorate-General for Research and Training
Brussels, November 1963 — pages 34 — figures 13.

The optimum percentage of high boiling residues (HB) in organic coolant (OM-2) of a 250 MWe ORGEL Power Plant and the influence on the energy production cost is determined. Independently from the radiolytic destruction rate the HB-content ought to be inferior to 20 %. Supposing a zero or first order rate the optimum percentage is situated at 5 % HB.



EUR 476.d

EUROPÄISCHE ATOMGEMEINSCHAFT - EURATOM

STUDIE ÜBER DEN EINFLUSS DES HB-GEHALTES
IM ORGANISCHEN KÜHLMITTEL
AUF DIE KOSTEN DER STROMERZEUGUNG
EINES 250 MWe-ORGEL-REAKTORS

von

P. TAUCH

1963



ORGEL-Programm

Generaldirektion Forschung und Ausbildung

I N H A L T

Vorwort

1. Einführung
2. Grundlegende Annahmen für den Reaktor
3. Physikalische Eigenschaften des organischen Kühlmittels OM-2
 - 3.1. Eigenschaften, die für die Wärmeübertragung von Bedeutung sind
 - 3.2. Radiolytische Zersetzungsrate G_n
 - 3.3. Radiolytische Zersetzungsrate G_γ
 - 3.4. Pyrolytische Zersetzungsrate
4. Hypothesen für die Berechnung der Stromerzeugungskosten
 - 4.1. Anlagekosten
 - 4.2. Brennstoffkosten
 - 4.3. Kühlmittelkosten

Resultate

5. Änderungen der Reaktorgröße als Funktion des HB-Gehaltes
6. Zersetzungsrate und im Kühlmittel gespeicherte Neutronenenergie
 - 6.1. Allgemeines
 - 6.2. Bestimmung der im Kühlmittel gespeicherten Neutronenenergie
7. Einfluß des HB-Gehaltes auf den Kühlmittelverbrauch
8. Einfluß des HB-Gehaltes auf die Kosten der Stromerzeugung
 - 8.1. Anlagekosten
 - 8.2. Brennstoffkosten
 - 8.3. Kühlmittelkosten und Wahl des HB-Gehaltes
 - 8.4. Vergleich ORGEL und OMR
9. Schlußfolgerung
10. Liste der verwendeten Symbole

STUDIE ÜBER DEN EINFLUSS DES HB-GEHALTES
IM ORGANISCHEN KÜHLMITTEL AUF DIE KOSTEN DER STROMERZEUGUNG
EINES 250 MWe-ORGEL-REAKTORS

ZUSAMMENFASSUNG

Es wird der Einfluss des Gehaltes an hochsiedenden Polymeren (HB) im organischen Kühlmittel (OM-2) auf die Kosten der Stromerzeugung eines 250 MWe-ORGEL-Kraftwerkes untersucht. Unabhängig vom Grad der radiolytischen Zersetzungsrate ist es vorteilhaft, mit einem HB-Gehalt unter 20 % zu arbeiten. Unter Annahme einer radiolytischen Zersetzungsrate 0. oder 1. Grades liegt der optimale HB-Gehalt bei 5 %.

SUMMARY

The optimum percentage of high boiling residues (HB) in organic coolant (OM-2) of a 250 MWe ORGEL Power Plant and the influence on the energy production cost is determined. Independently from the radiolytic destruction rate the HB-content ought to be inferior to 20 %. Supposing a zero or first order rate the optimum percentage is situated at 5 % HB.

Vorwort

Es wird der Einfluß des Gehaltes an hochsiedenden Polymeren (HB) im organischen Kühlmittel (OM-2) auf die Kosten der Stromerzeugung eines ORGEL-Kraftwerks untersucht. Da die radiolytische Zersetzungsrate dieses Kühlmittels nicht genau bekannt ist, wurden 3 verschiedene Hypothesen in Betracht gezogen.

Wenn die Zersetzungsrate des Kühlmittels in Abhängigkeit vom HB-Gehalt eine Funktion 0. oder 1. Grades ist, ergeben sich Kostenvorteile, falls das Kraftwerk mit geringer Konzentration an HB im Kühlmittel betrieben wird (zwischen 0,10 und 0,05 mills/KWh entsprechend dem Grad der Zersetzungsrate beim Übergang von 30 % HB-Gehalt auf 5 % HB-Gehalt). Unter Annahme der Zersetzungsrate als Funktion 2. Grades hat der HB-Gehalt dagegen praktisch kaum Einfluß auf die Stromerzeugungskosten. Es erscheint aber in jedem Fall zweckmäßig, mit einem HB-Gehalt $< 20\%$ zu arbeiten.

1. Einführung

Das Ziel der Untersuchung besteht darin, den Einfluß des Gehaltes an hochsiedenden Polymeren (HB) im organischen Kühlmittel (OM-2) ¹⁾ auf die Stromerzeugungskosten eines 250 MWe-ORGEL Leistungsreaktors darzulegen.

Insbesondere soll gezeigt werden, bei welchem %-Gehalt an HB entsprechend den verschiedenen - weiter unten zu präzisierenden - Annahmen der Reaktor betrieben werden sollte, um minimale Stromerzeugungskosten zu erhalten. Ferner wird der Einfluß der verschiedenen Theorien über die Zersetzungsraten dieses organischen Kühlmittels unter Neutronenbestrahlung auf die Kosten der Stromerzeugung untersucht.

2. Grundlegende Annahmen für den Reaktor

Die Untersuchung wird am Beispiel eines ORGEL-Reaktors ähnlich

¹⁾ Zusammensetzung des Kühlmittels siehe Abschnitt 3.1.

dem in Referenz (1) beschriebenen vorgenommen und basiert auf den nachfolgend aufgeführten, konstant gehaltenen Daten des Reaktors:

Elektrische Bruttoleistung	Web	250 MWeb
Aktive Corehöhe	H	500 cm
Kühlmittelaustritts- temperatur	t_1	400° C
Maximale Temperatur der Brenn- stoffstabhülle	tgm	440° C
Maximale mittlere Kühlmittel- geschwindigkeit	V	800 cm/s
Uranquerschnitt im Brennelement	V_u	30 cm ²
Rippenkoeffizient	γ_u	1,9
Abstand zwischen Brennstoff- stäben	j_1	1,4 mm

Fig. 1 zeigt den Querschnitt des benutzten Brennelements.

Ein entscheidender Faktor für die aus einem Kühlkanal abführbare Leistung ist die Wärmeübergangszahl α des Reaktor-kühlmittels. Sie beeinflusst auch die Grösse des Reaktors. Wenn die Wärmeübergangszahl α kleiner wird, verringert sich bei sonst konstanten Verhältnissen die aus einem Kanal entnehmbare Leistung. Da Kühlmittelgeschwindigkeit V und Corehöhe bzw. Kühlkanallänge H konstant gehalten werden, verringert sich auch die Aufwärmspanne Δt des Kühlmittels.

Wegen der auf 400° C fixierten Kühlmittelaustrittstemperatur t_1 steigt bei kleiner werdendem Δt die mittlere Kühlmitteltemperatur t_m an. Der Temperaturunterschied zwischen der Brennelementhülle tgm und t_1 , wird konstant gehalten.

Für die aus dem Brennstoff eines Kanals mit konstanter wärmeabgebender Oberfläche S abgeführte mittlere lineare Wärmemenge ¹⁾ gilt generell

1) Unter Vernachlässigung der durch Neutronen, β - und γ - Strahlung ausserhalb des Brennstoffes erzeugten Wärme.

$$(1) \quad W_u = \int_{-L/2}^{L/2} q(z) dz = S_{th} \int_{-L/2}^{L/2} \alpha(z) [t_g(z) - t(z)] dz \quad [W]$$

$$\text{mit } S = S_{th} \int_{-L/2}^{L/2} dz \quad 2)$$

Unter Annahme einer über die Kanallänge L gemittelten Wärmeübergangszahl $\bar{\alpha} = \alpha(t_m)$ und ausgehend von festen Werten t_{gm} , t_1 und Δt kann man die im Brennstoff eines Kanals erzeugte Wärmemenge auch darstellen als

$$(2) \quad W_u = S_{th} \cdot \bar{\alpha} \cdot \beta (t_{gm} - t_1) L \quad [W]$$

mit dem Korrelationsfaktor

$$\beta = \frac{\int_{-L/2}^{L/2} \alpha(z) [t_g(z) - t(z)] dz}{\bar{\alpha} (t_{gm} - t_1) L}$$

Fig. 2 zeigt den Verlauf dieses Korrelationsfaktors β (mit dessen Hilfe W_u als Funktion von t_{gm} , t_1 und $\bar{\alpha}$ anstelle von $\int \alpha(z) [t_g(z) - t(z)] dz$ berechnet werden kann) in Abhängigkeit vom Gehalt an HB im Kühlmittel.

Aus Formel (2) erkennt man, dass bei festgehaltenem t_{gm} und abnehmendem $\bar{\alpha}$ die abgeführte Wärmemenge W_u kleiner wird.

2) Formelzeichen siehe Liste der verwendeten Symbole

Da die Wärmemenge W_u ihrerseits proportional dem thermischen Neutronenfluß ϕ ist, muß letzterer mit kleiner werdendem $\bar{\alpha}$ ebenfalls abnehmen. Ein kleinerer Fluß ϕ bedingt dann aber eine Verringerung der Gesamtleistung des Reaktors. Zur Aufrechterhaltung der geforderten elektrischen Bruttoleistung ist deshalb die Zahl der Brennstoff- und Kühlkanäle zu erhöhen, d.h. der Coreradius wird größer.

Aus dem Vorstehenden wird ersichtlich, welche wichtige Rolle den physikalischen Eigenschaften des verwendeten Kühlmittels zukommt, da sie für dessen Wärmeübergangszahl maßgebend sind.

3. Physikalische Eigenschaften des organischen Kühlmittels OM-2

A. Das hier untersuchte Kühlmittel ist eine Mischung aus Terphenylen (Typ OM-2), die im Reaktor unter dem Einfluß der Strahlung zu einem gewissen Prozentsatz in hochsiedende Polymere (HB) umgewandelt werden, die entfernt werden müssen.

Zusammensetzung des frischen Kühlmittels:

- Terphenyl	o	14 - 16 %
- Terphenyl	m	79 - 81 %
- Terphenyl	p	5 %

3.1. Eigenschaften, die für die Wärmeübertragung von Bedeutung sind

Die für die Wärmeübertragung wichtigsten physikalischen Eigenschaften wie Dichte, Viskosität, spezifische Wärme, thermische Leitfähigkeit (und Dampfdruck) sind nach den im Anhang von Referenz (1) als Funktion von Temperatur und HB-Gehalt angegebenen Formeln berechnet worden. Die Wärmeübergangszahl selbst ist eine Funktion dieser physikalischen Größen.

