

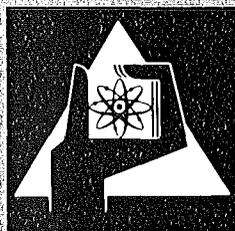
**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Oktober 1977

KFK 2531

**Realisierbarkeit des Gravitationsantriebes im
öffentlichen Nahverkehr zur verlustarmen
Bremsenergie-Rückgewinnung auch ohne
Linearmotor**

V. Jung



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.
KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2531

Institut für Fördertechnik der Universität Karlsruhe

(Direktor: Prof. Dr.-Ing. Erich Bahke)

75 Karlsruhe 1, Kaiserstr. 12

Realisierbarkeit des Gravitationsantriebes
im öffentlichen Nahverkehr
zur verlustarmen Bremsenergie-Rückgewinnung
auch ohne Linearmotor

von

V. Jung

Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe

Kurzfassung

Einer der Vorteile der Cyclobahn (Nahverkehrsbahn mit Gravitationsantrieb auf Zykloiden-Trasse) mit steilem Gefälle liegt in der vertikal sehr flexiblen Trassierung verbunden mit einer hohen Reisegeschwindigkeit (z.B. 32 km/h bei 512 m Stationsabstand). Nachteilig sind große Tunnelweiten (z.B. 38 m) und die Notwendigkeit des Einsatzes frequenzvariabler synchroner bzw. asynchroner Linearmotore. Wird das Maximalgefälle auf 100 ‰ begrenzt, so ist es möglich, auf die Verwendung des Linearmotors zu verzichten und den Antrieb über den Haftwert Rad-Schiene wirken zu lassen. Wenn der Stationsabstand von 512 m auf 662 m verlängert wird, kann trotz des weitaus geringeren Gefälles eine Reisegeschwindigkeit von 32 km/h beibehalten werden. Die maximale Tunnelweite vermindert sich auf 21 m, wobei die Stationen zur Einsparung oberirdischen Verkehrsraumes in offenen Gruben von 2,50 m Bahnsteigtiefe mit einer Länge einschließlich offener Rampen von 120 m liegen. Die maximale Transportleistung beträgt bei 64 m Bahnsteiglänge, 2,20 m breiten Fahrzeugen und 90 s Zugfolgezeit 12 000 Personen/h und Richtung. Bei 2,5 m Breite der Bahnsteige in Seitenlage ergibt sich eine erforderliche Gesamtbreite von nur 10,0 m für die Stationen, die bei Vollbahnen 14 m erfordert.

Eingereicht zum Druck am: 3. 10. 77

Realization of Gravity Drive in Metropolitan Railways for Low Loss Recuperation of Kinetic Energy of Vehicles without Linear Induction Motor

Abstract

One of the advantages of the Cyclo Train gravity drive with a great slope lies in the possibility of a very flexible position of the line in the vertical plane and, additionally, in a high transport velocity (e.g. 32 km/h at 512 m distance between stops). The disadvantage lies in the large tunnel depth and in the necessity of applying the linear induction motor with variable frequency, synchronous and asynchronous, respectively. If the maximum slope is limited to $100^{\circ}/\infty$, it is possible to drop the linear induction motor and make the drive interact by friction between the wheel and the rail. If the distance between stops is increased from 512 m to 662 m, the mean transportation velocity of 32 km/h can be maintained. The maximum tunnel depth is reduced from 38 m to 21 m with stations provided in open hollows of 120 m length, inclusive of the open slopes, and with 2.5 m deep platforms to save space for traffic on the zero level. The maximum transportation rate is 12,000 persons per hour in one direction for platforms of 64 m length, 2.20 m width of the vehicles, and a sequence time of 90 sec. If the platforms, arranged sideways of the tracks, have a width of 2.5 m, a total width of 10.0 m is needed for a station. This value would increase to 14 m for full profile trains.

1. Einleitung

Bei den bisher üblichen U-Bahn-Anlagen liegen Streckennetz und Stationen zu grossen Teilen unterirdisch. Strecken und Stationen liegen im Prinzip - von Ausnahmen abgesehen - in der gleichen Ebene. Weil ein U-Bahnzug auf den kurzen Strecken zwischen den Stationen auf Höchstgeschwindigkeit beschleunigt und anschliessend zum Halten in der Station wieder abgebremst werden muss, hat eine U-Bahn bekanntlich einen relativ hohen Energiebedarf. Dieser ist im Citybereich einer Stadt besonders gross, da hier die Stationsabstände meist sehr klein sind. Beim Bremsen wird die vorher durch Motor-kraft aufgebaute Bewegungsenergie wieder zerstreut (dissipiert), d. h. in den Bremswiderständen der elektrischen Bremse wird die Bewegungsenergie der Fahrzeuge in nutzlose Wärmeenergie irreversibel umgewandelt.

Diese Energiedissipation wird durch die Berg- und Tal-Trassierung bei der Cyclobahn weitgehend vermieden. Die Stationen der Cyclobahn liegen stets auf den Bergen der Bahntrasse und zwar aufgeständert, ebenerdig oder in flache Gruben eingesenkt. Zum Anfahren benötigt diese Version einer U-Bahn die gleiche Motorstärke wie auch andere U-Bahnen. Im Gegensatz zu anderen U-Bahnen werden jedoch - wenn die durch Motorkraft auf den Zug übertragene Bewegungsenergie ausreicht, um die Reibungskräfte entlang der Strecke bis zur nächsten Station zu überwinden - die Motoren in ihrer Antriebskraft soweit reduziert, dass gerade die Reibungskräfte kompensiert werden. Der Zug wird auf dem Gefälle durch die Schwerkraft weiterbeschleunigt, bis er im Tal seine Höchstgeschwindigkeit erreicht hat. Von dort aus wirkt die Schwerkraft bremsend, wobei die Bewegungsenergie des Zuges zum grössten Teil wieder in Lageenergie (potentielle mechanische Energie) verwandelt wird. Mit einem Überschuss an Bewegungsenergie tritt der Zug in die nächste Station ein. Diese Überschussenergie wird im horizontalen Stationsbereich auf einem nur sehr kurzen Bremsweg (ca. 30 m) in Abfallwärme verwandelt. Einem Zug der Cyclobahn braucht nur diejenige Energie zugeführt zu werden, die auf den jeweils kurzen Bremswegen von ca. 30 m Länge 'verbremst' wird, und diejenige Energie, die zur Überwindung aller Reibungskräfte (Luft-, Roll- und Lagerreibung) sowie zur Deckung der Ohmschen ^(und sonstigen)Verluste beim Antrieb entlang der gefahrenen Strecke benötigt wird.

Aus dem Bestreben, eine diskontinuierliche Bewegung aus der Überlagerung zweier kontinuierlicher Bewegungen (Rotation + Translation) zu gewinnen, entstand die Idee der Cyclobahn [1] bis [4]. Neben der direkten Rückgewinnung der kinetischen Energie in Form von potentieller mechanischer Energie war zugleich auch das Ziel erreichbar, die sehr niedrige Reisegeschwindigkeit innerstädtischer Personentransportmittel mit Hilfe des Cyclobahn-Prinzips merklich zu erhöhen.

Die mittlere Reisegeschwindigkeit ~~in erster Linie~~ ^(wäre bei einer steilen Cyclobahn) begrenzt durch die dem Fahrgast zumutbare vertikale Zentrifugalbeschleunigung und ihre zeitliche Änderung. Als Grenze werden die in Aufzügen auftretenden vertikalen Beschleunigungswerte angesehen. So wurde ein Wert von $1,3 \text{ m/s}^2$ als zumutbar betrachtet. Hiermit verbunden war ein maximales Bahngefälle von 30 %. Um auf diesem, nur kurzem Gefälle im Notfalle anhalten zu können, reicht eine etwas größere Verzögerung (z.B. $4,0 \text{ m/s}^2$) als diejenige der bei Straßenbahnen üblichen Magnetschienenbremse aus.

Für das Wiederanfahren auf der Steigung wäre jedoch - wenn man auf einen aufwendigen Zahnradantrieb verzichten will - ein genügend starker Linearmotor in jedem Fahrzeug erforderlich. Die Idee, grundsätzlich passive Fahrzeuge zu verwenden, ist wiederum an das Vorhandensein aktiver Fördereinrichtungen in der Spur gebunden, die entweder nur in den Stationen bzw. für Notfälle auch in den Steigungsstrecken eingerichtet sein müßten. Eine sehr einfache Realisierung eines passiven Fahrzeuges findet sich an jedem Ablaufberg. Für die meisten potentiellen Fahrgäste weitaus bekannter dürfte die Achterbahn auf dem Jahrmarkt sein. Bei einem solchen personenbefördernden System wurde auf die Möglichkeit der Bremsung verzichtet (fliegende Bauten), selbst dann, wenn Höhendifferenzen bis zu 25 m auftreten, die dem Fahrzeug eine Geschwindigkeit bis zu 80 km/h verleihen. Die Bremsung übernehmen hier ausschließlich die vertikale Form der Trasse und die Reibungswiderstände. Dieser Auslauf ohne aktive Bremse am Fahrzeug ist möglich, weil für fliegende Bauten andere Sicherheitsvorschriften gelten als für öffentliche Verkehrsmittel.

