

Zeitschrift:	Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber:	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band:	94 (1976)
Heft:	20
Artikel:	Experimentelle Erfahrungen mit Filterrohren als Grundlage ihrer hydraulischen Bemessung
Autor:	Lacher, Hannes / Schröder, Ralph C.M.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-73096

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Experimentelle Erfahrungen mit Filterrohren als Grundlage ihrer hydraulischen Bemessung

Von Hannes Lacher und Ralph C. M. Schröder, Darmstadt

DK 532.542

Einleitung

Filterrohre werden immer mehr für die verschiedensten Entwässerungsaufgaben eingesetzt. Abgesehen von der klassischen Verwendung der Dränanlagen im landwirtschaftlichen Wasserbau liegt wohl das Hauptanwendungsgebiet heute im Strassenbau. Dabei wurden typische, an unterschiedlichen Zweckbestimmungen orientierte Konstruktions- und Einbautechniken entwickelt. Aber auch in bezug auf die Materialien, aus denen die im modernen Strassenbau verwendeten Filterrohre gefertigt werden, ergaben sich unterschiedliche Entwicklungen. Sieht man vom Ton als dem klassischen Dränrohrbaustoff sowie vom Steinzeug ab, sind heute zur Hauptsache nur zwei Filterrohrmaterialien gebräuchlich, Beton und Kunststoff, woraus «Betonfilterrohre» bzw. «Kunststoff-Filterrohre» hergestellt werden.

Unabhängig davon, ob aus diesen Materialien Teil- oder Vollfilterrohre oder auch bestimmte Sonderausführungen gefertigt werden, in jedem Fall ergeben sich materialbedingt so wesentliche Unterschiede in den einzelnen Eigenschaften der Rohre. Ein objektiver Vergleich zwischen den beiden Gruppen von Filterrohren ist daher schwer und ist nur anhand exakter Daten über bestimmte vergleichbare Merkmale möglich, also aufgrund von experimentellen Erfahrungen. Ein weniger ausgeprägter Vorzug der einen Filterrohrart kann dabei einem grösseren Vorteil bei der anderen gegenüberstehen, bei einer weiteren untersuchten Eigenschaft können die Verhältnisse gerade umgekehrt sein.

Auch bei der Gleichwertigkeit der Merkmale ergibt sich schliesslich immer wieder die Ebenbürtigkeit der beiden Materialien im Filterrohrbau: eine Entscheidung für oder wider das eine oder das andere Material lässt sich nur nach subjektiven Kriterien treffen, indem man z.B. besonderen Wert auf geringes Rohrgewicht oder auf geringe Deformierbarkeit legt usw. Die folgenden Ausführungen stellen den Versuch dar, aus der objektiven Gegenüberstellung jener Merkmale, über die aus experimentellen Untersuchungen genügend viele Daten vorliegen, zuverlässige Vergleiche wenigstens in hydraulischer Hinsicht zu gewinnen. Die angestrebten Vergleiche von typischen Merkmalen und Eigenschaften der verschiedenen Filterrohrarten haben so den notwendigen Bezug zur eigentlichen ingenieurmässigen Aufgabe der richtigen strömungstechnischen Bemessung.

Filterrohre im Strassenbau

Wasser, sei es Oberflächenwasser oder ein aufsteigender Kapillarsaum, sei es stehendes oder strömendes Grundwasser oder eindringendes Sickerwasser, ist generell ein Feind des Strassenbauers. Bereits die ersten Meister dieser Ingenieurdisziplin, die Römer, sicherten daher ihre Bauwerke mit gut durchdachten Entwässerungsanlagen. Sie unterschieden in den frostgefährdeten Zonen ihres Imperiums streng zwischen Oberflächenentwässerung in Form des klassischen Strassengrabens, zwischen Untergrundentwässerung durch Sicker schichten, die ganz unserer Frostschutzschicht in allen ihren Funktionen entsprechen, und entlastenden seitlichen Sicker schlitzten [19].

Der einzige technische Fortschritt – pointiert ausgedrückt – wäre nach 2000 Jahren allein in der Erfindung und Entwicklung des Sickerrohrs zu sehen. Heute unterscheiden wir (siehe dazu auch [1b]):

a) *Oberflächenentwässerung*: Strassengräben (werden heutzutage als Autofalle vermieden), Muldenentwässerung, Rauherinne oder dergleichen.

b) *Untergrundentwässerung*: Sickeranlagen bei Frostschutzentwässerung, Tiefenentwässerung, Böschungsentwässerung, sonstigen Sonderbauwerken wie Auflastfiltern, Entlastungsbrunnen u.ä.

c) *Sammelableitung bis zum Vorfluter*.

Sickerrohre finden hauptsächlich bei Frostschutz- und Tiefenentwässerung Verwendung. Dabei besteht die Kunst des richtigen Materialeinsatzes und der richtigen Konstruktion darin, den vorliegenden örtlichen Gegebenheiten wie Einschnitt, Damm, Verwindungsstrecke, geologischen und bau grundbedingten Verhältnissen optimal zu entsprechen. Aus diesem Grund ist es auch nicht möglich, sog. Standardfälle ein für allemal zu bemessen.