3.2. Radiolytische Zersetzungsrates G_n

In Fig. 3 werden mehrere Kurven über die radiolytischen Zersetzungsrates G_n , d.h. die Zahl der pro 100 eV absorbiertener Neutronenenergie zerstörten Kühlmittelmoleküle,

in Abhängigkeit vom HB-Gehalt gegeben. Es liegt die Annahme zugrunde, daß die Abhängigkeit des G_n vom HB-Gehalt eine Funktion 0., 1. oder 2. Grades ist. Die bis jetzt durchgeführten Experimente lassen noch keine sichere Entscheidung über den Grad der Zersetzungsrates zu. ¹⁾

3.3. Radiolytische Zersetzungsrates G_{γ}

Die Zersetzungsrates G_{γ} ist unabhängig vom HB-Gehalt als konstant gleich 0,09 angenommen worden ²⁾.

3.4. Pyrolytische Zersetzungsrates

Die pyrolytische Zersetzungsrates P wird nach der Formel ³⁾

$$P = 6,6 \cdot 10^{-12} \cdot e^{4,75 \cdot 10^{-2} \cdot t} \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

berechnet (mit t = Kühlmitteltemperatur in °C).

4. Hypothesen für die Berechnung der Stromerzeugungskosten

4.1. Anlagekosten

Aus der Gesamtsumme der Anlagekosten wurden einige besonders wichtige und für den Reaktor charakteristische Posten herausgelöst und gesondert betrachtet, während alle übrigen Kosten global in einer Summe enthalten sind.

Die wichtigen Einzelposten sind:

Investition an D ₂ O im Reaktor	62 \$/kg D ₂ O
Brennstoff (UC) im Reaktor	90 \$/kg U
Brennstoffkanäle komplett ohne Brennstoff	7000 \$/Kanal

Der Annuitätsfaktor beträgt gleichmäßig 10 % p.a. Es wird unterstellt, daß das Kraftwerk einen jährlichen Lastfaktor von 0,8 entsprechend 7000 Stunden Vollastbetrieb pro Jahr aufweist.

- 1) Private Mitteilung von M. VAN DER VENNE
- 2) Vergleiche auch Abschnitt 6.1.
- 3) Kanadischer Bericht PR-CM 27, Section 7

Die Kosten der Kühlmittelreinigungsanlage ändern sich nach Informationen aus Contract 042-62-1 ORGC nur geringfügig (um 2,4 %), falls infolge wechselnden HB-Gehaltes im Kühlmittel (z.B. von 30 % auf 5 %) der Durchsatz der Anlage gesteigert werden muß. Diese Kostenänderung kann vernachlässigt werden.

4.2. Brennstoffkosten

Diese Kosten erfassen den laufenden Verbrauch an Brennstoffen durch Abbrand. Sie sind nahezu unabhängig vom HB-Gehalt des Kühlmittels und werden lediglich etwas vom Nettowirkungsgrad η_{en} der Gesamtanlage beeinflusst.

4.3. Kühlmittelkosten

Hierunter fallen die Kosten für den Verbrauch und Ersatz des Kühlmittels, hervorgerufen durch radiolytische und pyrolytische Zersetzung der Moleküle. Der Preis des OM-2 wurde mit 0,5 \$/kg angesetzt.

Resultate

5. Änderungen der Reaktorgröße als Funktion des HB-Gehaltes

Fig. 4 zeigt den Verlauf einiger Werte (Dichte, spezifische Wärme) als Funktion des HB-Gehaltes. Zugleich ist die mittlere Kühlmitteltemperatur t_m angegeben.

Mit steigendem Gehalt an HB verringert sich neben der Wärmeübergangszahl $\bar{\alpha}$ auch die für die Wärmeübertragungseigenschaften charakteristische Stanton-Kennzahl St (Fig. 5). Eine Verringerung von $\bar{\alpha}$ und St bewirkt, daß bei konstant gehaltenen Temperaturen t_1 und t_{gm} die Aufwärmespanne Δt in einem Kühlkanal kleiner wird (Fig. 6); dadurch steigt die mittlere Kühlmitteltemperatur t_m an.

Wie bereits in Abschnitt 2 dargelegt, ändert sich infolgedessen auch die Coregröße mit dem HB-Gehalt des Kühlmittels. Die

Wärmeübergangszahl $\bar{\alpha}$ nimmt beim Übergang von 5 % auf 30 % HB um ca. 6,5 % ab (bei 30 % HB ist $\bar{\alpha} = 1,10 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, Fig. 5).

Diese Verschlechterung der Wärmeübertragungseigenschaften bewirkt einen Anstieg der mittleren Kühlmitteltemperatur t_m um ca. $7 \text{ } ^\circ\text{C}$ auf $328 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Fig. 4); zugleich verringert sich damit die Aufwärmspanne Δt um $14 \text{ } ^\circ\text{C}$ auf $143 \text{ } ^\circ\text{C}$ (bei festgehaltenen Temperaturen $t_1 = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$ und $t_{gm} = 440 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Aus dem Vorstehenden sowie aus der Forderung konstanter Kühlmittelgeschwindigkeit ($V = 800 \text{ cm/s}$) und konstanter Corehöhe ($H = 500 \text{ cm}$) bei allen HB-Gehalten resultiert die Notwendigkeit, den Neutronenfluß ϕ max. mit zunehmendem HB-Gehalt zu verringern (Fig. 7), wodurch die aus einem zentralen Kanal entnehmbare Leistung W_{fcc} von 3,68 auf 3,32 MW absinkt (Fig. 8). Um die geforderte elektrische Bruttoleistung von 250 MWeb zu erzeugen, muß die Zahl der Kanäle N_c von 333 auf 366 erhöht werden; der Coreradius nimmt von 280 cm auf 294 cm zu. Hand in Hand damit steigt der Bedarf an D_2O im Core von 174 t auf 188 t an, außerdem werden 6,25 t Brennstoff mehr benötigt. Mit der zunehmenden Zahl der Kanäle im Core steigt auch der Kühlmitteldurchsatz D leicht an (von $2,50 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $2,75 \text{ m}^3/\text{s}$, Fig. 6)¹⁾.

Die oben erwähnte Verringerung der Aufwärmspanne Δt führt ferner dazu, daß der thermodynamische Wirkungsgrad r_{net} des Reaktors leicht zunimmt (Fig. 6). Dasselbe gilt für den Nettowirkungsgrad η_{en} der Gesamtanlage. (Unter Annahme eines Dampfprozesses mit Überhitzung, aber ohne Zwischenüberhitzung.)

6. Zersetzungsrate und im Kühlmittel gespeicherte Neutronenenergie

6.1. Allgemeines

Die radiolytische Zersetzung der Kühlmittelmoleküle unter dem Einfluß der Neutronenbestrahlung ist in erster Näherung proportional der Höhe des Neutronenflusses ϕ im Reaktor ($\approx 8,5 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$) bzw. proportional der an das Kühlmittel übertragenen Neutronenenergie E_0^+ ($\approx 2,15 \text{ MW}$).

¹⁾ Das bedeutet eine Steigerung der Pumpenleistung um 10 %, damit eine leichte Erhöhung der Anlagekosten, die in dieser Untersuchung aber vernachlässigt wurde.

Lediglich die schnellen und intermediären Neutronen tragen infolge ihrer hohen kinetischen Energie zur Zersetzung bei. Neben den Neutronen treten einige wenige β auf, die praktisch ohne Bedeutung für die Radiolyse sind. Die durch die γ -Strahlung verursachte radiolytische Zersetzung ist ebenfalls relativ gering (≈ 9 kg/h) und nahezu unabhängig vom HB-Gehalt des Kühlmittels.

6.2. Bestimmung der im Kühlmittel gespeicherten Neutronenenergie

Der Gang der Rechnung ist kurz skizziert folgender:

Man berechnet zunächst die Stärke der Neutronenquelle im Reaktorzentrum (thermischer Fluß ϕ_{\max} aus ORION-Rechnungen), um damit den Fluß an Spaltneutronen zu bestimmen (mittlere Energie der Spaltneutronen zu 2 MeV¹⁾ angesetzt).

Für die im Kühlmittel gespeicherte Neutronenenergie nimmt man an, daß sie sich proportional zum Bremsvermögen der beiden Moderatorstoffe OM-2 und D₂O verteilt. Ferner soll der schnelle Fluß im OM-2 1,5 mal so groß sein wie im D₂O (Zwei-Gruppen-Theorie). Mit den Indices "0" für OM-2 und "1" für D₂O gilt

$$F = \frac{\phi_0 \left(\int \Sigma_s \right)_0 V_0}{\phi_0 \left(\int \Sigma_s \right)_0 V_0 + \phi_1 \left(\int \Sigma_s \right)_1 V_1} \quad \text{und } \phi_0 = 1,5 \cdot \phi_1$$

Der Wert F = Bruchteil der im OM-2 deponierten Neutronenenergie ergibt etwa 0,11, d.h. 11 % der Neutronenenergie werden im Kühlmittel gespeichert, der Rest im D₂O.

Die gesamte, auf das Kühlmittel übertragene Neutronenenergie E_0^+ , gemittelt über das ganze Core, ist in Fig. 7 angegeben. Mit steigendem HB-Gehalt wird der thermische Neutronenfluß ϕ_{\max} kleiner. Die Gründe dafür - Abnahme der Wärmeübergangszahl $\bar{\alpha}$ und

1) Der Wert ist etwas hoch gegriffen, denn man müßte bei genauer Rechnung noch die Energieverluste der Neutronen durch unelastische Stöße im Brennstoff berücksichtigen. Nach den von M. Rief (CCR-ISPRA) durchgeführten Monte-Carlo-Rechnungen beträgt die mittlere Energie der aus dem Brennstoff austretenden Neutronen 1,6 MeV.

Beschränkung der Temperaturen t_1 und t_{gm} sowie konstante elektrische Leistung W_{el} - sind bereits weiter oben dargelegt. Die im Kühlmittel deponierte Neutronenenergie E_0^+ ändert sich jedoch nur wenig, da zwar der Fluß \dot{Q}_{max} stark abnimmt, zugleich aber mit wachsendem HB-Gehalt durch die steigende Zahl der Brennstoffkanäle auch das Kühlmittelvolumen im Core kräftig zunimmt (siehe auch Fig. 8).