Es sollte die grundsätzliche Frage gestellt werden, über welche Strecke ein Fahrzeug frei laufen darf, ohne es von der Trasse oder vom Fahrzeug aus bremsen zu können, und welche Geschwindigkeit es dabei haben darf.

Der Bremsweg eines S-Bahnzuges aus einer Geschwindigkeit von 120 km/h beträgt etwa 600 m. Der Anhalteweg eines gerade in das Gefälle gebrachten passiven Fahrzeuges, das zunächst durch die

Trassenform beschleunigt und sodann beim Bergauffahren wieder gebremst wird, ist bei 600 m Länge des Cycloiden-Bogens etwa nur 30 m länger.

Es kommt

doch nur darauf an, dem Fahrzeug - auf welche Weise auch immer - soviel kinetische Energie vor Eintritt in das Gefälle mitzugeben, daß diese Energie ausreicht, sämtliche auftretenden Reibungskräfte - auch im ungünstigsten Falle, z.B. bei Gegenwind durch ein entgegenkommendes Fahrzeug - entlang der Strecke bis zur nächsten Station zu überwinden, so daß damit ein Zurückrollen des Fahrzeuges in die Talmulde ausgeschlossen wird.

Ob nun eine Bremsenrichtung in der Station, in welcher die überschüssige Restenergie des Fahrzeuges weggebremst werden soll, passiv arbeitet oder aktiv vom Fahrzeug aus, ist grundsätzlich unerheblich. Auch von Fahrgästen könnte eine Bremsenrichtung in der Spur über eine Fernwirkanlage in Notfällen in Funktion gesetzt werden.

Wenn das Bremsproblem durch Magnetschienen- oder Schraubstockbremsen gelöst ist, besteht das wesentliche Problem darin, wie ein versehentlich auf zu geringe Anfangsenergie beschleunigtes Fahrzeug daran gehindert werden kann, auf das Gefälle zu geraten, und wie es - wenn dies doch geschehen ist - dann zurückgeholt wird. Günstig erscheint es deswegen, auf ein passives Fahrzeug zu verzichten, das aktive Fahrzeug aber zu behandeln wie ein passives. Das bedeutet: der horizontale Beschleunigungsweg muß so lang sein - etwa ein Zwanzigstel des Stationsabstandes - , daß bei einer Beschleunigung von etwa $1,2 \text{ m/s}^2$ entlang des Beschleunigungsweges die kinetische Energie des Fahrzeuges in jedem Falle ausreicht, um die Reibungskräfte entlang der Strecke bis zur nächsten Station zu überwinden. Diejenige Energie, die dem Fahrzeug durch Erdbeschleunigung zugeführt wird, ist "Leihenergie", die in der nächsten Station gleicher Höhenlage in Form von Lageenergie wieder voll zur Verfügung steht.

Stellt man am Ende des horizontalen Beschleunigungsweges fest, daß die Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu niedrig ist, so kann auf einem kaum längeren Wege eine Bremsung ermöglicht werden, und das Fahrzeug käme bei entsprechender Trassenform an einer Stelle zum stehen, wo noch nicht die maximale Hangabtriebskraft wirksam ist. In diesem Falle muss die eigene Motorkraft völlig ausreichen, um das Fahrzeug in die Startposition zurückzubringen. Dabei wird vermieden, daß ein Fahrzeug mit zu geringer Anfangsenergie in die Talmulde gerät, aus der es dann nur mit einem größeren Zeitaufwand zurückgeholt werden kann.

2. Gründe für eine Cyclobahn mit Ausnutzung des Haftwertes Rad-Schiene

Wenn eine Zykloiden-Trassierung schon kurz nach der horizontalen Vorbeschleunigungsstrecke ihre steilste Steigung erreicht, müßte die horizontale Beschleunigungsstrecke so bemessen sein, daß auf ihr sowohl auf Sollgeschwindigkeit beschleunigt als auch gebremst werden kann. Die Horizontalstrecke würde also unnötig lang werden und würde damit knappen oberirdischen Platz kosten (Beispiel: 75 m Stationslänge bei 500 m Stationsabstand). Der Platzbedarf für eine Station erhöht sich jedoch nicht wesentlich, wenn die Bahnsteige der Station ^(etwa) 2,50 m unter Straßenniveau ^(oder auch mehr) in flache Gruben gelegt werden und aus verschiedenen unten aufgeführten Gründen das maximale Bahngefälle auf 100 % ermäßigt wird.

Für das geringere Gefälle sprechen:

- 1) Entfall des Linearmotorantriebes mit geringerem Wirkungsgrad
- 2) Verwendbarkeit bereits vorhandener Fahrzeuge für einen minimalen zulässigen vertikalen Ausrundungsradius von 250 m (z.B. Stadtbahnwagen M)
- 3) Ermäßigung der Tunneltiefe von z.B. 38 m auf 21 m
- 4) Leichtere ^gBedienungsmöglichkeit defekter Fahrzeuge, die durch Geschwindigkeitsüberwachung am Ende der Vorbeschleunigungsstrecke wegen zu niedriger Geschwindigkeit hätten gebremst werden sollen, aber wegen eines weiteren Defektes nicht zwangsgebremst wurden und in die Talmulde gerieten.
- 5) Möglichkeit der Bergung von nach Punkt 4 in die Talmulde geratener defekter Züge mit Hilfe gummibereifter Einsatzfahrzeuge, die auf Betonplatten neben den Schienen fahren können. Der Haftwert Gummireifen-Betonfahrbahn \circ reicht bei 100 % Steigung aus, um defekte Züge sicher abschleppen zu können.
- 6) Entfall der Notwendigkeit des Einbaus einer Zahnstange gegenüber starkem Gefälle zur sicheren Bergung defekter Fahrzeuge
- 7) Erhöhung des Fahrkomforts durch Verminderung der vertikalen Zentrifugalbeschleunigung von $b_v = 1,3 \text{ m/s}^2$ auf $b_v = 0,2 \text{ m/s}^2$ in Zugmitte
- 8) Durch Verlängerung des Stationsabstandes von 512 m auf 662 m kann die Reisegeschwindigkeit von 32 km/h beibehalten werden. Der bei 4,5 km/h Fußgängergeschwindigkeit hierdurch erlittene mittlere Zeitverlust für Zugang und Abgang zusammen beträgt nur 1 Minute und dürfte zumutbar sein.

Die maximale Neigung von 100 ‰ hat den Vorteil, daß bei einem ausgenutzten Haftwert von $\mu = 0,20$ ein defektes Fahrzeug von einem gleichartigen allachsgetriebenen intakten Fahrzeug abgeschleppt werden kann. Bei moderner Antriebstechnik [5, 6] wird z.B. bei den Neubaustrecken der DB aus wirtschaftlichen Gründen von diesem Haftwert $\mu = 0,20$ ausgegangen [7, 8]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Freien liegende Strecken in stärkerem Masse der Witterung ausgesetzt sind als nur an den Stationen offene Cyclobahnstrecken. Auch bei den nicht im Tunnel geführten Strecken der Stuttgarter Strassenbahn wird von dem Haftwert $\mu = 0,20$ ausgegangen, wenn ein Fahrzeug, dessen Gewicht zu 70 ‰ auf angetriebenen Achsen ruht, bei 70 ‰ Gefälle ein gleichartiges liegengebliebenes Fahrzeug abschleppen können muss.

Wiederum ist zu überlegen, ob man nicht an einigen Stationen Einfahrmöglichkeiten für ein gummibereiftes Bergungsfahrzeug vorsehen soll, das defekte Fahrzeuge über Weichen auf die Straße ziehen kann, um diese von dort über Straßenroller ohne Behinderung des Taktfahrplanes zur Werkstätte bringen zu können. In diesen Fällen wäre ein drittes Gleis zwischen den Bahnsteiggleisen erforderlich, wodurch die Mindestbreite einer Station bei 2,20 m breiten Fahrzeugen von 10 m auf 13 m ansteigen würde.