Rohrtypen

Das urtümliche Ton- oder Dränrohr, das in kurzen Stücken stumpf auf Stoss aneinandergelegt wird, kam im Strassenbau nie richtig zum Einsatz, weil es gegen Scheitel druck zu empfindlich ist. Statt diesem wurden zunächst gelochte Rohre aus Steinzeug und Beton entwickelt, Rohre von in der Regel 150 bis 250 mm Nennweite mit kreisrunden Öffnungen im Rohrmantel von rund 20 bis 30 mm Durchmesser. Diesen Rohren der ersten Generation folgten die sogenannten Teilverfilterrohre, erdacht in dem Bestreben, beiden Funktionen des Filterrohrs in einem gerecht werden zu können, nämlich der Zusickerung von aussen ins Rohrinnere und dem Abtransport des eingedrungenen Sickerwassers in der Entwässerungsleitung. Diese Rohre sind in ihrer oberen Hälfte porös und in der unteren dicht. Sie werden in Kunststoff (meist PVC) und Beton angeboten. Im Kunststoffrohr sind in der oberen Hälfte Schlitze vorhanden, im Betonrohr besteht diese dagegen aus porösem Einkornsplitt, der mit Zementleim verkitet ist.

Die Rohre der dritten Generation sind die sog. Vollfilterrohre, die über dem gesamten Umfang Wasser aufnehmen können. Auch sie gibt es in Kunststoff (meist PE-Hart) und in Beton. Sie wurden entwickelt, nachdem sich die Trennung der beiden erwähnten Funktionen in den meisten Fällen als nicht notwendig erwiesen hatte. Kunststoffvollfilterrohre sind Zweischalrohre, wobei die innere Schale das eigentliche glatte Rohr ist, das von der äusseren Schale spiralförmig umwickelt wird. An den Berührungsstellen werden beide Schalen miteinander verschweißt und perforiert. Die Betonvollfilterrohre bestehen radialsymmetrisch aus dem bereits geschilderten Einkorngefüge mit Wandstärken von 30 bis 40 mm.

Die Aufstellung einer Generationsfolge von Rohrtypen stellt zunächst kein Werturteil dar. Für besondere Aufgaben wie beispielsweise das Abfangen von Kluftwässern aus Hän

Tabelle 1. Ergiebigkeiten von Frostschutzentwässerungen an der BAB Frankfurt – Nürnberg nach [2]

	am 18. 3. 1970	am 21. 5. 1970
Haltung km 345,1	180 l/h	5 l/h
Haltung km 346,2	240 l/h	8 l/h

gen werden ausdrücklich Teilverrohre verlangt; jedoch sind solche Fälle bei der Ausführung selten. Hingegen erlebte das Teilverrohr eine Renaissance mit dem Aufkommen der Huckepack-Bauweise, die sich vornehmlich im bundesdeutschen Autobahnbau eingebürgerte. Hier war seine Formgebung (Fuss) gegenüber der des runden Vollfilterrohrs von Vorteil.

Zur Bemessung der Frostschutzentwässerung

Nach dem «Merkblatt über die Entwässerung von Strassen» [1a] soll «die Frostschutzschicht in ihrer Eigenschaft als horizontale Sickerschicht Wasser abführen, das als Niederschlag während der Bauzeit oder später durch geöffnete Fugen oder Risse einer Fahrbahnbefestigung auf den Seiten- und Mittelstreifen bzw. während der Tauperiode von unten her auf das Erdplanum gelangt». Dabei ist das letzte die Regel, die anderen Fälle sind einmalig (Bauzeit) oder eben die unangenehme Ausnahme, der vorsorglich begegnet werden muss. Mit dem Aufsteigen von Tauwasser ist im Frühjahr (März) zu rechnen. *Graf* und *Zimmermann* [2] massen die Ergiebigkeit aufgegrabener, 5 Jahre bestehender Frostschutzentwässerungen an zehn Stellen im Keupergebiet längs der BAB Frankfurt-Nürnberg. Dabei brachten die Haltungen im März hohe Abflussquoten, im Mai hingegen niedrige «trotz starker Regenfälle zu dieser Zeit, besonders am Vortag». Die gemessenen Werte (Tabelle 1) zeigen zunächst ein einwandfreies Funktionieren der Frostschutzentwässerung. Bei den trotz allem geringen Ergiebigkeiten kann dies jedoch nicht der Bemessungsfall sein. Dieser liegt offensichtlich entweder im Bauzeit-Regen oder im aufsteigenden Tauwasser.