7. Einfluß des HB-Gehaltes auf den Kühlmittelverbrauch

Nach den in Fig. 3 getroffenen Annahmen über den Verlauf des G_n als Funktion des HB-Gehaltes ergeben sich verschiedene stündliche Zersetzungsraten Q_{rn} , die in Fig. 9 dargestellt werden. Die Zersetzung infolge Neutronenstrahlung beträgt je nach Hypothese zwischen 55 kg/h und 104 kg/h.

Fig. 10 zeigt den Anteil der radiolytischen Zersetzung durch γ -Strahlung $Q_{r\gamma}$ sowie die Zersetzung durch Pyrolyse Q_p . Das $Q_{r\gamma}$ beläuft sich, nahezu unabhängig vom HB-Gehalt, auf etwa 9 kg/h.

Auch das Q_p ändert sich kaum mit dem HB-Gehalt (21 kg/h bis 24 kg/h).

Fig. 11 schließlich zeigt die gesamte Kühlmittelzersetzung Q_r und Q_p (durch Neutronen, γ -Strahlung und Pyrolyse) entsprechend den verschiedenen Hypothesen über Q_{rn} . Die stündlichen Zersetzungsraten liegen zwischen 88 kg/h und 134 kg/h je nach den verwendeten Hypothesen.

8. Einfluß des HB-Gehaltes auf die Kosten der Stromerzeugung

8.1. Anlagekosten

Wie aus den vorhergehenden Abschnitten zu entnehmen ist, steigen mit wachsendem HB-Gehalt im Kühlmittel die Investitionen an D_2O , Brennstoff und Kanälen ziemlich stark an. Dies

führt zu einer Erhöhung der Anlagekosten i um $\Delta i = 0,12$ mills/KWh (beim Übergang von 5 % HB auf 30 % HB)¹⁾, (Fig. 12). Die leichte Verteuerung der Kühlmittelreinigungsanlage bei einem Betrieb des Reaktors mit 5 % HB ist wegen Geringfügigkeit vernachlässigt worden. Von Seiten der Anlagekosten her spricht demnach alles dafür, den Reaktor mit einem Kühlmittel von 5 % HB-Gehalt zu betreiben, um bei den Anlagekosten 0,12 mills/KWh einzusparen.

8.2. Brennstoffkosten

Mit steigendem Gehalt an HB zeigen die Kosten des Brennstoffverbrauches a_1 eine leicht fallende Tendenz (Fig. 12), was auf die Zunahme des Wirkungsgrades η_{en} zurückzuführen ist (0,03 mills/KWh Ersparnis bei einem Betrieb des Reaktors mit 30 % HB). Der Abbrand des Brennstoffes ändert sich praktisch nicht mit dem HB-Gehalt im Kühlmittel, da sich die durch Flußänderung, Dichteänderung des Kühlmittels und Änderung der Coregröße hervorgerufenen Effekte in etwa gegenseitig kompensieren.

8.3. Kühlmittelkosten und Wahl des HB-Gehaltes

Für die Beurteilung des zu wählenden HB-Gehaltes im Kühlmittel ist die Summe der Kostenvariation von Anlage- und Brennstoffkosten $\Delta(i + a_1)$ maßgebend (Fig. 12). Die Kostendifferenz zwischen den Betriebspunkten 5 % HB und 30 % HB beträgt 0,09 mills/KWh.

Sobald die Kühlmittelkostendifferenz Δa_2 zwischen den beiden Betriebszuständen 5 % HB und 30 % HB niedriger als 0,09 mills/KWh ist, wird der Betrieb mit 5 % HB im Hinblick auf die Gesamtkosten der Stromerzeugung vorteilhafter. Ein Blick auf die in Fig. 13 angegebene Änderung der Gesamtkosten Δw zeigt, daß unter Annahme einer Funktion 0. oder 1. Grades für G_n als Funktion des HB-Gehaltes ein Reaktorbetrieb mit 5 % HB im Kühlmittel billigeren Strom liefert als bei 30 % HB.

Für G_n als Funktion 0. Grades beträgt der Kostenvorteil volle 0,09 mills/KWh, für G_n als Funktion 1. Grades immerhin noch 0,04 mills/KWh. Setzt man jedoch für G_n eine Funktion 2. Grades an, so ist es gleichgültig, ob mit 5 % oder 30 % HB im Kühlmittel gearbeitet wird. Man findet für diesen Fall einen ganz kleinen Kostenvorteil von 0,005 mills/KWh zugunsten eines Betriebspunktes mit 30 % HB, was in der Größenordnung der Rechenungenauigkeiten liegt (deshalb ist dem bei 20 - 25 % HB in Kurve 2 auftretenden Kostenminimum auch keine große Bedeutung beizumessen).

8.4. Vergleich ORGEL und OMR

Mit zunehmendem HB-Gehalt steigen beim ORGEL-Reaktor die Anlage- und Brennstoffkosten $\Delta (i + a_1)$ stark an, in erster Linie durch die notwendig werdende Mehrinvestition für das teure D_2O . Demgegenüber tritt naturgemäß der Einfluß der Kühlmittelkosten Δa_2 auf die Variation der Gesamtstromerzeugungskosten zurück, sofern man nicht das G_n als Funktion 2. Grades annimmt.

Beim OMR fällt die Steigerung der Anlage- und Brennstoffkosten mit zunehmendem HB-Gehalt bei weitem nicht so ins Gewicht, da Moderator und Kühlmittel (Santowax R) sehr billig sind. Hier spielt die Variation der Kühlmittelkosten Δa_2 als Funktion des HB-Gehalts deshalb eine entscheidende Rolle bei der Wahl des Betriebspunktes vom 30 % HB.

9. Schlußfolgerung

Zur endgültigen Entscheidung über den HB-Gehalt des organischen Kühlmittels wäre es dringend erforderlich, durch weitere Versuche festzustellen, welche der 3 Hypothesen über den Verlauf des G_n als Funktion des HB-Gehalts als verlässlich angesehen werden kann. Beim gegenwärtigen Stand der Dinge kann der vorteilhaftere Betriebspunkt noch nicht eindeutig festgelegt werden. Man kann aber bereits jetzt

feststellen, daß der Betrieb des Reaktors bei Benutzung eines organischen Kühlmittels vom Typ OM-2 auf alle Fälle mit einem HB-Gehalt < 20 % erfolgen sollte (Fig. 13).

10. Verzeichnis der im Bericht verwendeten Symbole

W_{eb}	= elektrische Bruttoleistung des Kraftwerkes
η_{en}	= Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerkes
r_{net}	= thermodynamischer Wirkungsgrad des Dampfprozesses
$H (L)$	= aktive Corehöhe bzw. Kühlkanallänge
V	= maximale mittlere Kühlmittelgeschwindigkeit im Core
V_u	= Uranquerschnitt im Brennelement
λ_u	= Rippenkoeffizient der Brennstoffstabhülle
J_1	= Distanz zwischen zwei Brennstoffstäben
$t (z)$	= Kühlmitteltemperatur entlang des Kühlkanals
$t_g (z)$	= Wandtemperatur der Brennstoffhülle entlang des Kühlkanals
t_1	= Kühlmittelaustrittstemperatur
t_{gm}	= maximale zulässige Wandtemperatur der Brennstoffstabhülle
t_m	= mittlere Kühlmitteltemperatur im Reaktor
Δt	= Aufwärmespanne des Kühlmittels im Kühlkanal
S	= wärmegebende Oberfläche eines Brennstoffelementes
S_{th}	= wärmeabgebender Umfang der Brennstoffstäbe eines Brennelementes
W_u	= aus dem Brennstoff eines Brennelementes abgeführte Wärmemenge
α	= Wärmeübergangszahl des organischen Kühlmittels
St	= Stanton-Kennziffer
W_{fcc}	= Wärme-Leistung eines zentralen Kanals
N_c	= Zahl der Kühl- bzw. Brennstoffkanäle im Reaktorcore
D	= Kühlmitteldurchsatz im Core
ϕ_{max}	= maximaler thermischer Neutronenfluß im Zentrum des Reaktors, gemittelt über den Querschnitt des Brennelementes in radialer und axialer Richtung

- E_o^+ = im gesamten Kühlmittel des Cores gespeicherte Neutronenenergie
- P = stündliche pyrolytische Zersetzungsrate des organischen Kühlmittels
- G_n = Zahl der pro 100 eV absorbiertes Neutronenenergie zerstörten Kühlmittelmoleküle
- G_{γ} = Zahl der pro 100 eV absorbiertes γ -Energie zerstörten Kühlmittelmoleküle
- $(\{\Sigma_s\})_o$ = Bremsvermögen des organischen Kühlmittels
- $(\{\Sigma_s\})_1$ = Bremsvermögen des Moderators D_2O
- V_o = Kühlmittelquerschnitt im Brennelement der Einheitszelle
- V_1 = D_2O -Querschnitt in der Einheitszelle
- Q_{rn} = Menge des durch Neutronenstrahlung pro Stunde zerstörten Kühlmittels
- $Q_{r\gamma}$ = Menge des durch γ -Strahlung pro Stunde zerstörten Kühlmittels
- Q_r = Menge des durch Radiolyse pro Stunde zerstörten Kühlmittels
- Q_p = Menge des durch Pyrolyse pro Stunde zerstörten Kühlmittels
- i = fixe Kosten der Stromerzeugung (Anlagekosten)
- a_1 = variable Kosten der Stromerzeugung (Brennstoffkosten)
- a_2 = variable Kosten der Stromerzeugung (Kühlmittelkosten)
- w = Gesamtkosten der Stromerzeugung