3. Berechnung der Reisegeschwindigkeit aus der vertikalen Trassenform

Um ein Fahrzeug aus einer oberirdischen Station auf ein genügend steiles Gefälle zu führen, auf dem die Schwerkraft den größten Teil der Beschleunigungsarbeit durchführen kann, muß ein entsprechend langer, platzraubender, vertikaler Bogen von der Horizontalstrecke der Station auf die Gefällestrecke überleiten. Ebenfalls in der Talmulde sind vertikale Bögen einzusetzen. Der Krümmungsradius dieser Bögen ist, um Platz zu sparen, so zu bemessen, daß aus der unterschiedlichen Geschwindigkeit in den Kuppen bzw. Talern ^(bei Berücksichtigung der Zuglänge etwa ver-) gleichbare Beiträge der vertikalen Zentrifugalbeschleunigung resultieren. Aber nicht nur der Betrag der vertikalen Zentrifugalbeschleunigung ist aus Komfort- und ^(Sicherheitsgründen) begrenzt - und damit auch der vertikale Bogenra-

dius bestimmt -, sondern auch die zeitliche Änderung der Vertikalbeschleunigung (der „Vertikalruck“). Als Komfortgrenze gilt ein Wert von $0,5 \text{ m/s}^3$. Läßt man als maximale vertikale Zentrifugalbeschleunigung einen Wert von $1,3 \text{ m/s}^2$ zu, so kann der niedrige „Ruckwert“ von $0,5 \text{ m/s}^3$ auf der Strecke zwischen den Stationen nur durch die harmonische Kurve einer vertikal gestauchten Zykloide erreicht werden, deren ~~schwache vertikale Krümmungen~~ ^{schwache vertikale Krümmungen} im Tal und deren ~~starke vertikale Krümmungen~~ ^{starke vertikale Krümmungen} auf den Kuppen liegen. In den Kuppen ist eine Horizontalstrecke für die Stationen mit anschließenden kurzen Übergangsbögen einzusetzen. In diesen kurzen Übergangsbögen muß die volle vertikale Zentrifugalbeschleunigung in 0,8 Sekunden erreicht werden, um bei den Fahrgästen keine Seekrankheit zu erzeugen. Der maximale zeitliche Anstieg der Vertikalbeschleunigung auf $1,3 \text{ m/s}^2$ beträgt hier allerdings $2,5 \text{ m/s}^3$. Die Übergangsbögen sind bei einer Anfangsgeschwindigkeit von 31; 38 und 44 km/h 7; 8,5 bzw. 10 m lang und verändern die Höhenlage des Gleises nur um unbedeutende Beträge. Bei 100 ‰ Maximalgefälle und $0,2 \text{ m/s}^2$ maximaler Vertikalbeschleunigung ^(in Zugmitte) beträgt die maximale zeitliche Änderung der Vertikalbeschleunigung im kurzen Übergangsbögen ^(in Zugmitte) nur $0,4 \text{ m/s}^3$. Auf dem folgenden Zykloidenbogen wird die Veränderung der Vertikalbeschleunigung dann nicht mehr wahrgenommen, was den Fahrkomfort entscheidend hebt.

Die Zykloide leitet sich aus der harmonischen Bewegung eines Punktes auf einer abrollenden Radscheibe ab. Wenn die Radscheibe an einer Ebene hängend abrollt, weisen die erzeugten Kuppen starke und die erzeugten Täler schwache Krümmungen auf. In der folgenden Parametergleichung der vertikal gestauchten Zykloide ist φ der Drehwinkel der abrollenden Radscheibe, a der Divisor für den Radius $L/2\pi$, der angibt, welchen Abstand der betrachtete Punkt von der Achse der Radscheibe hat, c ist der Parameter, durch den die Vertikalausdehnung der Zykloide dividiert wird und L ist die projizierte Länge des Zykloidenbogens.

$$x = \frac{L}{2\pi} \left(\varphi + \frac{\sin \varphi}{a} \right) \qquad y = \frac{L}{2\pi} \cdot \frac{1 - \cos \varphi}{a c} \qquad (1)$$

Für die Anfangsgeschwindigkeit v_0 (auf der Kuppe der Zykloide) und die Maximalgeschwindigkeit v_{\max} ergaben sich nach [3] die Beziehungen

$$v_0 = \left(1 - \frac{1}{a}\right) \sqrt{\frac{g^* L}{2 \pi c}} \quad \text{und} \quad (2)$$

$$v_{\max} = \left(1 + \frac{1}{a}\right) \sqrt{\frac{g^* L}{2 \pi c}}, \quad (3)$$

wobei g^* die reduzierte Erdbeschleunigung bei Berücksichtigung rotierender Massen ist.

Um auf der Horizontalstrecke (in der Station) durch die Motorbeschleunigung auf die Anfangsgeschwindigkeit v_0 zu kommen, muß entlang des Weges s_0 mit b_0 beschleunigt und beim Anhalten auf dem Weg s_0 mit b_0 verzögert werden. Die Länge der Horizontalstrecke ist dann $2s_0$ und der Haltestellenabstand $2s_0 + L$. Die Beschleunigungs- plus Bremszeit ist $2v_0/b_0$. Die Zeit, die benötigt wird, um bei durch Motorkraft kompensierten Reibungskräften im Gravitationsantrieb den Zykloidenbogen zu durchfahren ist

$$T_c = f_c \cdot T = f_c \cdot \sqrt{\frac{2 \pi c L}{g^*}} \quad . \quad ^+) \quad (4)$$

Der Korrekturfaktor f_c wurde deswegen angebracht, weil die Bogenlänge der Zykloide bei der vertikalen Stauchung verkürzt wird. In [3] wurde diese Verkürzung vernachlässigt, da nur Zykloiden gleicher Gestalt (Parameter a und c fest) für die Berechnung der Reisegeschwindigkeit verglichen wurden. Vergleicht man jedoch Zykloiden verschiedener Gestalt hinsichtlich der resultierenden Reisegeschwindigkeit, so muß dieser Korrekturfaktor, der von den Parametern a und c abhängt, berücksichtigt werden. Weiterhin sind in g^* , der reduzierten Erdbeschleunigung, die rotierenden Massen berücksichtigt.

Der Korrekturfaktor f_c kann folgendermaßen hergeleitet werden:

Wenn α_0 der Steigungswinkel der ungestauchten Zykloide ist, möge α_c der Steigungswinkel der gestauchten Zykloide sein. Es gilt:

$$\sin \alpha_c = \sin \arctan \frac{\tan \alpha_0}{c} \quad (5)$$

und
$$b_h = - g^* \sin \alpha_c, \quad (6)$$

⁺ Die Zuglänge sei klein gegen L . Zur Berücksichtigung des Einflusses der Zuglänge auf den Bewegungsablauf ist die Bahn des Schwerpunktes des Zuges zu berechnen und anschließend die Bewegungsgleichung zu ermitteln. Dies dürfte nicht mehr analytisch sondern nur noch numerisch möglich sein.

wobei b_h die Beschleunigung parallel zu Bahn ist, also die Hangabtriebsbeschleunigung.

Für $\frac{\tan \alpha_0}{c}$ wird $\frac{\alpha_0}{c} + \frac{\alpha_0^3}{3c}$ approximiert und

für $\arctan \frac{\tan \alpha_0}{c} = \frac{\alpha_0}{c} \left(1 + \frac{\alpha_0^2}{3} - \frac{\alpha_0^2}{3c^2} \right)$, somit folgt für

$$\sin \arctan \frac{\tan \alpha_0}{c} = \frac{\alpha_0}{c} \left(1 + \frac{\alpha_0^2}{3} - \frac{\alpha_0^2}{2c^2} \right), \quad (7)$$

indem nur Glieder bis zur 3. Ordnung berücksichtigt werden.

Für α_0 , den Steigungswinkel der ungestauchten Zykloide gilt

im Wendepunkt $\alpha_0 = \psi - \frac{\pi}{2}$. (8)

Für die Wendepunktcoordinate ψ wurde in [3] die Beziehung

$$\cos \psi = - 1/a \quad \text{gefunden,} \quad (9)$$

daraus folgt $\sin \alpha_0 = + 1/a$. (10)

Setzt man die Beziehung (10) in die Glg.(7) ein und berücksichtigt wieder nur Glieder bis zur 3. Ordnung, so folgt zusammen mit der Beziehung (6):

$$b_{hmax} = - g^* \frac{1}{ac} \left(1 + \frac{1}{2a^2} - \frac{1}{2a^2c^2} \right) \quad (11)$$

b_{hmax} ist die maximale Bahnbeschleunigung, die um den Korrekturfaktor $\left(1 + \frac{1}{2a^2} - \frac{1}{2a^2c^2} \right)$ größer ist als der durch c dividierte Wert für die ungestauchte Zykloide. Aus (7) ist ersichtlich, daß der oben genannte, um 1 verminderte Korrekturfaktor mit α_0^2 wächst. Da der zeitliche Verlauf der Bahnbeschleunigung b_h (Glg. 6) nach [3] sinusähnlich und zu $\sin \alpha_c$ proportional ist, wäre der zeitliche Verlauf des um 1 verminderten Korrekturfaktors in (7) sinusquadratähnlich. Das bedeutet, daß der um 1 verminderte zeitliche Mittelwert des Korrekturfaktors halb so groß ist wie der Maximalwert des um 1 verminderten Korrekturfaktors (Glg. 11).