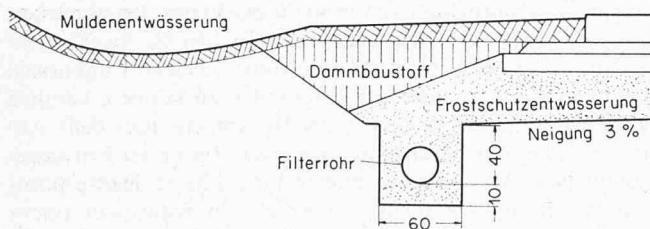


Bild 1. Beispiel einer Frostschutzentwässerung nach Fertigung der Strassendecke

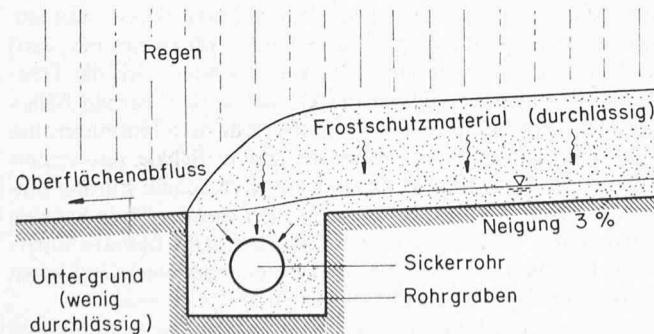


Bild 2. Bemessungsfall: Frostschutzentwässerung vor Aufbringen der Fahrbahndecke

Vorwiegend wird im Untergrund der Tauwasserandrang klein sein gegenüber dem Regenwasserandrang während der Bauperiode.

Man sollte also grundsätzlich für den Regenwasserandrang bemessen, weil nur so die gelegte Entwässerung auch nach Inbetriebnahme ausreichend funktioniert. Insofern ist auch dem Berechnungsbeispiel von *Jagersberger* [3] zuzustimmen; lediglich die von ihm gewählte instationäre Betrachtungsweise kann nur ein Bestandteil der Überlegungen sein.

Sein Beispiel liefert die Zeitspanne, welche die Frostschutzschicht braucht, um nach einem 70minütigen Regen wieder leerzulaufen. Für den Bemessungsfall massgebend ist hingegen die maximale Filterleistung des im Filterbaustoff eingebauten Rohres. Dabei sollte das Frostschutzmaterial so durchlässig gewählt werden, dass der Bemessungsregen von diesem aufgenommen werden kann und nicht gezwungen ist, oberirdisch mit Erosionserscheinungen abzufließen. Bei fachgemäßer Auslegung tritt dann die von *Jagersberger* richtig erkannte Retentions- oder Speicherwirkung der Frostschutzschicht in Aktion. Bevor diese Rechnung jedoch angestellt wird, muss nachgewiesen werden, welche Leistung das Filterrohr überhaupt maximal zu erbringen imstande ist. Diese Aussage liefert die Konstruktion und Auswertung des Potential- oder Strömungsnetzes, eine Berechnungsmethode, die im Grundbau schon seit langem eingebürgert ist. Zur Ermittlung der Ergiebigkeit von Filterrohren wurde diese Berechnungsweise erstmalig von *Lacher* und *Ueker* [4] eingeführt.

Im Folgenden soll die Bemessungssituation einer Frostschutzentwässerung kurz erläutert werden (Bild 1 und 2). Es wird dabei davon ausgegangen, dass der abdeckende Zwickel aus undurchlässigem Dammbaumaterial oberhalb des Filterrohrs erst nach Fertigstellung der Fahrbahn aufgebracht wird, so dass bei Regen während der Bauzeit das Filterrohr maximal bis zur Höhe des Rohrgrabens überstaut wird.

Als Begrenzungen des Strömungsfeldes werden sodann angesehen:

- der sich dabei ausbildende, einfachheitshalber als horizontal anzusehende freie Spiegel der Überstauung,
- die Ränder des Rohrgrabens, da die Durchlässigkeit des umgebenden Untergrunds auf alle Fälle erheblich kleiner als diejenige des Filterbaustoffs ist.

Das zweidimensional-ebene Strömungsnetz kann am einfachsten mit Hilfe der Analogie zum Stromfluss in einem flächigen Leiter (Widerstandspapier, Teledeltospapier) ermittelt werden. Die Analogie beruht darauf, dass sowohl das Strömungspotential als auch die elektrische Spannung die Laplacesche Gleichung der Potentialtheorie befriedigen. Das Verfahren ist ausführlich von *Stefan* und *Meyer* [5] beschrieben worden, so dass hier nicht näher darauf eingegangen zu werden braucht. Die Auswertung des Potentialnetzes erfolgt nach der einfachen Beziehung

$$q = \frac{m_s}{m_p} k \Delta h [\text{m}^3/\text{sm}]$$

welche die Ergiebigkeit q pro Meter Rohrlänge liefert. Es ist darin

m_s Anzahl der Stromröhren

m_p Anzahl der Potentialliniendifferenzen

Δh Gesamtpotentialunterschied [m], in der Regel der Höhenunterschied zwischen Oberwasserspiegel und Innenscheitel des Filterrohrs

k Durchlässigkeit des Filterbaustoffes [m/s]

Es wird demnächst eine Untersuchung veröffentlicht, in der die Ergiebigkeit q für sämtliche Variationsmöglichkeiten