LITERATUR

- 1) B. Chambaud, F. Lafontaine, P. Tauch

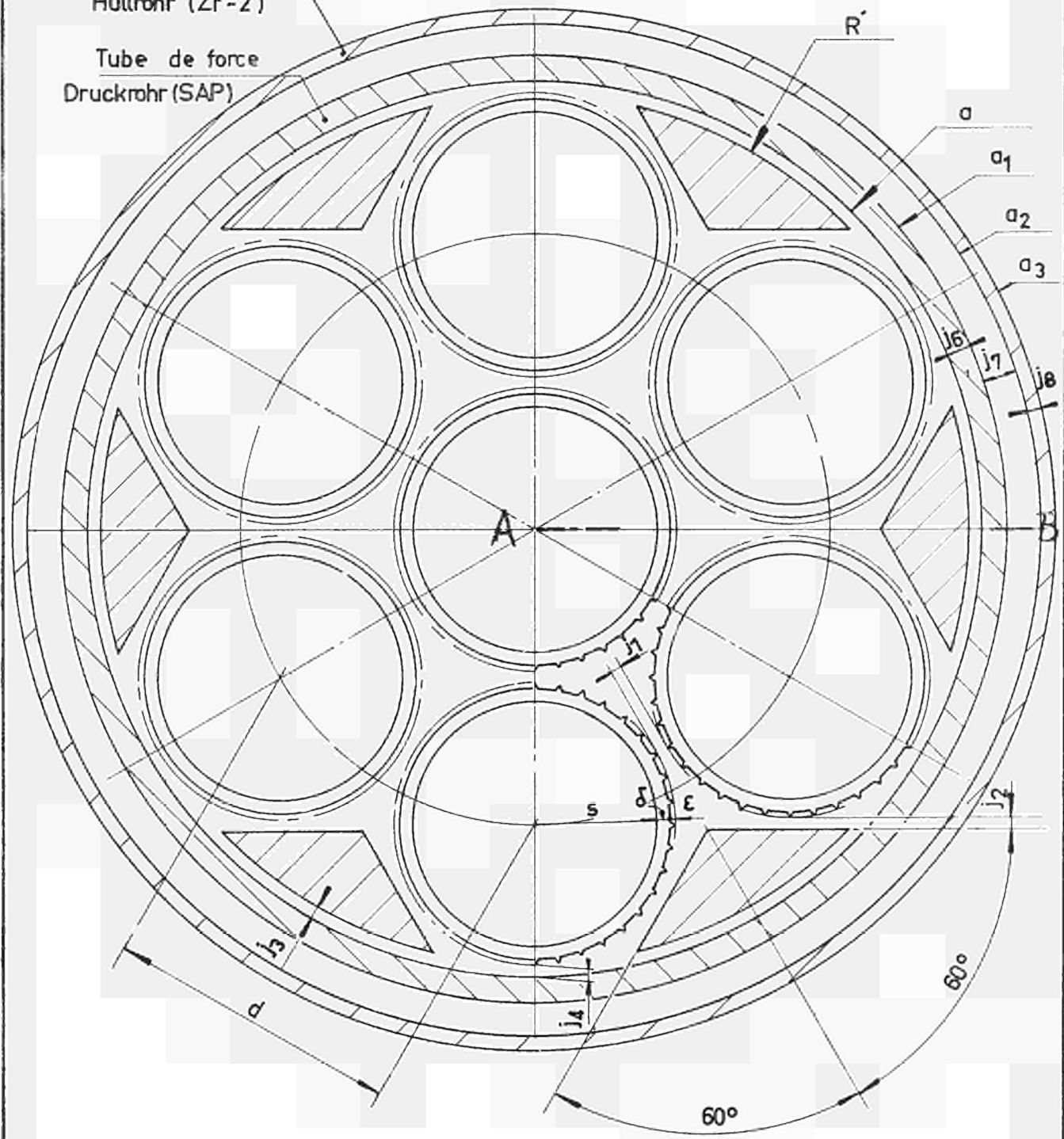
Etude de la zone optimale des paramètres indépendants d'un réacteur ORGEL associé à une centrale de 250 MWeb.

Eléments combustibles en UC gainés SAP type autoportant en grappes de 7 crayons.

EUR 464. f (1963)

Brennelement - Querschnitt

Tube de calandre
Hüllrohr (Zr-2)
Tube de force
Druckrohr (SAP)

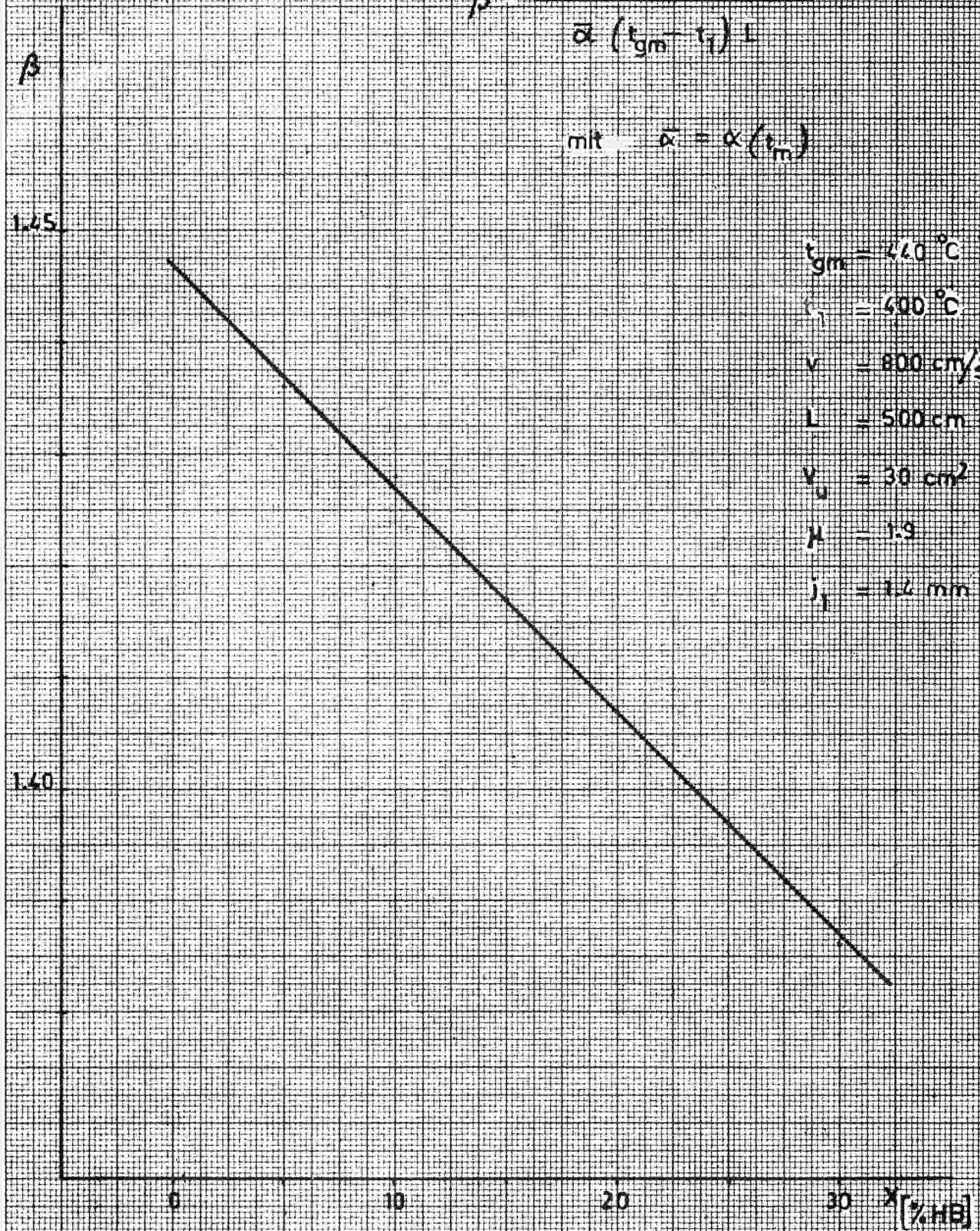


Unité : mm
Ech. 2

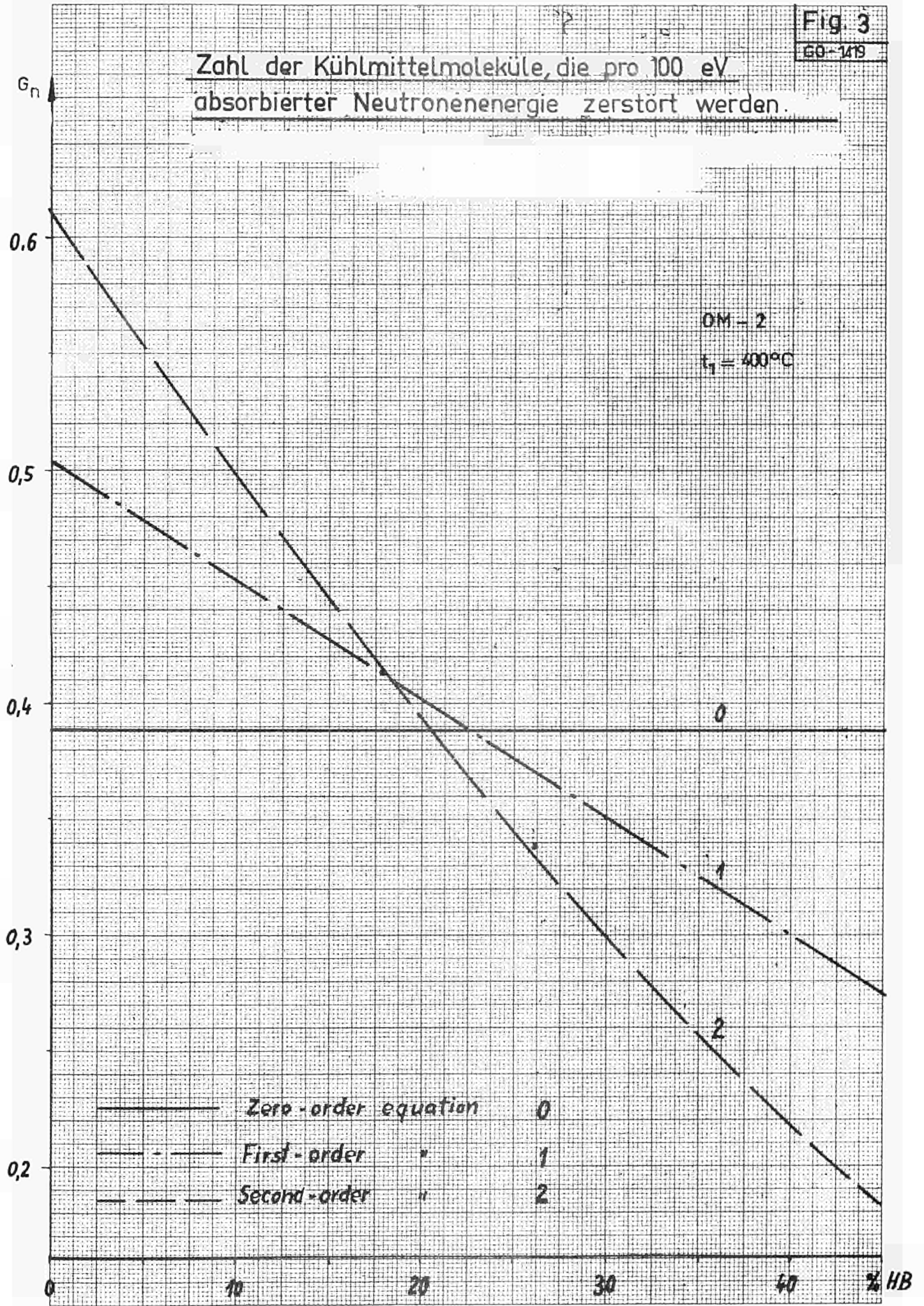
Korrelationsfaktor β als Funktion
des HB-Gehaltes

$$\beta = \frac{\int_{t_i}^{t_{gm}} \alpha(t_g - t) dz}{\bar{\alpha} (t_{gm} - t_i) L}$$

mit $\bar{\alpha} = \alpha(t_m)$



Zahl der Kühlmittelmoleküle, die pro 100 eV absorbiertes Neutronenenergie zerstört werden.