Da die Maximalgeschwindigkeit, das zeitliche Integral über b_h plus Konstante v_0 , aber nach (3) exakt gilt, kann, wenn die mittlere Beschleunigung erhöht ist, nur die Zeit T im gleichen Maße verkürzt sein. Für den Korrekturfaktor f_c der Schwingzeit T gilt daher:

$$f_c = 1 - \frac{1}{4a^2} + \frac{1}{4a^2c^2} \quad (12)$$

Die Reisegeschwindigkeit v_r ist mit Berücksichtigung der Haltezeit t_h

$$v_r = \frac{2s_0 + L}{2 \frac{v_0}{b_0} + f_c T + t_h} \quad (13)$$

Nach Einsetzen der Ausdrücke (2) und (4) folgt mit $2s_0 = v_0^2/b_0$

$$v_r = \frac{\frac{(1 - \frac{1}{a})^2 g^* L}{b_0 2\pi c} + L}{t_h + \frac{2(1 - \frac{1}{a}) \sqrt{\frac{g^* L}{2\pi c}}}{b_0} + f_c \cdot \sqrt{\frac{2\pi c L}{g^*}}} \quad (14)$$

Nunmehr liegt ein Ausdruck für die Reisegeschwindigkeit v_r vor, der nur von den Größen a , c , L , b_0 und t_h abhängt. g^* könnte auch variiert werden, soll zunächst aber mit $g^* = 9,5 \text{ m/s}^2$ als fest angenommen werden.

Aus Glg. 14 ist ersichtlich, daß die Reisegeschwindigkeit mit \sqrt{L} anwächst, wenn die Haltezeit t_h gegen 0 geht.

Setzt man in die Glg. 14 die Werte-Tripel

1) $a = 2,5$ $c = 4,35$ und $L = 600 \text{ m}$

2) $a = 1,89$ $c = 2,0$ und $L = 450 \text{ m}$

und in beiden Fällen $b_0 = 1,2 \text{ m/s}^2$ $g^* = 9,5 \text{ m/s}^2$ und $t_h = 20 \text{ s}$

ein, so resultiert in beiden Fällen bei gleicher Anfangsgeschwindigkeit v_0 die gleiche Reisegeschwindigkeit $v_r = 8,9 \text{ m/s}$ entsprechend $32,0 \text{ km/h}$. Hiermit ist ersichtlich, daß eine Ermäßigung des Maximalgefälles von 30 % im Falle 2 auf 10 % im Falle 1 nur eine Verlängerung des Haltestellenabstandes von 150 m mit sich bringt. Die mittlere Verlängerung für den Zu- bzw. Abgang beträgt ein Viertel dieses Wertes, also 37,5 m. Bei einer Fußgängergeschwindigkeit von 4,5 km/h tritt für einen mittleren Zugang und einen mittleren Abgang von und zur Station ein Gesamtzeitverlust von 1 Minute auf. Dieser Zeitverlust erscheint zumutbar im Vergleich zu den Anstrengungen, die unternommen werden müßten, um eine steile Cyclobahn funktionssicher zu entwickeln.

Wiederum ist es auch möglich, die Halteabstände bei 512 m zu belassen. Die Reisegeschwindigkeit verringert sich dann von 32,0 km/h auf 27,2 km/h. Für eine Reiseweite von 3 km bedeutet dies eine Verlängerung der Reisezeit von ebenfalls 1 Minute. Es muss aber betont werden, dass sich der Bau einer Linie verteuert, je mehr Stationen zu bauen sind.

Anhand der Glg. 14 wurden die drei Einflußgrößen, Länge des projizierten Zykloidenbogen L, Anfangsbeschleunigung bzw. Bremsung b_0 und Haltezeit t_h in den Werten 600 m, 900 m und 1200 m, $0,8 \text{ m/s}^2$, $1,2 \text{ m/s}^2$ und $1,6 \text{ m/s}^2$ sowie 20 s, 30 s und 40 s durchvariiert. Die Ergebnisse dieser Rechnung sind in Tabelle 1 aufgelistet, in der auch die minimal möglichen Zugfolgezeiten zu finden sind, die zusammen mit dem Fassungsvermögen der Fahrzeuge die maximale Förderleistung der Strecke bestimmen. ^(Für die Raumzeit der Station wurde $\sqrt{2} \cdot v_0 / b_0$ angesetzt.) Es ist zu beachten, daß mit wachsender Fahrzeugbelegung die Haltezeiten ansteigen müssen und auf diese Weise die minimal mögliche Zugfolgezeit wächst. Die Förderleistung steigt daher nicht linear proportional zur Belegung der Züge. Außerdem sinkt z.B. die Reisegeschwindigkeit bei 662 m Stationsabstand von 32,0 km/h bei 20 s Haltezeit ^(für 4 Personen/m²) auf 25,3 km/h bei 40 s Haltezeit, die bei 8 Personen/m² Stehfläche erforderlich wäre. Die Förderleistung steigt anstelle von 66 % um nur 37 %. Eine hohe Anfahrbeschleunigung bzw. Verzögerung von $1,6 \text{ m/s}^2$ ist kaum lohnend, ein Wert von $0,8 \text{ m/s}^2$ hingegen vermindert die Reisegeschwindigkeit in stärkerem Maße als sie ein Wert von $1,6 \text{ m/s}^2$ erhöht. Der Wert von $1,2 \text{ m/s}^2$ erscheint als sinnvolle Lösung, der zu einer erträglichen Länge der Horizontalstrecken an den Stationen führt, womit oberirdischer Platz gespart werden kann. Gegebenenfalls könnte bei geringeren Beschleunigungswerten bzw. bei größeren Haltestellenabständen von der Forderung abgegangen werden, daß die Zugmitte am Ende der Horizontalstrecke diejenige Bewegungsenergie aufgenommen haben muß, die ausreicht - z.B. bei Stromausfall ^(um) die Reibungskräfte entlang der Strecke bis zur nächsten Station zu überwinden. Dann könnten die Horizontalstrecken auf das für die Zuglänge erforderliche Maß verkürzt werden, und es könnte auf dem Gefälle durch Motorkraft zusätzlich beschleunigt werden, bis die Sollgeschwindigkeit erreicht ist.

Für die Cycloiden-Trassierung ergibt sich mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 und der Maximalgeschwindigkeit v_{max} eine Energierückgewinnungsrate η für die Umwandlung maximaler ^{kinetischer} zu potentieller Energie ein Wert von

$$\eta = \frac{v_{\text{max}}^2 - v_0^2}{v_{\text{max}}^2} = 1 - \frac{(1 - \frac{1}{a})^2}{(1 + \frac{1}{a})^2} \quad (15)$$

(s. Gln. 2 und 3).

Wenn bei einem über den Weg gemittelten, durch Reibungskräfte erzeugten Verzögerungswert von $b_w = 0,071 \text{ m/s}^2$ der Anteil der kinetischen Energie am gesamten Energieaufwand für ein zeitgleiches Fahrspiel mit gleicher Höchstgeschwindigkeit auf der Horizontalen 82 % beträgt und

Tabelle 1 Übersicht über die Einflüsse der Länge des Zykloidenbogens L, der Anfangsbeschleunigung b_0 und der Haltezeit t_h auf die Reisegeschwindigkeit v und die minimal mögliche Zugfolgezeit bei $a = 2,5$ und $c = 4,35$ Maximalgefälle 100 ‰, maximale Vertikalbeschleunigung $0,2 \text{ m/s}^2$ in Zugmitte

Projizierte Länge des Zykloidenbogens L	600 m			900 m			1200 m		
Höhendifferenz Δh	17,6 m			26,4 m			35,2 m		
Anfangsgeschwindigkeit v_0	31,2 km/h			38,2 km/h			44,1 km/h		
Maximalgeschwindigkeit v_{\max}	72,7 km/h			89,0 km/h			102,8 km/h		
Anfangsbeschleunigung bzw. Bremsung b_0	0,8 m/s^2	1,2 m/s^2	1,6 m/s^2	0,8 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	1,2 m/s^2	1,6 m/s^2	0,8 m/s^2	1,2 m/s^2	1,6 m/s^2
Horizontalstrecke $v_0^2/b_0 = 2s_0$ in m	93,6	62,4	46,8	140,4	93,6	70,2	187,2	124,8	93,6
Stationsabstand $2s_0 + L$ in m	693	662	647	1040	994	970	1387	1325	1294
Schwingzeit $f_c T$ plus Anfahr- plus Bremszeit $2v_0/b_0$ plus Haltezeit t_h in Sekunden									
Haltezeit $t_h = 20 \text{ s}$	81,6	74,4	70,8	95,5	86,7	82,3	107,0	96,8	91,8
Reisegeschwindigkeit $v_r = (2s_0 + L)/(f_c T + t_h + 2v_0/b_0)$ in km/h in Abh. v. d. Haltezeit									
Haltezeit $t_h = 20 \text{ s}$	30,5	32,0	33,0	39,2	41,2	42,4	46,6	49,2	50,8
$= 30 \text{ s}$	27,3	28,2	28,9	35,5	37,0	37,8	42,7	44,7	45,8
$= 40 \text{ s}$	24,6	25,3	25,7	32,4	33,5	34,1	39,3	40,8	41,7
Minimale Zugfolgezeit $f_c T + t_h + 3,4v_0/b_0$ bei $t_h = 20 \text{ s}$ in s	98,1	84,4	78,3	114,1	99,0	91,7	128,4	111,0	101,9

sich bei dem Parameter $a = 2,5$ eine Rückgewinnungsrate η von 82 % ergibt, so resultiert eine Gesamtenergieeinsparung gegenüber dem gleichen Fahrspiel in der Horizontalen von 67 %. Gegenüber einem zeitgleichen trapezförmigen Fahrspiel mit 66 km/h Höchstgeschwindigkeit in der Ebene beträgt die Energieeinsparung nur 62 %. Für ein zeitgleiches Fahrspiel bei nur 50 % Maximalgefälle resultiert eine Energieeinsparung von 40 % (s. Tabelle 2).