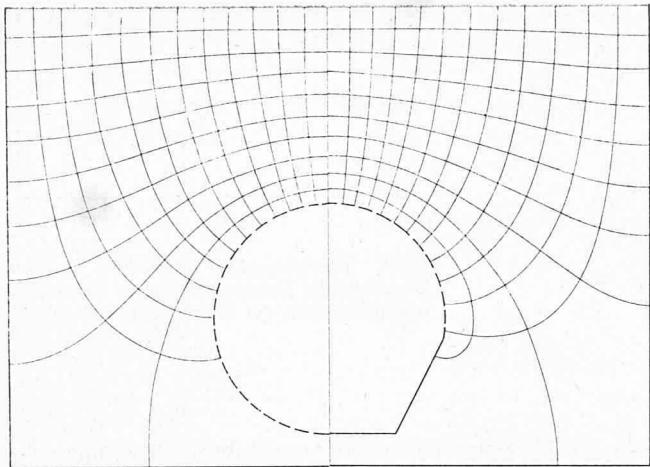


Bild 3. Potentialnetze für scheitelgefäßte Filterrohre im Rohrgraben, links: Vollfilterrohr; rechts: Teilverfülltes Filterrohr

von Rohrart, Rohrdurchmesser, Grabenabmessungen sowie Durchlässigkeit des Filtermaterials zahlenmäßig angegeben werden können. Bis jetzt liegen über das Aufnahmevermögen der Filterrohre bei der Frostschutzentwässerung sowohl Versuchsergebnisse als auch einige spezielle Potentialnetze vor [4/6]. Einschränkend gilt, dass diese Potentialnetze für den selten anzutreffenden Fall eines vollgefüllten Rohres unter Scheitelabfluss konstruiert wurden (Bild 3).

Die Regel wird aber das nahezu leere Rohr sein. Leider ist seine Netzkonstruktion mit Hindernissen verbunden, da bei der Anwendung der elektrischen Analogie die Randbedingung auf der Innenseite des leeren Rohres nur punktweise befriedigt werden kann.

Zwecks Ermittlung der Größenordnung in den Unterschieden der Leistungsfähigkeit wurde am Darmstädter Institut [7] nun doch dieser Weg beschritten (Bild 4) und die Ergebnisse einander gegenübergestellt (Bilder 3 und 5).

Bei Teilverfülltem wie Vollfilterrohr verhalten sich hierbei die Ergiebigkeiten von leerem zu scheitelvollem Rohr wie

$$q_{\text{leer}}/q_{\text{voll}} = 1/0,86 \cdot$$

Das «leere» Rohr leistet also um 16,7% mehr als das scheitelvolle Rohr. Es ist nun interessant, diesen theoretischen Untersuchungen die Versuchsergebnisse von Lacher und Monzavi [6] gegenüberzustellen (Bild 6). Danach liegen die pro-

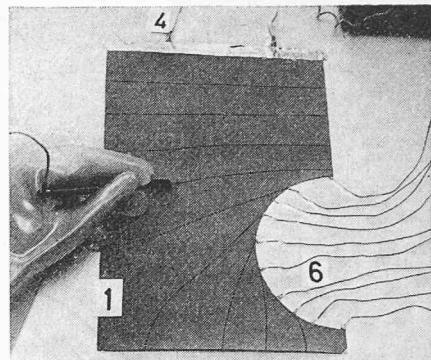


Bild 4. Konstruktion des Potentialnetzes mit Hilfe der elektrischen Analogie

- 1 leitfähiges Papier, Bleistiftsonde
- 4 Einleitung konstanten Potentials (obere Randbedingung)
- 6 diskretisierte Erfüllung der Randbedingung für das leere Rohr

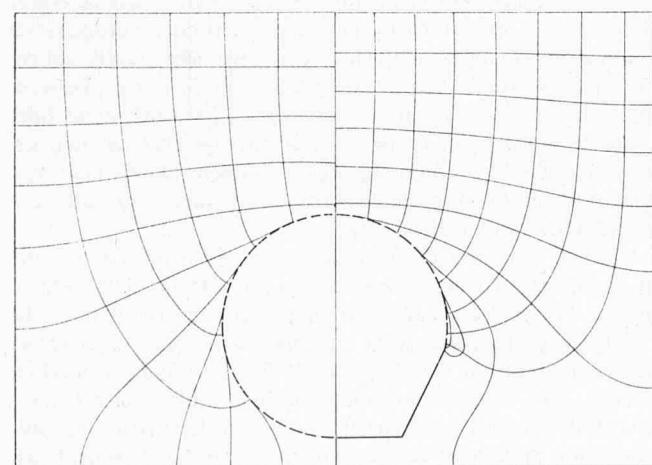


Bild 5. Potentialnetze für leere Filterrohre im Rohrgraben, links: Vollfilterrohr; rechts: Teilverfülltes Filterrohr

zentuellen Erhöhungen bei leerem Rohr höher, nämlich bei 19 bis 40%. Warum diese Differenzen bestehen, ist nicht ohne weiteres erklärbar. Gesichert ist auf jeden Fall die Tendenz, wonach «leere» Rohre erheblich mehr leisten als scheitelvolle. Dies sollte genügen, um das Aufnahmevermögen von Filterrohren weiterhin mit ausreichender Sicherheit am Beispiel des scheitelgefäßten Rohres zu ermitteln.