Physikalische Eigenschaften und mittlere Temperatur des Kühlmittels als Funktion des

HB-Gehaltes.

Fig. 4
60-1420

$H = 500 \text{ cm}$ $W_{\text{web}} = 250 \text{ MWe}$
 $V_u = 30 \text{ cm}^2$ $t_1 = 400^\circ\text{C}$
 $l_1 = 1\frac{1}{2} \text{ mm}$ $t_{\text{gm}} = 440^\circ\text{C}$
 $\mu = 1,9$ $v = 800 \text{ cm/s}$

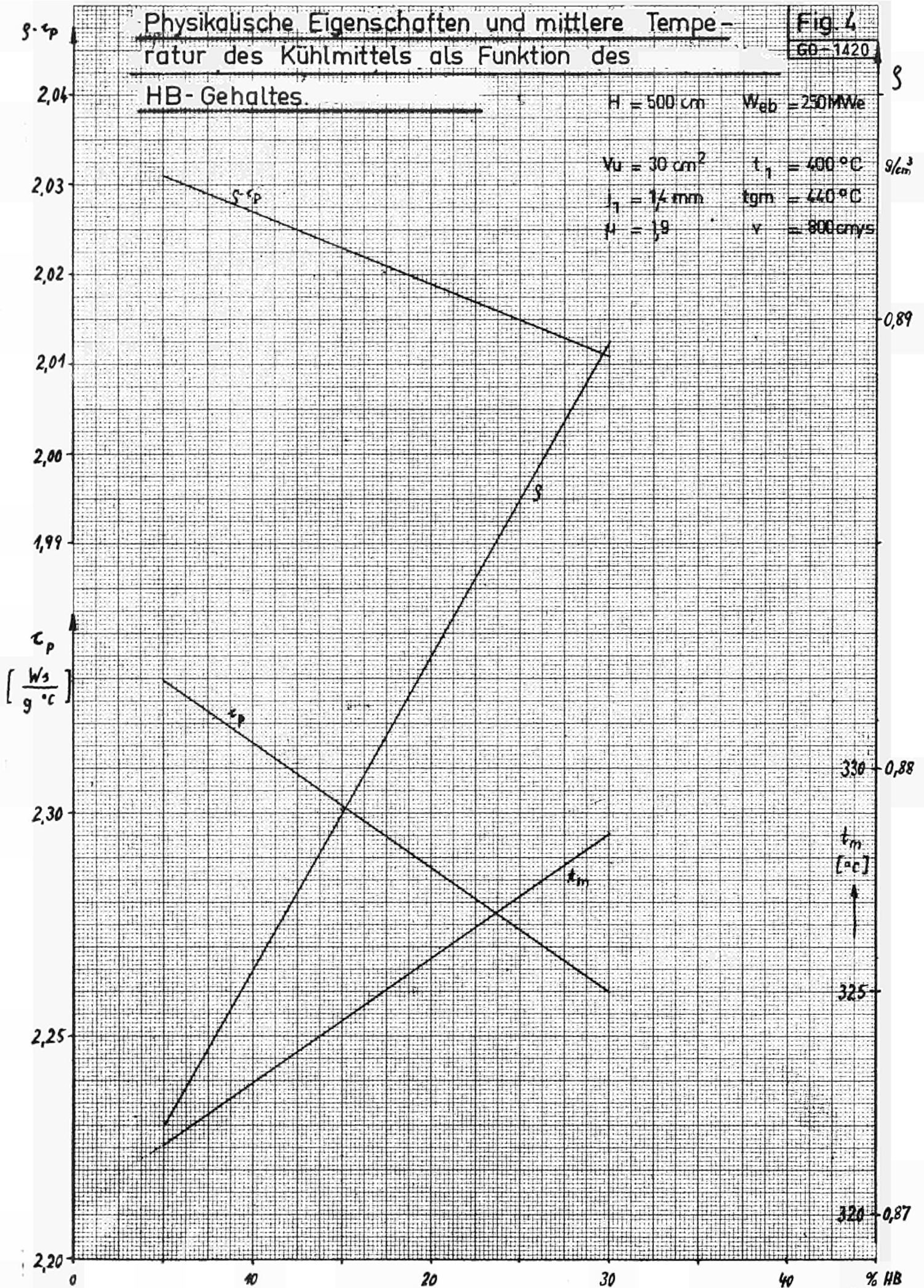


Fig 5
60-1421

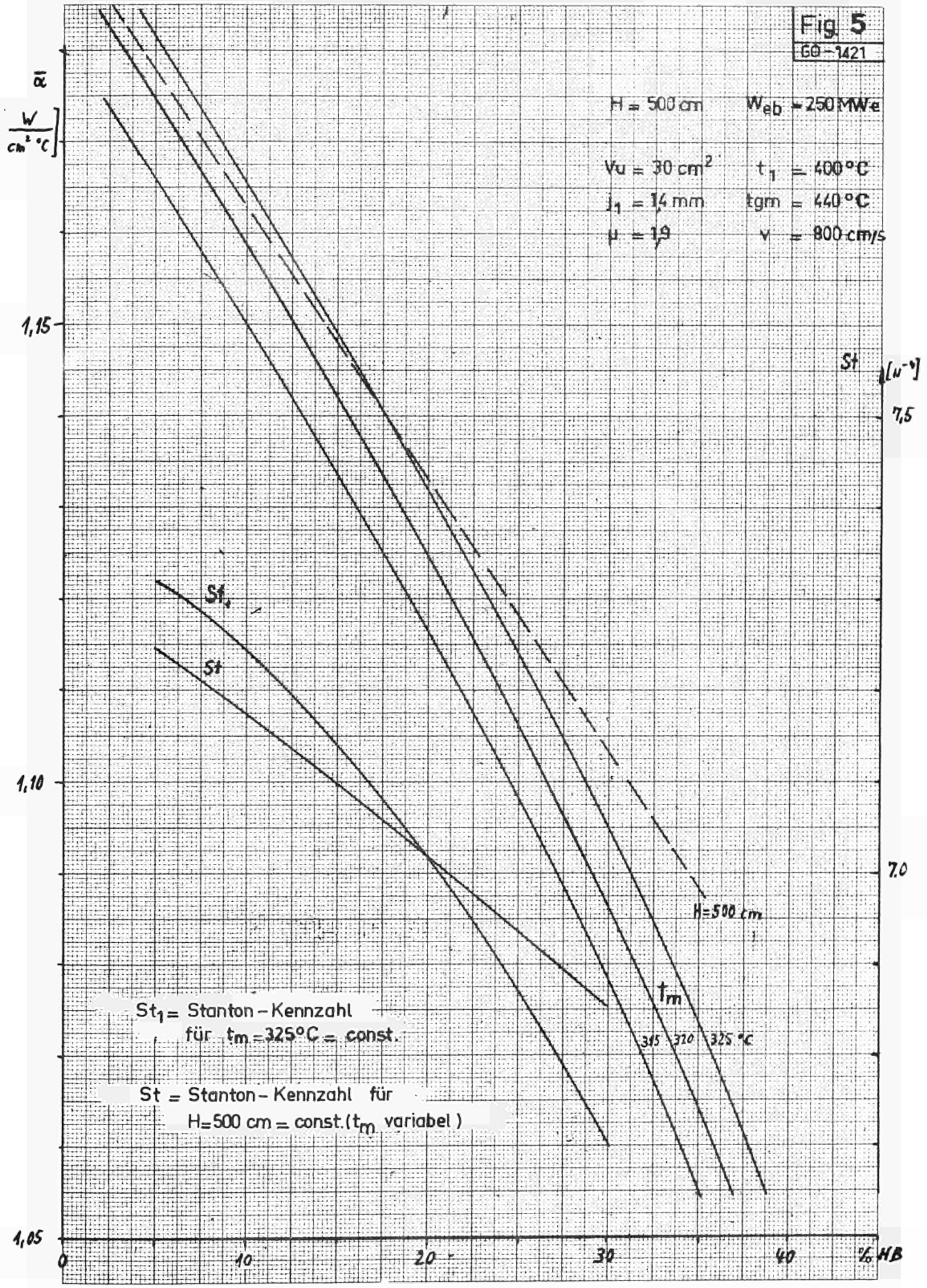


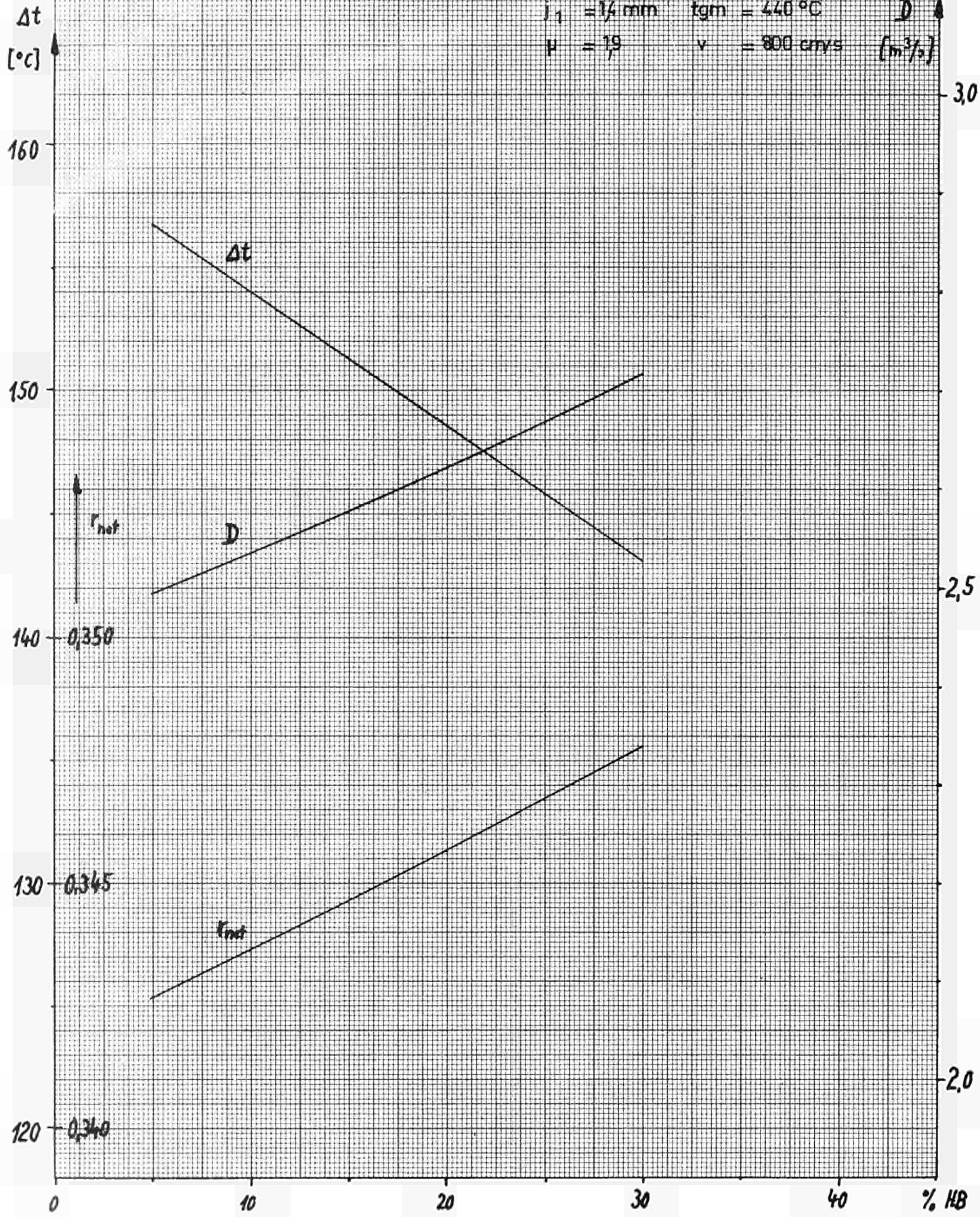