4. Raum für Stationen

Der für die Stationen ^(kleinste) oberirdisch benötigte Raum beträgt - bei einer steilen Cyclobahn mit 30 % Gefälle bei einer Haltestellenlänge von 50 m und zwei je 25 m langen offenen Rampen für 3,85 m Profilhöhe und 0,3 m Überdeckung - 100 m in der Länge und 10 m in der Breite. Geht man von einer Bahnsteiglänge von 62 m und einer Profilhöhe von 4,9 m aus, so benötigt man bei gleichem Maximalgefälle für eine ebenerdige Station einen Freiraum von 120 m Länge (s. Abb. 1), wobei der Zug bei den in Abb. 1 angegebenen Daten zur Begrenzung der vertikalen Zentrifugalbeschleunigung am Zugende nicht länger als die halbe Bahnsteiglänge sein sollte. Unterschiede in der Longitudinalbeschleunigung^{entlang} des Zuges sind weniger schwerwiegend, sollten aber auch in Grenzen gehalten werden. Will man die maximale Zuglänge der Stationslänge anpassen - was sinnvoll wäre - , so müssen die vertikalen Ausrundungsradien am Stationsanfang bzw. Ende von $R_1 = 60$ m auf $R_1 = 120$ m vergrößert werden.^{+) Das führt zu einem anderen Parametersatz für die Zykloide, wenn die projizierte Bogenlänge L mit 450 m konstant bleiben soll. Die Daten ändern sich von $a = 1,89$ $c = 2,0$ und 298 % Maximalgefälle im ersten Falle auf $a = 2,60$ $c = 1,7$ und 238 % Maximalgefälle. Bei 62 m Stationslänge beträgt der ebenerdig benötigte Freiraum nunmehr 140 m in der Länge. Für gleiche Zuglänge wird diese Längenerstreckung des benötigten Freiraumes nicht überschritten, wenn das Maximalgefälle auf 100 ‰ ermässigt wird, dafür aber die Stationen in offene Gruben gelegt werden mit Schienenoberkannte 3,4 m unter Strassenniveau. Diese Anordnung ist in zehnfach überhöhtem Massstab in Abb. 2 gezeigt. Die erforderliche Breite hängt vom Fahrzeugprofil ab. Als Werte können angenommen werden:}

Gleisachsabstand	Wagenbreite	Stationsbreite	Bahnsteigbreite
2,65 m	2,20 m	10,0 m	2,50 m
3,20 m	2,65 m	13,0 m (12,0 m)	3,50 m (3,0 m)
3,95 m	2,90 m	14,0 m	3,50 m

Wie nachstehend aufgeführt, würde ein Stationsraum von 140 m in der Länge ^{einschliesslich} offener Rampen bei 4,9 m Profilhöhe ^{und} 10,0 m Breite für eine Förderleistung von 12 000 Personen pro Stunde und Richtung bei 662 m Stationsabstand und 32,0 km/h Reisegeschwindigkeit gerade noch ausreichen.

+) Nach [3] gilt $R_1 = \frac{Lac}{2\pi} \left(1 - \frac{1}{a}\right)^2$

Geht man von einer Kleinprofil-U-Bahn aus [9], deren nur 2,20 m breite Fahrzeuge eine Stationsbreite von nur 10,0 m ermöglichen würden, so kommt man bei der oben genannten Bahnsteiglänge von 62 m und einer Zugfolgezeit von 90 s bei Auslastung aller Sitz- und Stehplätze auf eine Transportleistung von 10560 Personen pro Stunde und Richtung bei 10 m Stationsbreite. Legt man das Fassungsvermögen von 4 Berliner Großprofil-U-Bahnwagen mit einer Länge von 63,4 m zugrunde, so erhält man - bei ebenfalls 40 Zügen/h - eine maximale Transportleistung von 18880 Personen/h. Bei gleicher Längenerstreckung würde für die Stationen eine Breite der offenen Gruben von 12,8 m erforderlich werden. Die vergleichbare Förderleistung der Nürnberger U-Bahn beträgt 24 000 Personen/h und Richtung. Bei 3 gekuppelten 2,20 m breiten und zusammen 61,3 m langen Stadtbahnwagen M6 erreicht man bei 4 Personen/m² für die Stehfläche eine Transportleistung von 12000 Personen/h, wenn die Zugfolgezeit 90 s beträgt. Bei dieser Zugfolgezeit und 662 m Stationsabstand beträgt die Summe aus Fahrzeit und Haltezeit 75 s, so daß einschließlich Räumzeit der Station von 10 s noch 5 s Spielraum verbleiben, bis ein Zug auf einer nachfolgenden Station starten kann. Auf diese Weise ist die Bedingung erfüllt, dass sich beim Gravitationsantrieb nie zwei Züge im gleichen Stationsintervall befinden dürfen. Die minimal mögliche Zugfolgezeit einer Cyclobahnlinie (Tabelle 1) muss sich hierbei nach dem vorkommenden maximalen Stationsabstand und der maximalen auftretenden Fahrgastwechselzeit richten, wenn ein Bremsen in der Talmulde zur Energieeinsparung vermieden werden soll. Dabei ist jedoch meistens die maximale Fahrgastwechselzeit dort zu finden, wo die Stationsabstände am geringsten sind. So wäre z. B. bei 500 m Stationsabstand eine Haltezeit von $t_h = 30$ s möglich, ohne dass der 90 s-Takt aufgegeben werden muss. Die maximale Förderleistung ist also im Wesentlichen durch den grössten Stationsabstand und durch die kleinste Bahnsteiglänge einer Linie bestimmt. Ein für die Cyclobahn geeignetes Signal- und Sicherheitssystem wäre noch zu untersuchen.

6. Schlußbetrachtung

Die in Abb. 2 vorgeschlagene Cyclobahn-Trassierung mit einem Maximalgefälle von 10 % stellt einen Kompromißvorschlag für die Verwirklichung der Cyclobahn-Idee dar, der mit bereits vorhandener Technik schon heute verwirklicht werden könnte. Kostentreibende Komponenten wie Zahnstange, Schraubstockbremse, Linearmotor, Gummireifenantrieb sind bewußt aus diesem Vorschlag herausgehalten worden. Der Nachteil der geringeren vertikalen Flexibilität in der Trassierung muß dabei allerdings in Kauf genommen werden, auch ein etwas vergrößerter Platzbedarf für die Stationen. Positiv dürfte jedoch sicher die Verringerung der vertikalen Zentrifugalbeschleunigung von $1,26 \text{ m/s}^2$ auf $0,2 \text{ m/s}^2$ und die Verringerung der Tunneltiefe von 38 m auf 21 m zu bewerten sein. Die Rückgewinnung der kinetischen Energie der Fahrzeuge beträgt immerhin

Zusammenstellung der Daten für Stationen in verschiedener Höhenlage mit unterschiedlicher Bahnsteiglänge und Breite bei verschiedenem Bahngefälle und resultierender Energieeinsparung

Fall Nr.	Bahnsteiglänge	SO Station unter Straße	Höhen-Differenz Δh	maximale Neigung der Trasse	Talmulde SO unter Straße	Entfernung der Stationszugänge bzw. Grubenlänge	Stations- bzw. Grubenbreite	Zugänge	Energieeinsparung (s. Glg. 15)	Maximale Transportleistung pro h und Richtung ⁺)
I	120 m	10,0 m	11,0 m	50 ‰	21,0 m	214 m	14,0 m	8 Rolltreppen	40 ‰	36 000 Pers./h
II	120 m	5,0 m	11,0 m	50 ‰	16,0 m	143 m	14,0 m	4 Rolltreppen	40 ‰	36 000 Pers./h
III	120 m	5,0 m	11,0 m	50 ‰	16,0 m	220 m	14,0 m 10,0 m	4 Rampen 50 m lang	40 ‰	36 000 Pers./h 24 000 Pers./h
VI	64 m	3,2 m	17,6 m	100 ‰	20,8 m	120 m	14,0 m 10,0 m	4 Rampen 28 m lang	62 ‰	18 000 Pers./h 12 000 Pers./h
V	64 m	0,9 m	17,6 m	100 ‰	18,5 m	180 m	14,0 m 10,0 m	ebenerdige Zugänge	62 ‰	18 000 Pers./h 12 000 Pers./h
VI	64 m	-6,0 m	12,5 m	75 ‰	6,5 m	256 m	14,0 m 10,0 m	4 Rampen 96 m lang	55 ‰	18 000 Pers./h 12 000 Pers./h