Zur Bemessung der Tiefenentwässerung

Tiefliegende Drainagen werden dort notwendig, wo Grundwasser – im Gegensatz zu dem bei der Bemessung der Frostschutzschicht angenommenen Sickerwasser – so hoch steht, dass es in den Planungsbereich des Koffers gelangt. Es müsste dann mit einer Dauerbelastung der Frostschutzentwässerung gerechnet werden, die man aber wegen des winterlichen Risikos tunlichst vermeidet. Charakteristisch ist die Anlage einer Tiefenentwässerung im Falle des Einschnitts sowie am Übergang vom Einschnitt zum Damm. Dort können aus den Klüften des verwitterten Gebirges Quellwässer austreten, die vom Strassenkörper ferngehalten und in den frostfreien Bereich abgesenkt werden müssen.

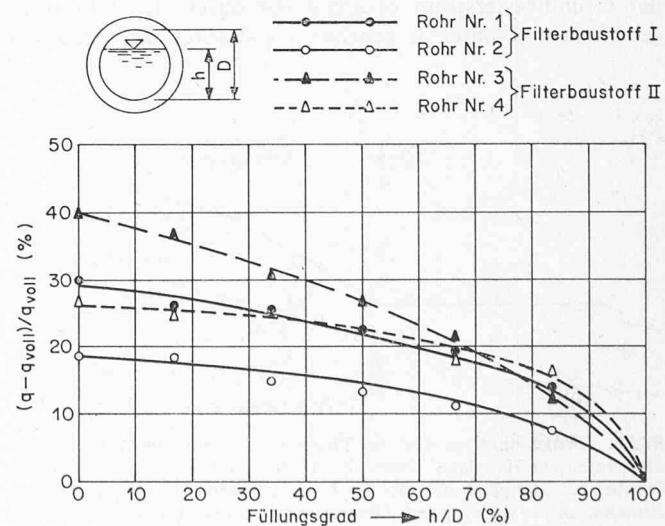


Bild 6. Leistungserhöhung teilgefäßter Filterrohre gegenüber solchen, die unter Scheitelbefüllung laufen [6]. Durchlässigkeiten: $k = 1,47 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ für Filterbaustoff I, $k = 4,78 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ für Filterbaustoff II

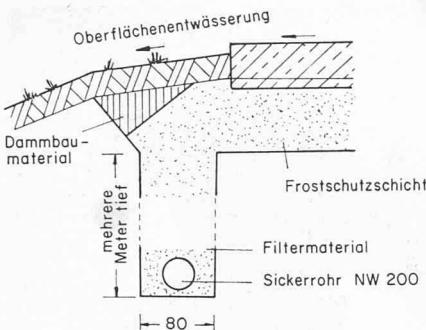


Bild 7. Beispiel einer Tiefensickerleitung

Bei der Bemessung interessieren vor allem zwei Fragen (Bild 7):

- Wieviel Wasser fällt an?
- Wie tief muss das Filterrohr gelegt werden?

Die erste Frage ist unter Umständen während der Bauzeit bereits durch gezielte Beobachtungen größenordnungsmässig zu beantworten. Wird eine wasserführende Schicht angeschnitten, dann lässt sich auf der Baustelle mit Eimer und Stoppuhr auch deren Ergiebigkeit q_s [l/sm] messen. Dabei treten die Maximalwerte im Spätherbst und insbesondere im Frühjahr auf. Wichtig ist nun, gleichzeitig die Anschnittshöhe h_s der betreffenden Schicht mit abzugreifen und daraus die Ergiebigkeit pro Meter Höhe zu errechnen. Legt man die Tiefenentwässerung sodann um den Betrag h_T tiefer, muss man hierfür mit einer Gesamtergiebigkeit

$$q = q_s (h_s + h_T) / h_s$$

rechnen, da die Ergiebigkeit in erster Näherung linear mit der Tiefe anwächst.

Die Frage nach der Tiefenlage des Rohres hängt sehr von den örtlichen Verhältnissen ab. Bei klüftigem Fels kann beispielsweise nur an Ort und Stelle selbst entschieden werden. Liegt hingegen eine homogene wasserführende Schicht vor, ist ein rein rechnerischer Zugang möglich. Bei beiderseitig symmetrischem Einschnitt kann mit der Dränanweisung [8] gerechnet werden. Für den Einschnitt bei einseitiger Hanglage soll hier eine Berechnungsmöglichkeit aufgezeigt werden (Bild 8). Ursprüngliche Situation vor dem Einschnitt: Parallel zur Hanglage mit Gefälle J_0 verlaufender Grundwasserstrom.

Annahme nach dem Verlegen des Tiefensickers: Nur der Grundwasserstrom oberhalb der durch das Filterrohr gehenden und unter J_0 geneigten, gedachten Begrenzungs-

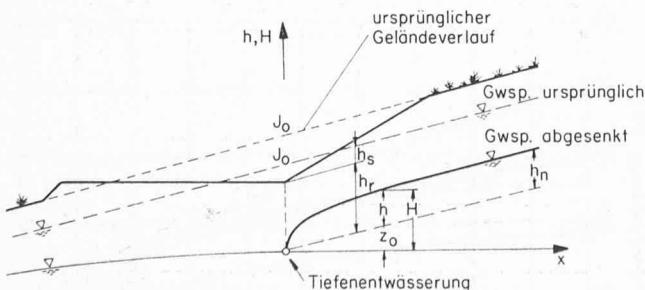


Bild 8. Bemessungslage für die Tiefenentwässerung beim Einschnitt und einseitiger Hanglage. Ursprüngliche Situation vor dem Einschnitt: Parallel zur Hanglage mit Gefälle J_0 verlaufender Grundwasserstrom. Annahme nach Verlegen des Tiefensickers: Nur der Grundwasserstrom oberhalb der durch das Filterrohr gehenden und unter J_0 geneigten, gedachten Begrenzungsline (gestrichelt) wird vom Rohr aufgenommen, der unterhalb derselben befindliche Reststrom fliesst unter dem Rohr hindurch weiter.