Fig 6
60-1130

H = 500 cm Web = 250 MWe

$V_u = 30 \text{ cm}^2$ $t_1 = 400^\circ\text{C}$

$j_1 = 1\frac{1}{4} \text{ mm}$ $t_{gm} = 440^\circ\text{C}$

$\mu = 19$ $v = 800 \text{ cm/s}$ D (m^3/s)



Im Kühlmittel des Reaktors gespeicherte
Neutronenenergie E_0^*

Thermischer Neutronenfluß im Brennelement

ϕ_{max} [10^{13} n/cm²s]

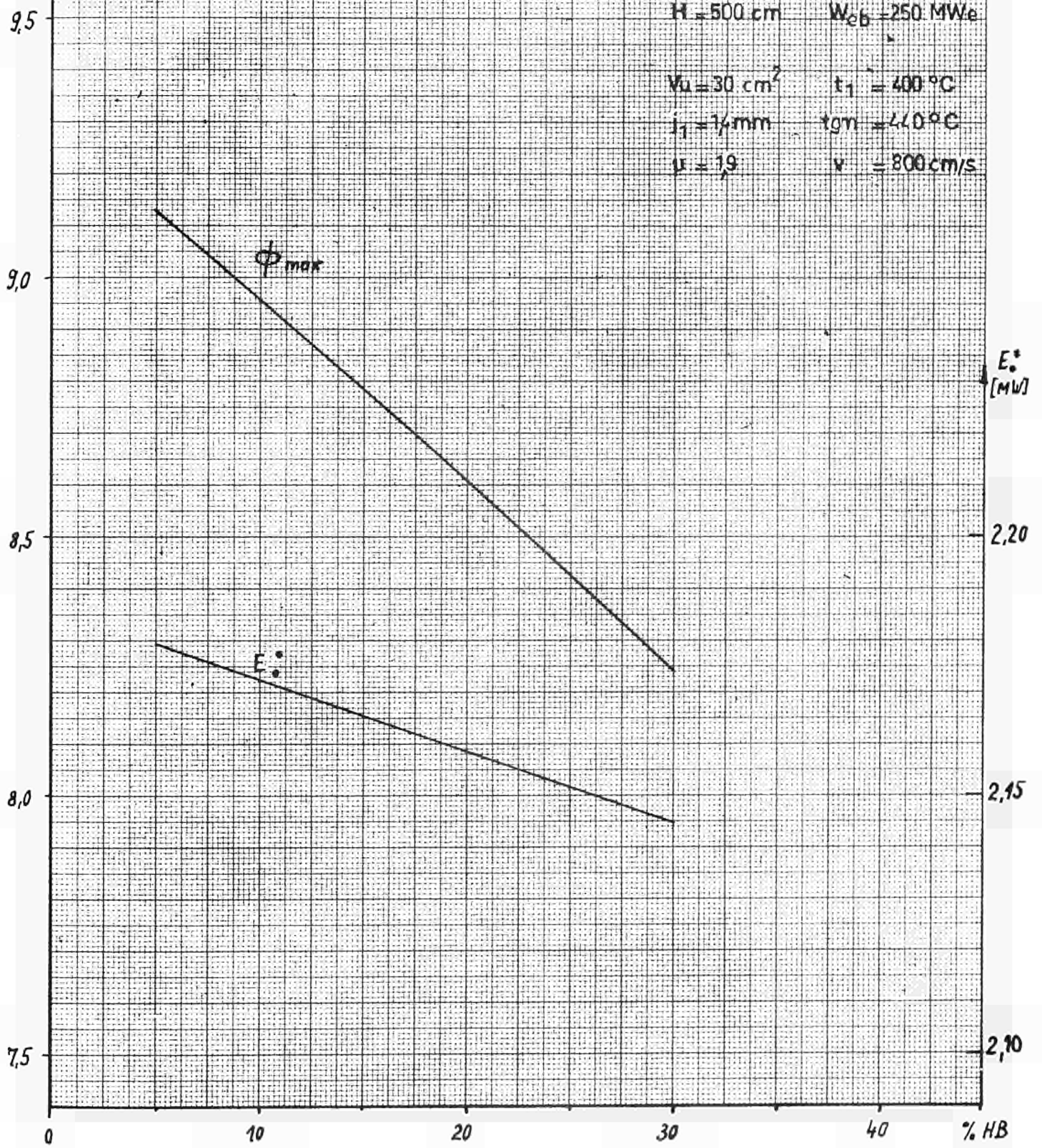
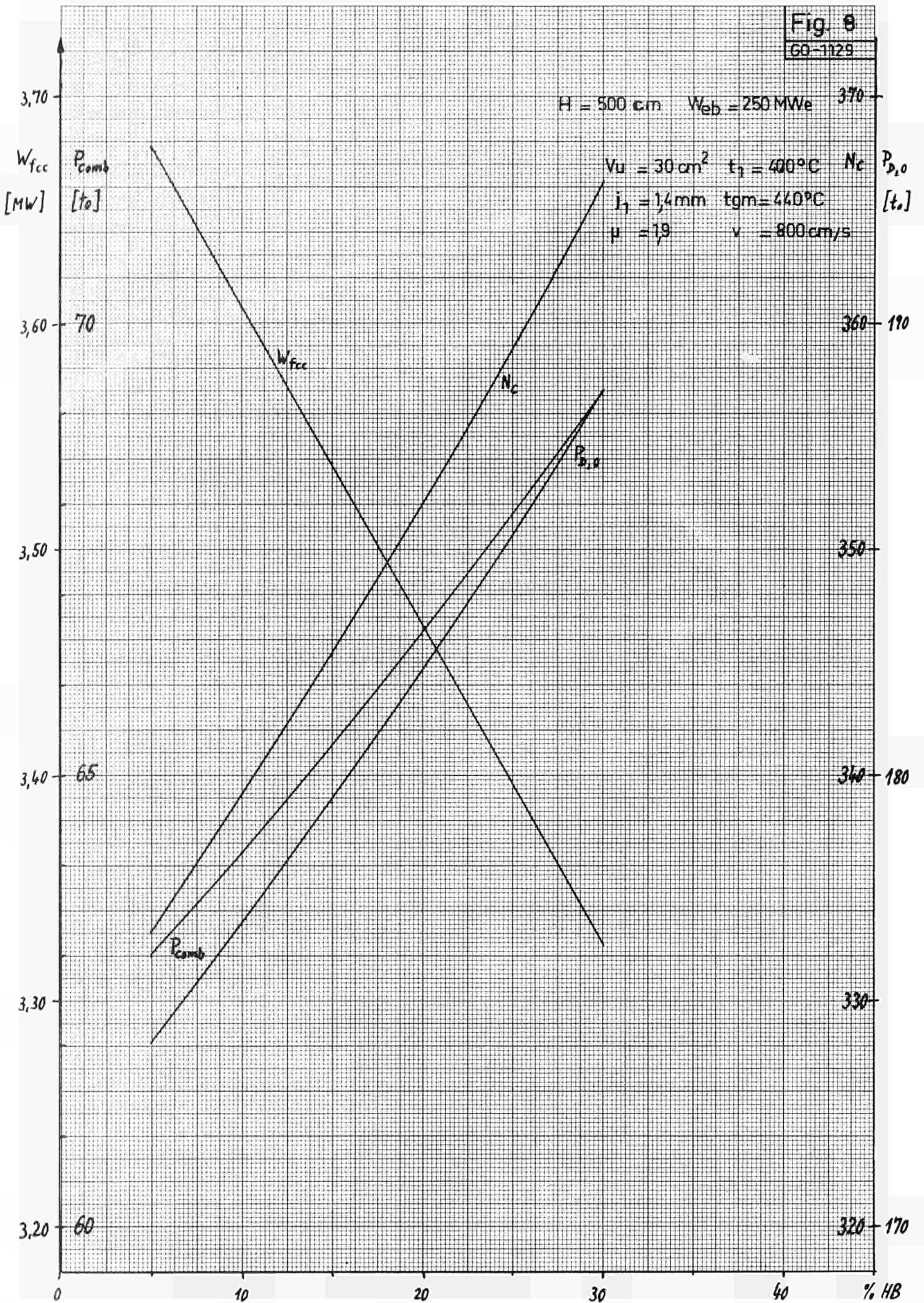
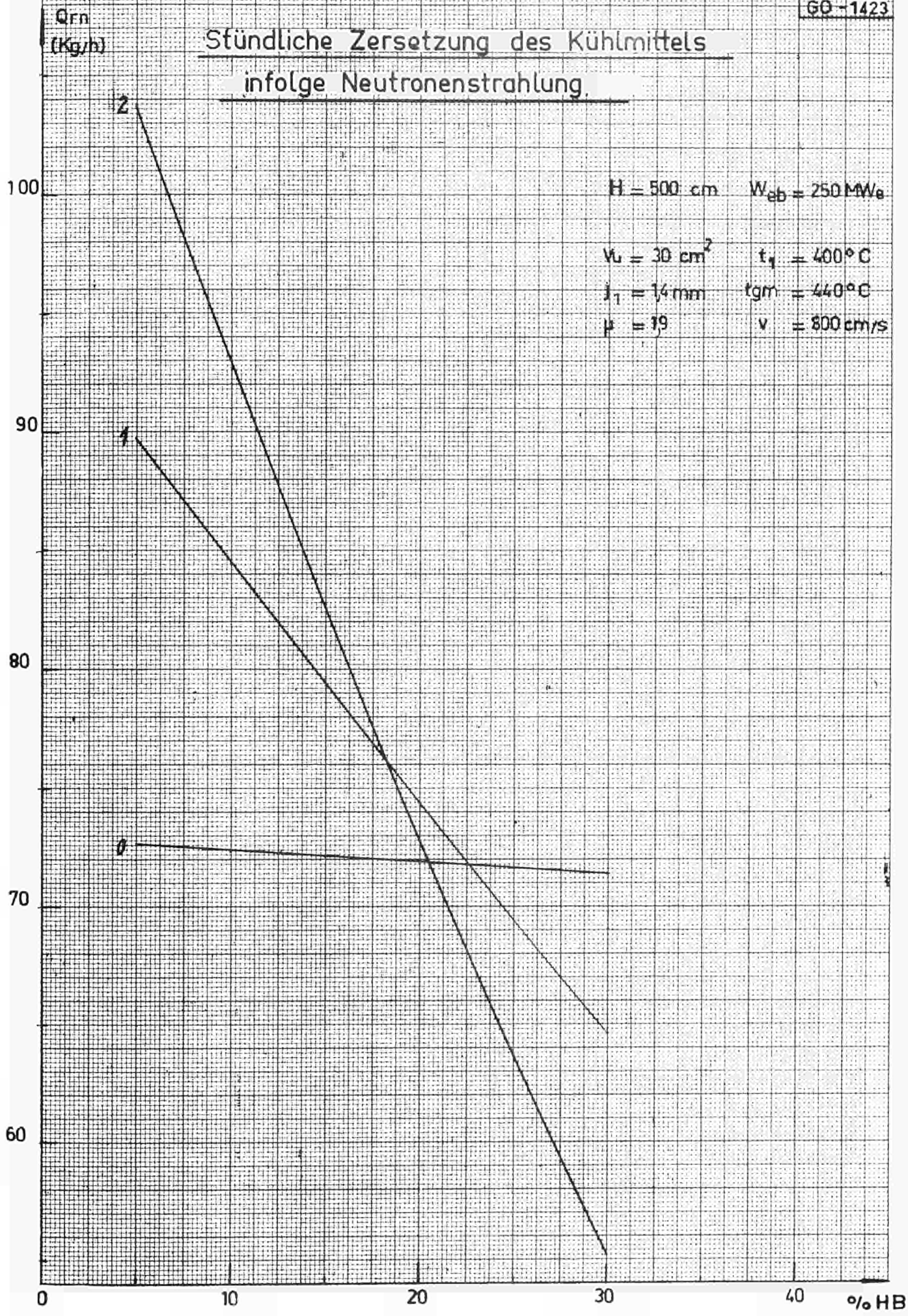