+), 90 s Takt, 4 Pers./m² Stehfläche, bei 664 m Stationsabstand

noch 82 0/0. Auf der Basis dieses entschärften Vorschlages oder nachfolgend aufgeführter Alternativen sollte für eine Modellstadt eine Nutzwertanalyse durchgeführt werden. Dabei können zur Kostenkalkulation die in Abb. 3 gezeigten Alternativen, I. Station mit Fussgängerquertunnel, II. Station in einfacher Tieflage, III. Station in offener Grube, IV. Station in flacher Grube, V. ebenerdige Station und VI. aufgeständerte Station zugrundegelegt werden. Die Daten dieser 6 Alternativen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Umfangreiche Kosten- und Ersparnisanalysen sollten folgen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Bahke danke ich sehr herzlich für das rege Interesse an dieser Arbeit und für weitere fruchtbare Diskussionen und Unterstützung der Cyclobahn-Idee und Herrn Dr.-Ing. G. Bernstein für die kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Literaturverzeichnis:

- [1] Energieeinsparung bei Transportvorgängen durch Gravitationsantrieb. Verkehr und Technik 28 (1975) Nr. 9, S. 342.
- [2] Jung, V.: Möglichkeiten der Energierückgewinnung im öffentlichen Nahverkehr durch Gravitationsantrieb, KFK 1793, Kernforschungszentrum Karlsruhe Dezember 1975.
- [3] Jung, V.: Die Cyclobahn Gravitationsantrieb im Nahverkehr - Vorteile und Probleme. ZEV Glasers Annalen 100 (1976) Nr. 6, S. 192 - 200.
- [4] Jung, V.: Cyclobahn - mit Schwung durch den Untergrund. Bild der Wissenschaft 13 (1976) Nr. 6, S. 90 - 95.
- [5] Körber, J.: Grundlegende Gesichtspunkte für die Auslegung elektrischer Triebfahrzeuge mit asynchronen Fahrmotoren. Elektrische Bahnen 45 (1974) Nr. 3, S. 52 - 59.
- [6] Breyer, W.: Das Adhäsionsverhalten von Thyristorlokomotiven - Entwicklungen bei Reihe 1043 der ÖBB. Elektrische Bahnen 47 (1976) Nr. 4, S. 79 - 86 und Nr. 5, S. 115 - 119.
- [7] Bubel, H.: Die Neubaustrecken der DB, eine Investition für die Zukunft. Die Bundesbahn 52 (1976) Nr. 7, S. 439 - 450.
- [8] Krettek, O.: Die Schleuderwahrscheinlichkeit von Schienenfahrzeugen und die Probleme bei der Berechnung. Elektrische Bahnen 47 (1976) Nr. 11, S. 266 - 270 und Nr. 12, S. 292 - 295.
- [9] Runkel, M. und Gaffron, R.: Wirtschaftlich optimale Fahrzeuggrößen einer Kleinprofil-U-Bahn. ETR 25 (1976) Nr. 10, S. 609 - 616.

Bildunterschriften:

Abb. 1 Geringer Platzbedarf für eine Rampe bei steiler Cyclobahn-Trassierung, Rampenlänge 25 m bei 3,85 m Profilhöhe bzw. 28,8 m bei 4,9 m Profilhöhe und 0,3 m Überdeckung für Fußgänger.

Abb. 2 Cyclobahn-Trassierung bei 10 % Maximalgefälle und 375 m kleinster vertikaler Neigungsausrundung (Vertikalmaßstab zehnfach überhöht). Der benötigte Platz für die offenen Stationsgruben beträgt ^(bei 5 m Profilhöhe) einschließlich Rampen 140 m in der Länge bei 62 m Bahnsteiglänge; maximale Tunneltiefe 21 m; Reisegeschwindigkeit bei 662 m Stationsabstand 32,0 km/h; Anfangsgeschwindigkeit 31 km/h, Maximalgeschwindigkeit 73 km/h.

Abb. 3 Alternativen zum derzeitigen U-Bahn-Bau I: Münchner Bauweise mit zusätzlicher Wannentrassierung bei 50 ‰ Bahngefälle, II: einfache Tieflage mit Wannentrassierung III: offene Station in einfacher Tieflage, IV: Station in flacher Grube, maximales Bahngefälle 100 ‰, V: ebenerdige Station, VI: Station in Hochlage für Stadtbahnwagen M bei 75 ‰ Bahngefälle. Der Vertikalmaßstab ist in allen 6 Darstellungen vierfach überhöht.