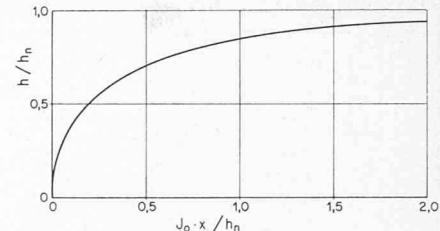


Bild 9. Dimensionslose Darstellung der Senkungslinie des Grundwasserstroms infolge Tiefenentwässerung bei einseitiger Hanglage

linie (in Bild 8 strichiert) wird vom Rohr aufgenommen, der unterhalb derselben befindliche Reststrom fliesst unter dem Rohr hindurch weiter.

Mit der Dupuit-Hypothese

$$v = -k \frac{dH}{dx}; q = |v| \cdot h = kh \frac{dH}{dx},$$

wobei gemäss Bild 8 $H = h + z_0$ gesetzt ist, und der Kontinuitätsbedingung

$$\frac{d}{dx} (v \cdot h) = 0$$

ergibt sich zusammen

$$\frac{d}{dx} \left(h \cdot \frac{dH}{dx} \right) = 0 \text{ oder } h \cdot \frac{dH}{dx} = C_1.$$

Da q und k aus Feldversuchen und Messungen (Pumpversuch in Probebohrlöchern) bekannt sind, kann C_1 sofort aus der Dupuit-Hypothese bestimmt werden zu:

$$C_1 = \frac{q}{k}.$$

Damit ergibt sich die Gleichung

$$h \cdot \frac{d}{dx} (h + z_0) = \frac{q}{k}.$$

Mit $dz_0/dx = J_0$, der Neigung der Begrenzungslinie, ergibt sich die Lösung

$$x = \frac{q}{k \cdot J_0^2} \left(\ln \frac{1}{1 - J_0 kh/q} - J_0 kh/q \right) + C_2.$$

C_2 wird mit Hilfe der Randbedingung $(x, h) = (0, 0)$ bestimmt und erweist sich hierfür als null. Für $h \rightarrow h_n = q/k J_0$ ergibt sich $x \rightarrow \infty$. Damit ist h_n eine asymptotisch zu erreichende Endwassertiefe oder auch, wie in der Gerinnehydraulik üblich, Normalwassertiefe. Bei Bestimmung von h_n unter Verwendung der Messwerte k und q darf dieses natürlich nicht über Gelände anwachsen, es ist hiermit also gleichzeitig eine gewisse Kontrolle der Eingangsdaten gegeben. Damit lässt sich aber nun die Lösung dimensionslos schreiben und auftragen (siehe Bild 9 und Tabelle 2).

Nach dem Einzeichnen der so errechneten Spiegellinie in das Querprofil der Strassenstrasse kann festgestellt werden, ob der Wasserspiegel mit ausreichender Sicherheit unter die Frostgrenze abgesenkt wird oder nicht. Im Falle einer erforderlichen Iteration der Absenkstufe h_T muss darauf geachtet werden, dass sich hiermit auch jeweils q ändert. Der Bemessungsfall während der Bauzeit, wie er bei der Frostschutzentwässerung aufgezeigt wurde, tritt auch bei der Tiefenentwässerung auf. Mehrheitlich wird er sogar der ausschlaggebende sein, was jeweils nachzuweisen wäre.

Tabelle 2. Dimensionslose Zahlenwerte der Lösungsfunktion $x(h)$

$\frac{h}{h_n}$	$\frac{J_0 \cdot x}{h_n}$	$\frac{h}{h_n}$	$\frac{J_0 \cdot x}{h_n}$
0	0	0,3	0,0567
0,05	0,0013	0,5	0,1931
0,1	0,0054	0,7	0,5040
0,15	0,0125	0,9	1,4030
0,2	0,0231	1	∞