Fig. 8
60-1129

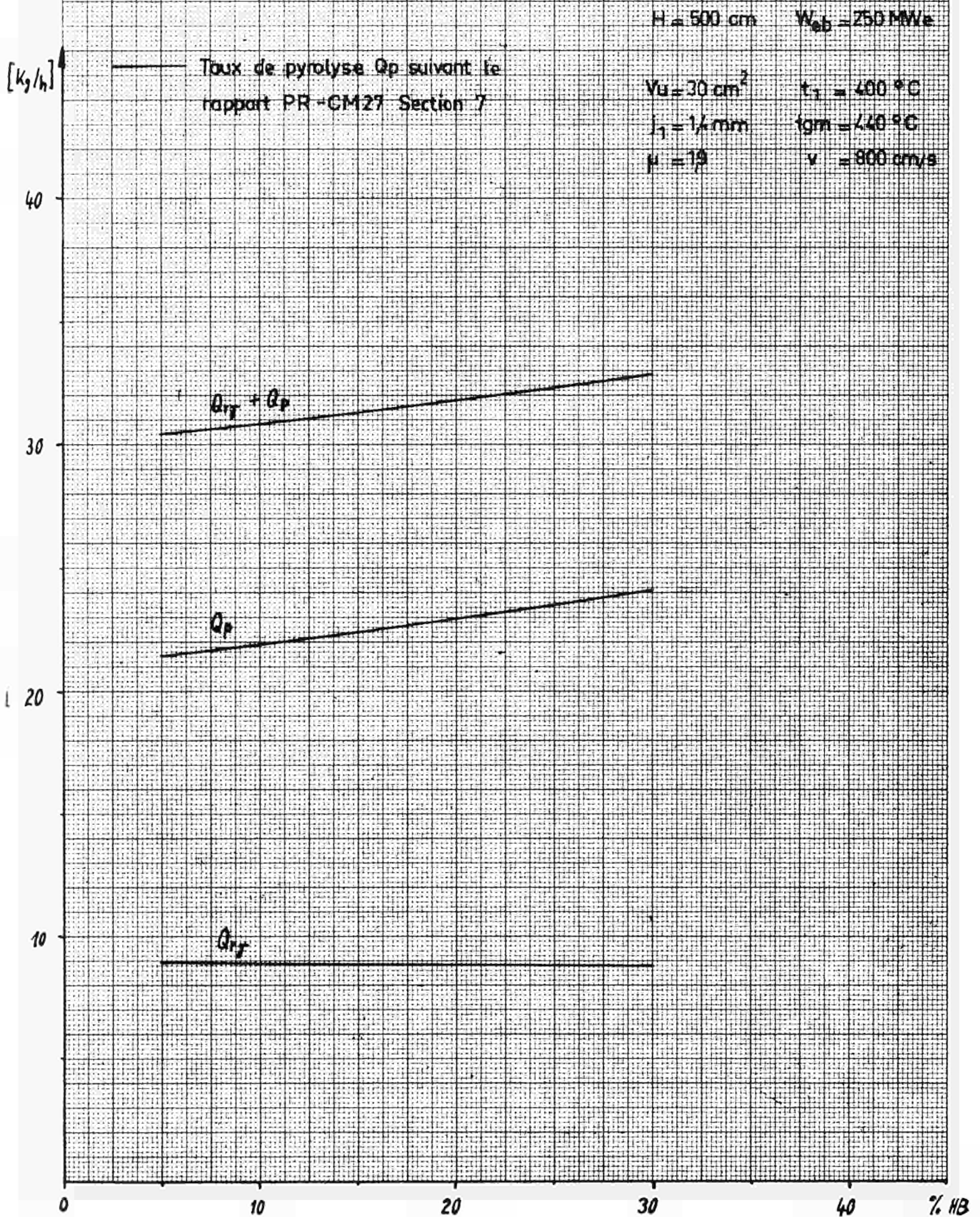


Stündliche Zersetzung des Kühlmittels infolge Neutronenstrahlung



Stündliche Zersetzung des Kühlmittels infolge Radiolyse durch γ -Strahlung und Pyrolyse.