Platzbedarf der Cyclobahn
bei 17,3° max. Neigung

Nullpunkt = Anfang des Zykloidenbogens

Bahnsteiglänge = $2s_0 = 62,4\text{ m}$

Stationsbereich = $2s_0 + 2\text{ Rampen} = 120\text{ m}$

Stationsabstand = $2s_0 + L = 512,4\text{ m}$

für $2s_0 = 50\text{ m}$ und $3,85\text{ m}$ Profilhöhe

Stationsbereich = 100 m

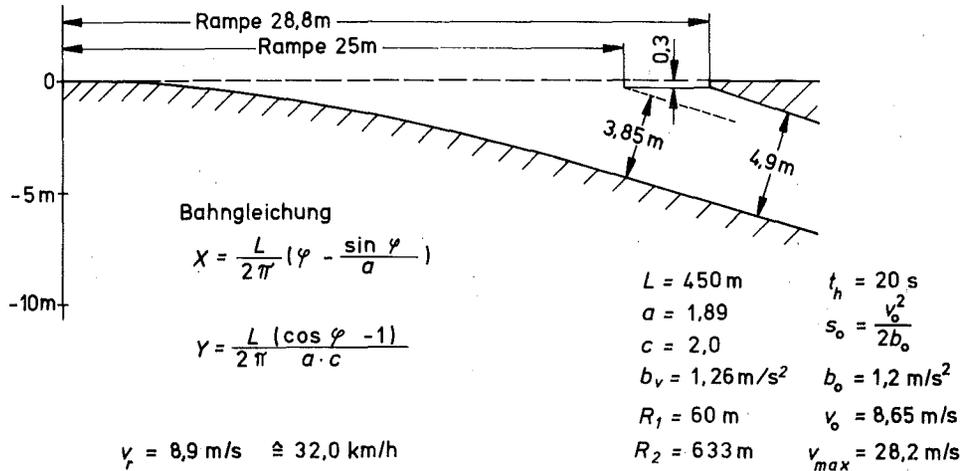


Abb. 1

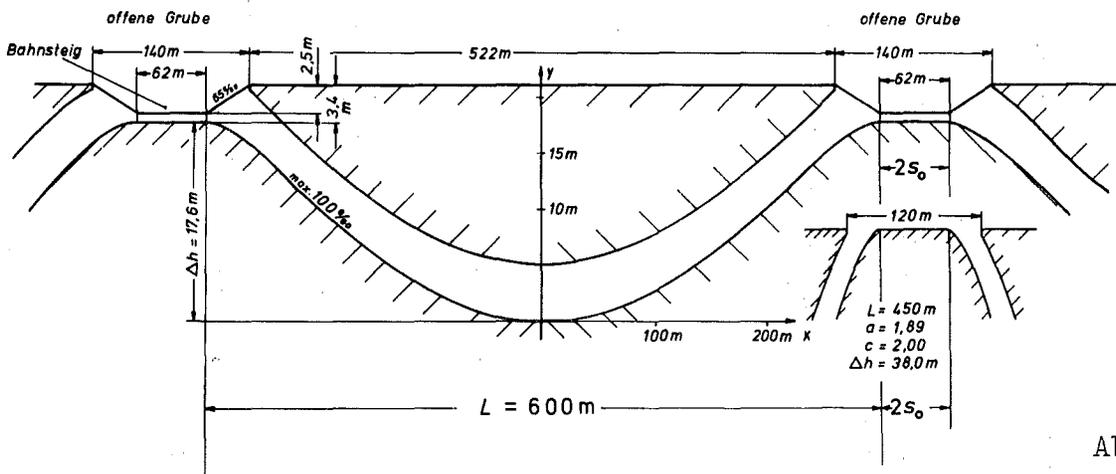
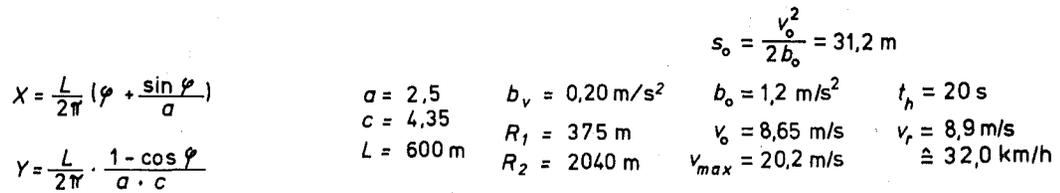
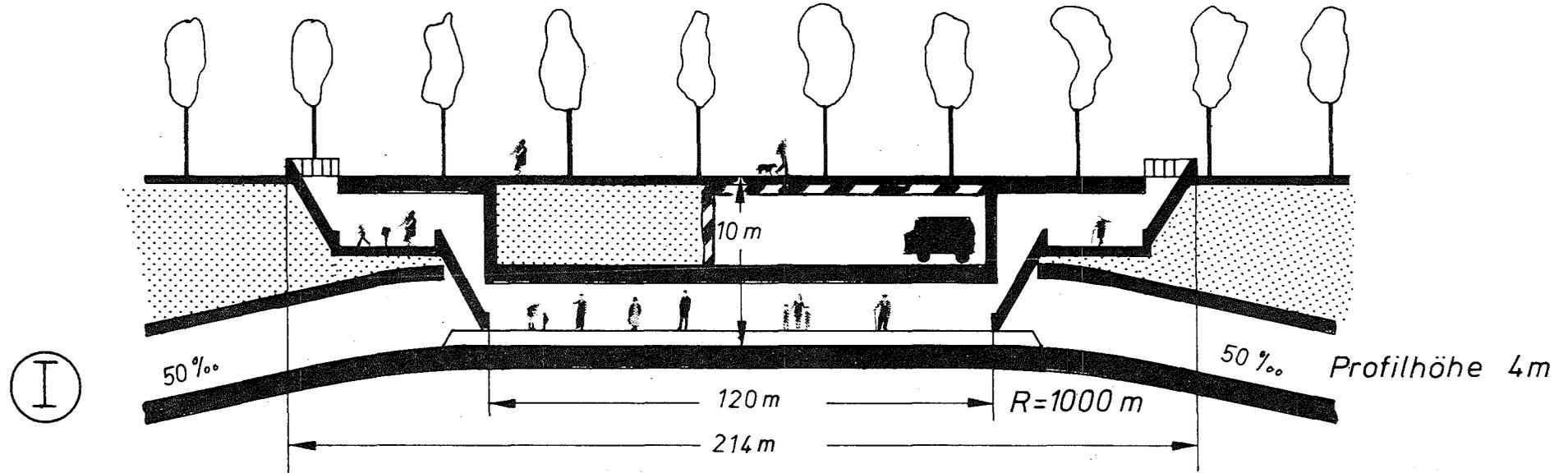
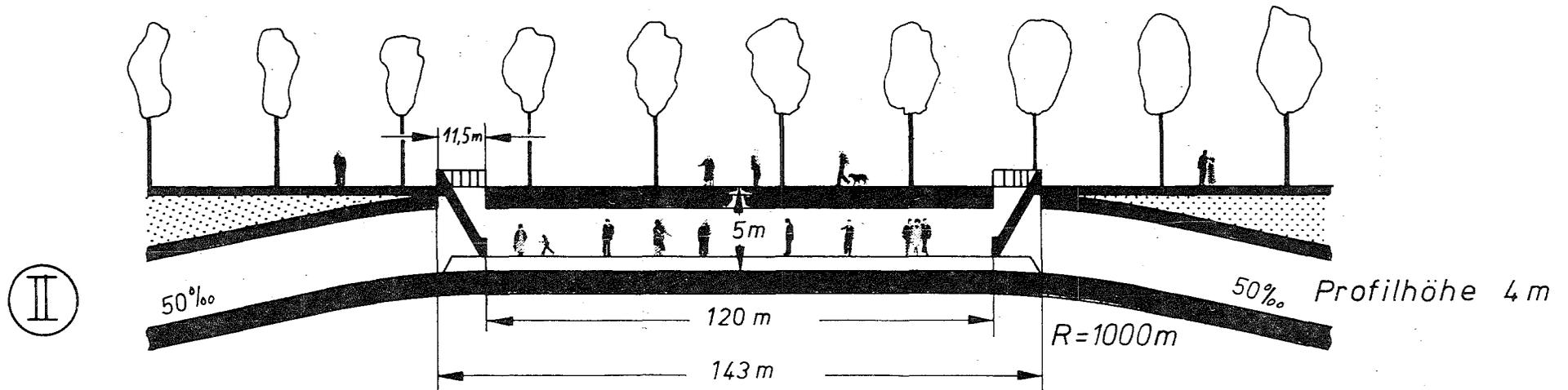