Filterstabile Verlegung

Anlässlich eines Rechtsstreits wurden die Begriffe «Filterrohr» und «Filterstein» bemängelt, weil es sich nicht um Filtereinrichtungen handele. Das ist richtig, wenn man, wie in der Verfahrenstechnik üblich, «Filtern» gleich «Filtrieren» setzt. Durch diesen Vorgang werden aus der Strömung Partikel abgesiebt und im Filter zurückgehalten. Dieser setzt sich mit der Zeit zu (Kolmatation) und muss zwecks Reinigung rückgespült werden. Daran ist bei der Verwendung von Filterrohren natürlich nie gedacht worden. Im Bereich der Grundwasserabsenkung und der Dränung ist «Filterrohr» konventionellerweise gleichsam die Abkürzung für «filterstabiles Rohr». Bei der Verlegung ist man bestrebt, auf jeden Fall stabile Verhältnisse im und um den Filter zu erzeugen, damit sich weder das Rohr zusetzt, noch das umliegende Material ausgespült wird. Aus diesem Grunde werden die Beschaffenheit und die Abstufung des Filtermaterials von den einschlägigen Empfehlungen und Normen [1a, 9] genau vorgeschrieben. Leider hält sich die Baupraxis nicht immer daran. So sind Schlamm- und Siebanalysen des Baugrunds noch immer selten anzutreffen, und als Filtermaterial wird meist das «ortsübliche» verwendet, ohne dass zuvor dessen Brauchbarkeit im Sinne der Filterabstufung nachgewiesen worden wäre.

Betrifft dies die Abstufung Baugrund gegen Filterkies, so ist die Abstufung Filterkies gegen Filterrohr gleichwohl überlegen. Hier wird augenfällig gesündigt bei der Verwendung von gelochten Steinzeug- und Betonrohren, indem deren grossen Durchtrittsöffnungen kein adäquates Filterkorn vorlagert wird. Die Folge sind Ausschwemmungen von Filtermaterial, das im Rohr liegenbleibt, sowie Nachsacken des Filterkörpers. Diese Rohre kommen mit einem einstufigen Filter nicht aus, sondern erfordern einen Zweistufenfilter, es sei denn, man setzt sie in untergeordneten Situationen ein, bei denen die geschilderten Nachteile in Kauf genommen werden können.

Die anderen im Handel befindlichen Filterrohre bedürfen in der Regel nur eines einstufigen Filters, da ihre Öffnungen klein genug sind. Die Betonfilterrohre bringen dazu in ihrem 30 bis 40 mm starken porösen Mantel automatisch eine weitere Filterabstufung mit, da ihre Haufwerkporosität über derjenigen des umgebenden Filterkieses liegt. Schon früher [6] konnte nachgewiesen werden, wie der grobporöse Rohrmantel der Betonfilterrohre eine nicht unwesentliche Leistungserhöhung gegenüber der rechnerisch auf den Innendurchmesser bezogenen Grenze Filtermaterial/Rohr erbringt. So ergaben sich dort für die vier untersuchten Betonvollfilterrohre Leistungserhöhungen von im Mittel 18,2% gegenüber einem siebartig gedachten Rohr gleicher Nennweite. Unter der vereinfachten Annahme radialsymmetrischer Zuströmung zum Betonvollfilterrohr lässt sich überdies der äquivalente Durchmesser für ein siebartig gedachtes Rohr gleicher Ergiebigkeit berechnen. Es muss dazu (Bild 10) die Summe aller Verluste gleich gross sein:

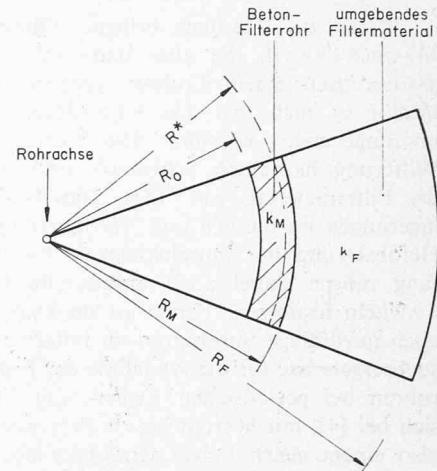


Bild 10. Ausschnitt aus einem Betonfilterrohr mit porösem Rohrmantel und umgebendem Filtermaterial. R^* ist der Äquivalenzradius für ein siebartig gedachtes Rohr gleicher Ergiebigkeit

$$h_{vF(\text{filtermaterial})} + h_{vM(\text{anteil})} = h_v^*$$

oder

$$\frac{q}{2\pi k_F} \int_{R_M}^{R_F} \frac{dr}{r} + \frac{q}{2\pi k_M} \int_{R_O}^{R_M} \frac{dr}{r} = \frac{q}{2\pi k_F} \int_{R^*}^{R_F} \frac{dr}{r}.$$

Das Symbol * kennzeichnet die Äquivalenzgrössen.

Nach Integration der Gleichung in den vorgegebenen Grenzen und Auflösung nach der gesuchten Grösse R^* ergibt sich

$$\frac{R^*}{R_M} = \left(\frac{R_O}{R_M} \right)^{k_F/k_M}.$$

Die Anwendungsbereiche der dimensionslosen Ausdrücke befinden sich dabei innerhalb (siehe gleichfalls dazu [6]) der Werte

$$0,6 \leq \frac{R_O}{R_M} \leq 0,8, \quad 10^{-3} \leq \frac{k_F}{k_M} \leq 10^{-1}.$$

Wie die Auftragung der obigen Beziehung in Bild 11 zeigt, fällt bei Betonfilterrohren im üblichen Anwendungsbereich der äquivalente Durchmesser praktisch mit dem Ausendurchmesser zusammen. Daraus ergibt sich eine deutliche Überlegenheit gegenüber den dünnenschaligen Kunststofffilterrohren, die allerdings realistischerweise durch die Zusetzung der Poren bei Lagerung auf der Baustelle und beim Einbau der Rohre unter Umständen wieder eingeschränkt wird.