Fig 10
60-1424

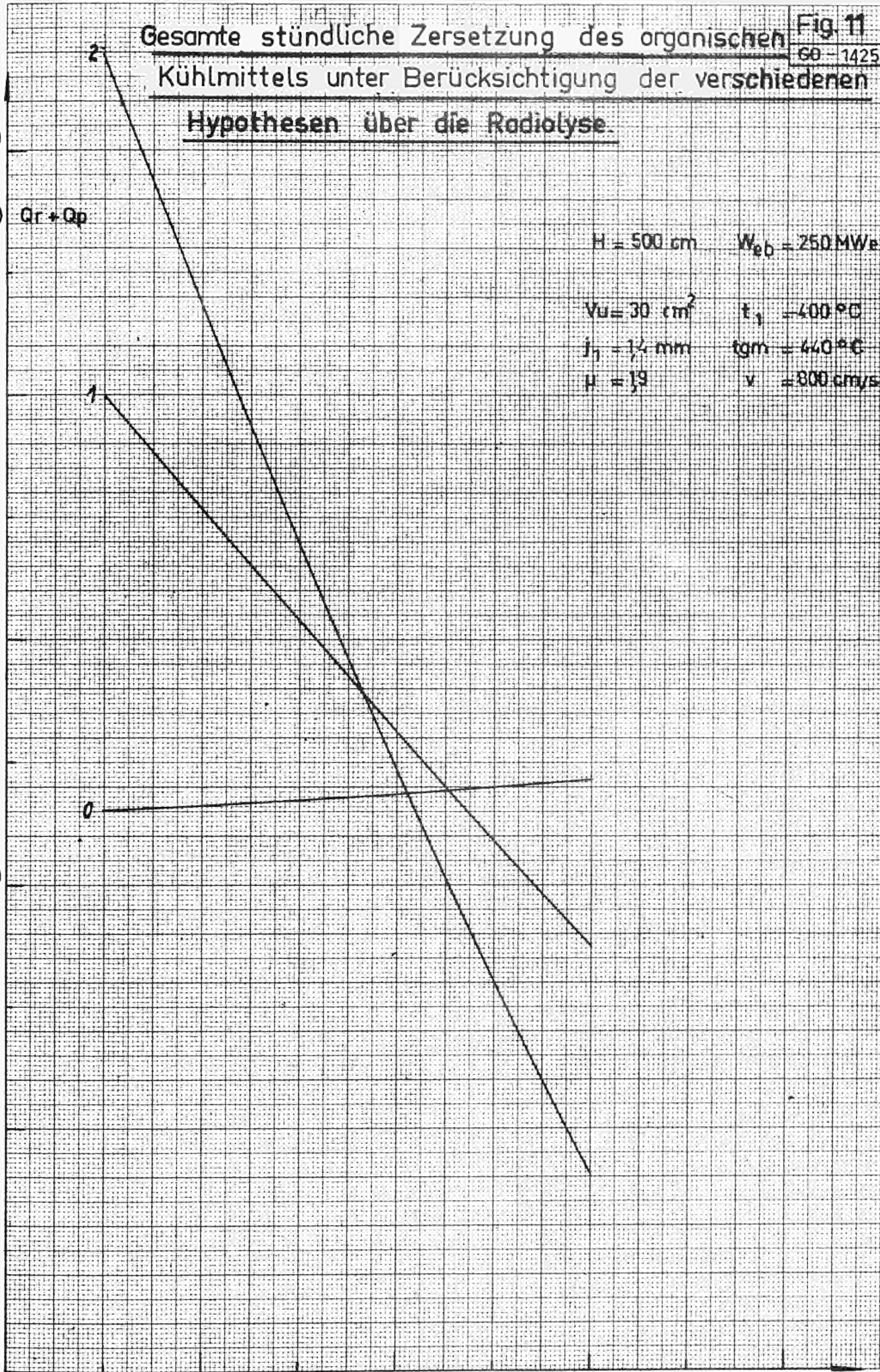


Gesamte stündliche Zersetzung des organischen Kühlmittels unter Berücksichtigung der verschiedenen Hypothesen über die Radiolyse.

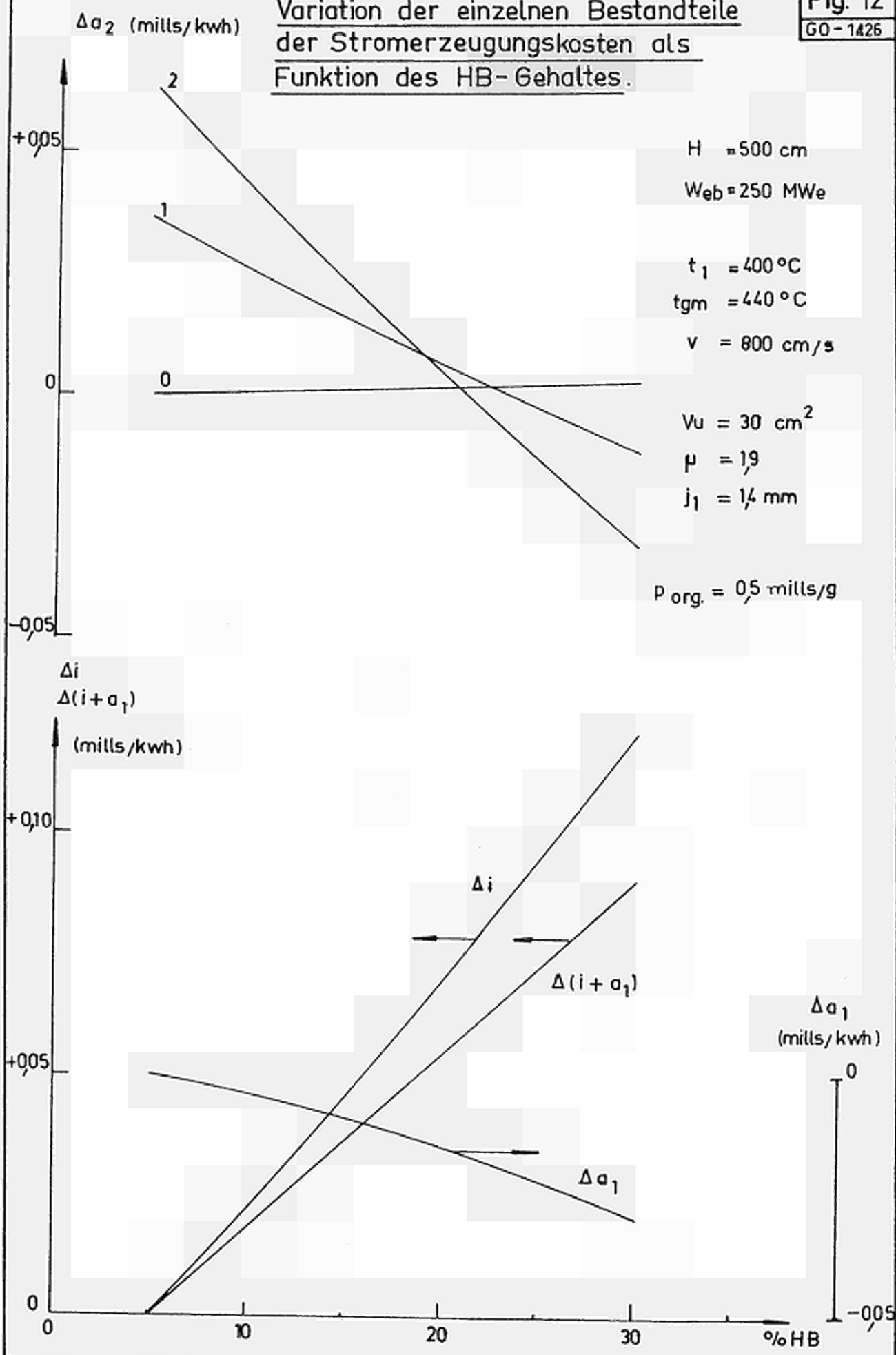
Fig. 11
60-1425

(Kg/h) Gr + Qp

$H = 500 \text{ cm}$ $W_{\text{eB}} = 250 \text{ MWe}$
 $V_u = 30 \text{ cm}^3$ $t_1 = 400^\circ\text{C}$
 $J_1 = 14 \text{ mm}$ $t_{\text{gm}} = 440^\circ\text{C}$
 $\mu = 1,9$ $v = 800 \text{ cm/s}$



Variation der einzelnen Bestandteile
der Stromerzeugungskosten als
Funktion des HB-Gehaltes.

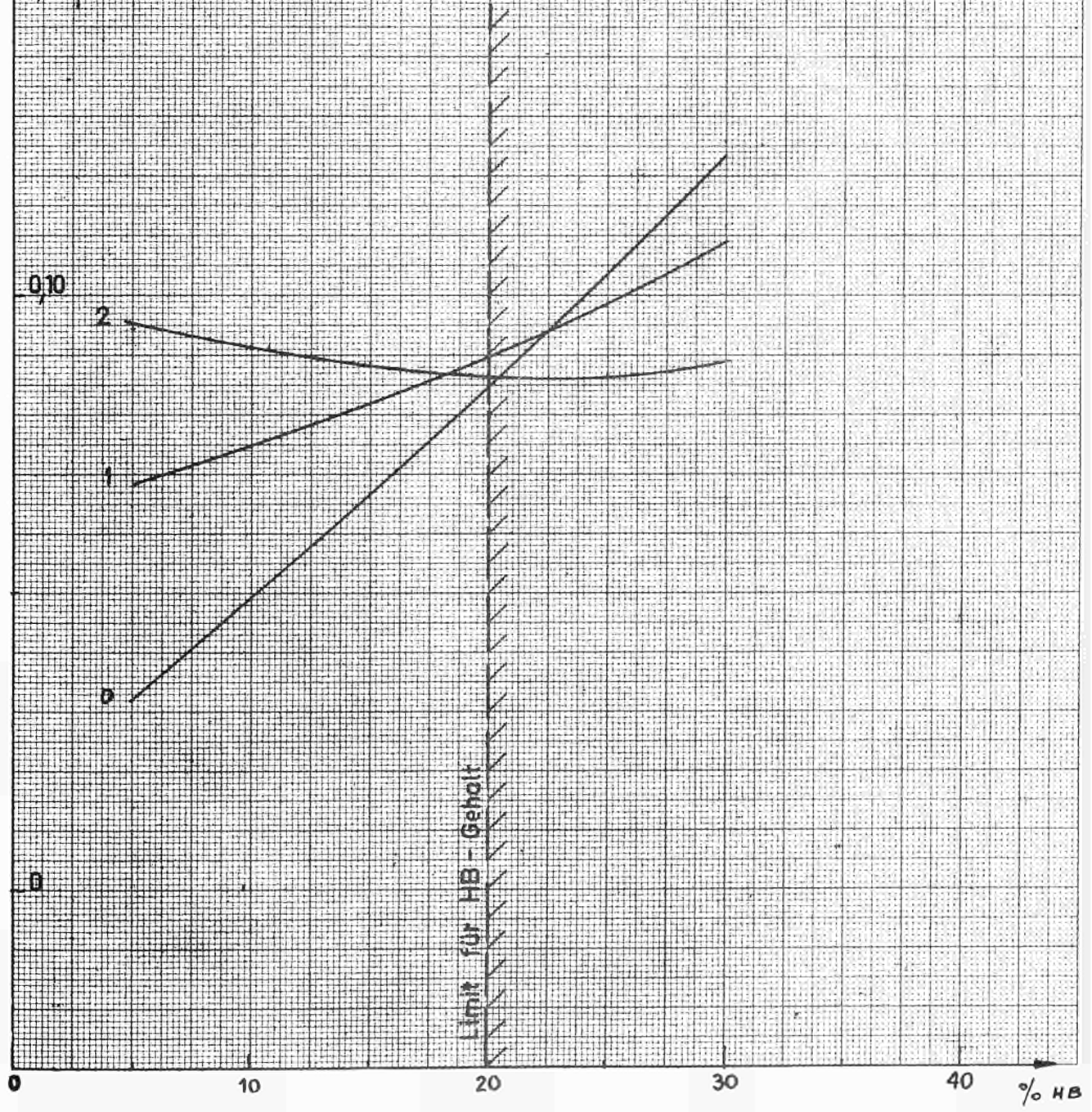


Änderung der Stromerzeugungskosten als
Funktion des HB-Gehaltes im organ. Kühlmittel gemäß
den verschiedenen Hypothesen über G_n .

Fig. 13
 G.D. 1427

$H = 500 \text{ cm}$ $W_{\text{ob}} = 250 \text{ MW}$
 $V_u = 30 \text{ cm}^2$ $t_1 = 400^\circ \text{C}$
 $J_1 = 1,2 \text{ mm}$ $t_{\text{gr}} = 440^\circ \text{C}$
 $\mu = 1,9$ $v = 800 \text{ cm/s}$

$\Delta \omega$
 mills/kwh



CDNA00476DEC