Abb. 2

Abb. 3

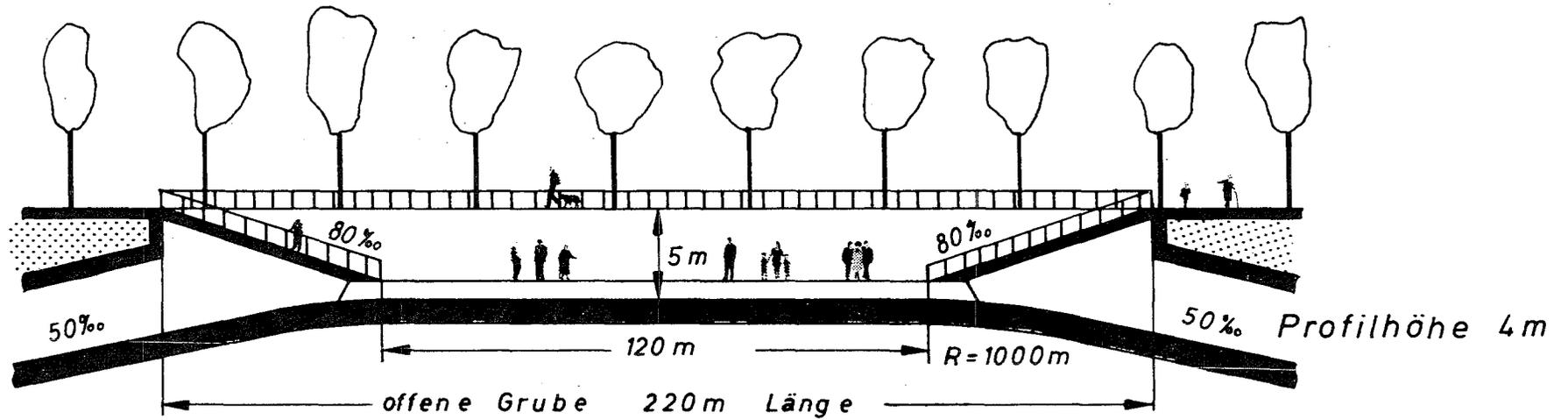


U-Bahn-Station mit Fußgängerquertunnel



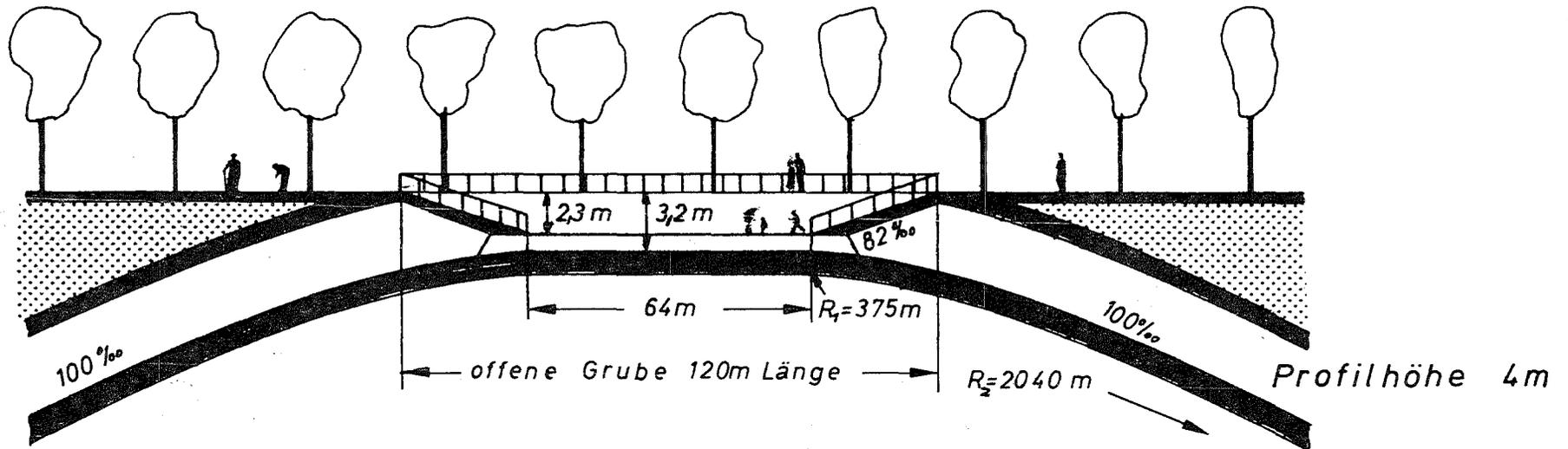
Station in einfacher Tieflage

III



Station in offener Grube

IV

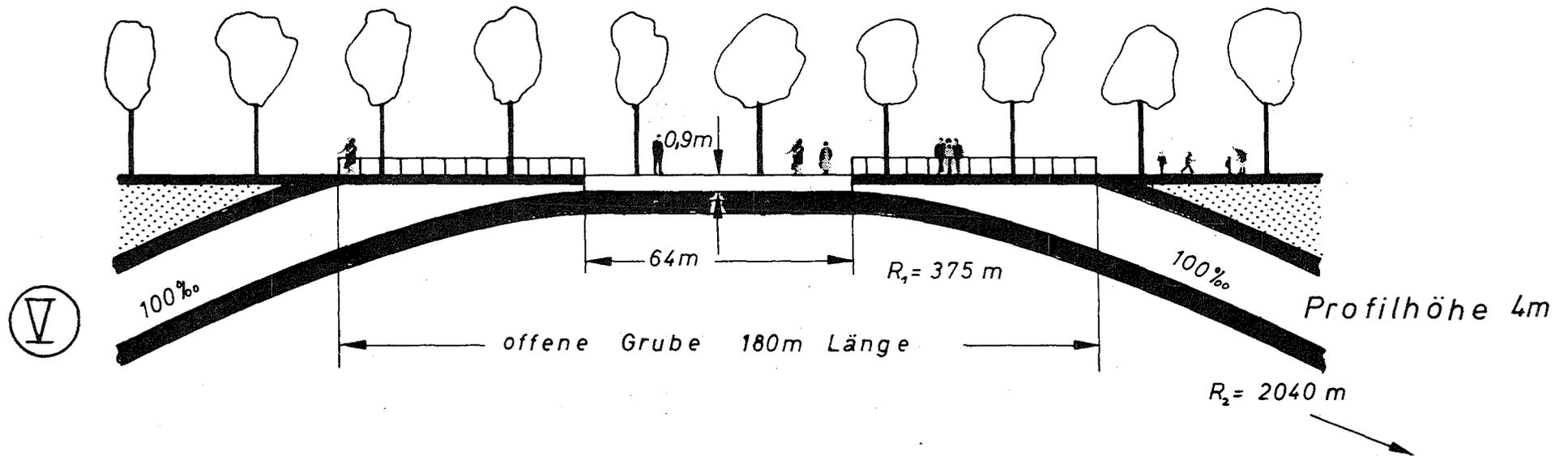


Station in flacher Grube

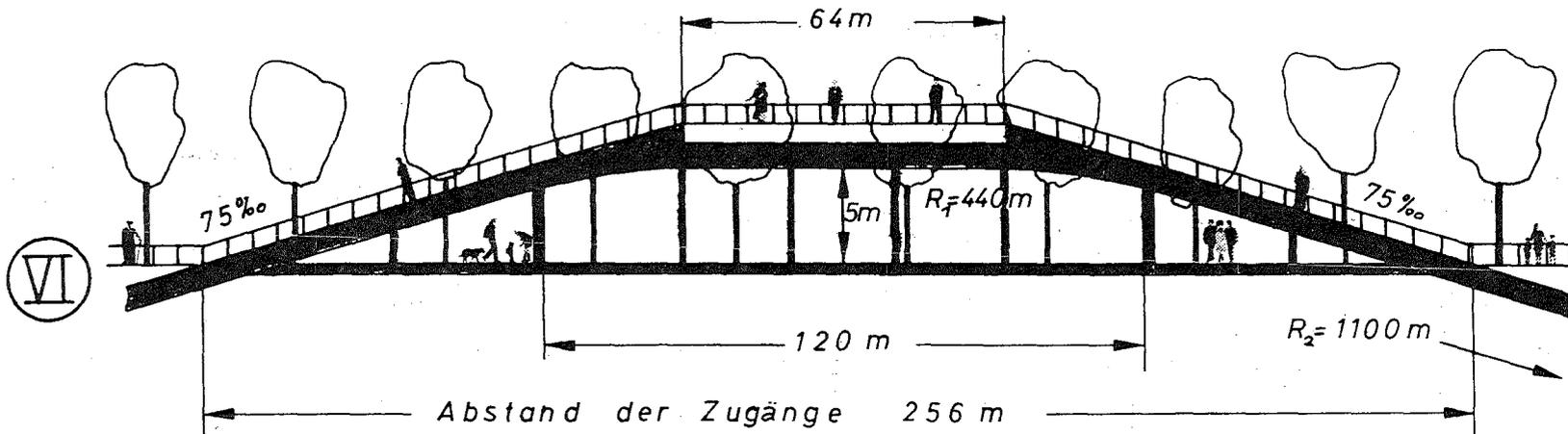
Cycloide $x = \frac{L}{2\pi} \left(\varphi - \frac{\sin \varphi}{a} \right)$

$y = \frac{L}{2\pi} \cdot \frac{\cos \varphi - 1}{a \cdot c}$

$L = 600\text{ m} \quad a = 2,5 \quad c = 4,35$

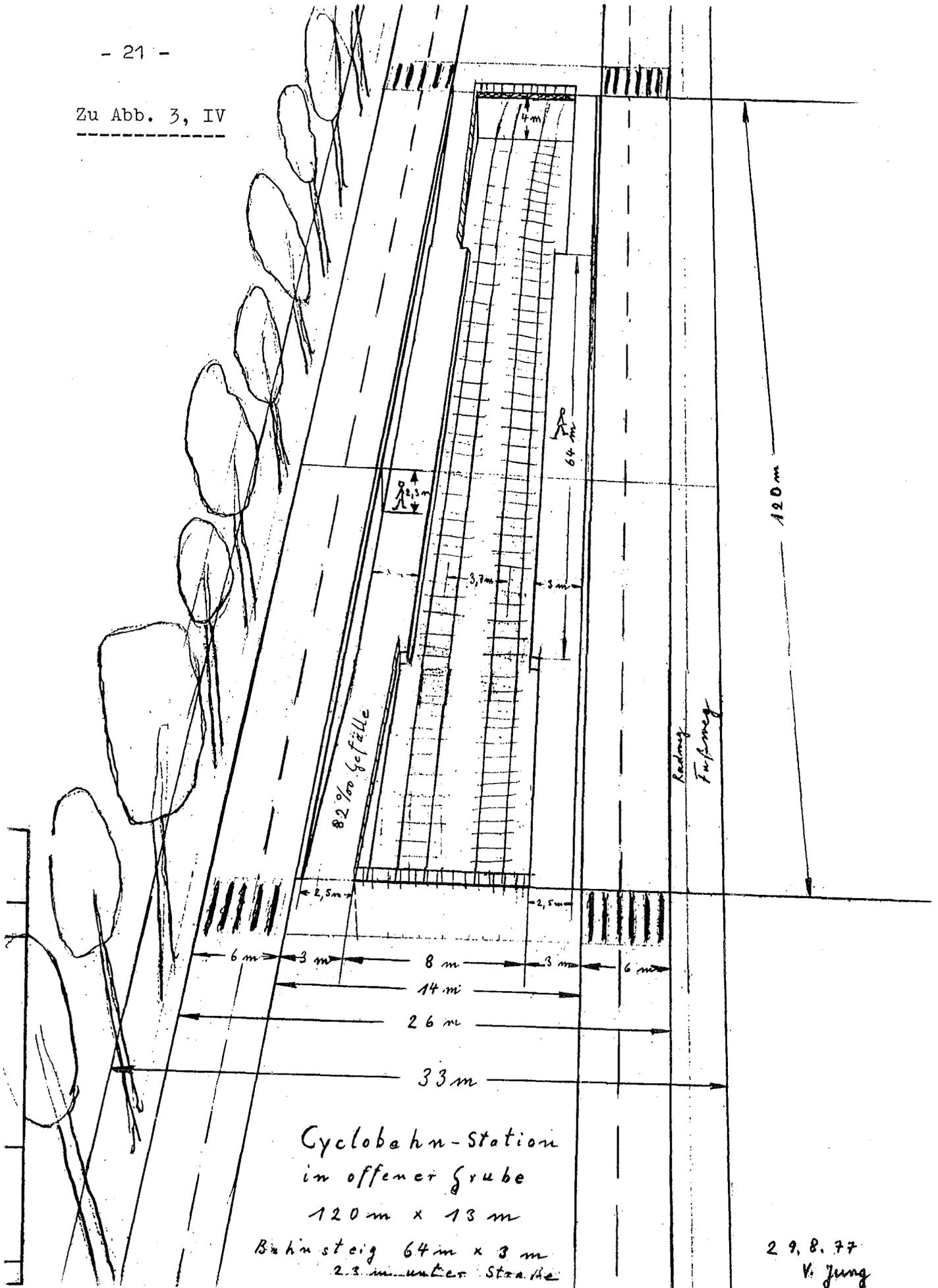


ebenerdiger Bahnsteigzugang



Station in Hochlage für Stadtbahnwagen M

Zu Abb. 3, IV



Zu Abb. 3, IV