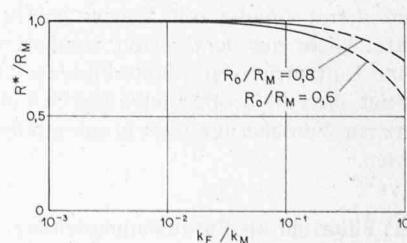


Bild 11. Darstellung des äquivalenten Filterrohrhalbmessers R^* für ein siebartig gedachtes Rohr gleicher Ergiebigkeit in Abhängigkeit von der Filterabstufung

Nach dem Einbau bringen Filterrohre zunächst die Maximalleistung, die aber dann sehr schnell abfällt und asymptotisch einem Endwert entgegenstrebt. Die Ursache hierfür ist nicht bei den Filterrohren zu suchen, sondern im umgebenden Kiesfilter. Die Wechselbelastung durch die Witterung hat einen Schrumpf- und Auflockerungsprozess des Filtermaterials zur Folge. Dies bedingt wiederum Umlagerungen im Gefüge und Verringerung der Porosität bzw. Herabsetzung der Durchlässigkeit k_F . In geringerem Umfang mögen dabei auch ausgespülte Feinteilchen sich in Zwickeln festsetzen. Ferner ist denkbar, dass sich eventuell auch quellfähige Substanzen im Filtermaterial befinden. Versuchsergebnisse für die Abnahme der Ergiebigkeit von Filterrohren bei periodischen Regen- und Trockenfolgen finden sich bei [4], mit Werten bis zu 30% Leistungsrückgang, was also einem gleich hohen Rückgang der Durchlässigkeit k_F des Filtermaterials entspricht. Bei vergleichenden Versuchen im Institut für Hydraulik und Hydrologie in Darmstadt konnten zwischen dem Verhalten von Kunststoff- und Betonfilterrohren in dieser Hinsicht keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Versinterung

Zu diesem Thema sind zunächst die Beobachtungen von *Graf* und *Zimmermann* [2] an 3 bis 4 m jeweils vor einem Schacht aufgegrabenen Frostschutzentwässerungen zu nennen: Von den 12 untersuchten Stellen im Keupergebiet der BAB Frankfurt-Nürnberg zeigten nur 2 Kalksinterablagerungen. Bei Km 365,7 wies der Sammler mehrere Zentimeter starke Versinterungen auf, darunter «bis zu faustgrosse Klumpen am Rohrausgang, hinter denen sich Sand ablagerte». Auch im zuliefernden Betonfilterrohr waren am Auslauf Verkrustungen festzustellen. Bei Km 374,3 und Km 374,6 wiesen gleichfalls die Sammelleitungen «über zwei Finger starke, auch knollige Verkrustungen» auf, mit gleichen Konsequenzen für den Abfluss. Die zuleitenden gelochten Steinzeugfilter waren nicht versintert.

Von den gleichfalls von *Graf* und *Zimmermann* [2] inspizierten 9 Tiefenentwässerungen wies die Leitung Nr. 2 an der Sohle hingegen bis 0,5 cm dicke Kalksinterkrusten auf. Ferner zeigte die Leitung 8a «an den Ausläufen starke Kalksinterabsätze». Die parallel liegende Stichleitung 8b wies keine Ablagerungen auf. Die Verfasser konnten sich dieses Verhalten nicht erklären.

Hier ist auf die «im Merkblatt für die Entwässerung von Strassen» [1a] niedergelegten Erfahrungen zu verweisen. Es gilt dabei insbesondere das dort unter 4.321 Gesagte: «Bei unterirdischen Anlagen besteht auch bei sorgfältiger Ausführung stets die Gefahr einer Versinterung, Verckerung und chemischen Kontaktverunreinigung. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Sickeranlagen intermittierend belastet werden und daher einem ständigen Luft/Wasser-Wechsel ausgesetzt sind. Diese Gefahr... lässt sich herabsetzen, wenn die Rohrleitungen tiefer als das angestrebte Absenziel verlegt werden und damit ständig mit Wasser gefüllt sind». Zu ergänzen wäre: Nicht nur herabsetzen, sondern ganz vermeiden, denn ohne Luftzutritt keine Sinterbildung. Dies wird dadurch bestätigt, dass die beobachteten Knollen und Krusten im Gegensatz zur Verckerung stets in unmittelbarer Schachtnähe auftraten.

Das Filterrohr als Entwässerungsleitung

Bei der Bemessung von Filterrohren unter dem Gesichtspunkt der Abführung des eingesickerten Wassers geht man allgemein davon aus, dass die Leitung unter Annahme von Vollfüllung für den Abfluss zu bemessen ist, der am Leitungs-

ende erwartet wird. Teilstücks- und Diskontinuitätsfragen bleiben dabei also – durchaus vernünftigerweise – völlig ausser acht. Die Dimensionierung des Filterrohrs als Entwässerungsleitung erfolgt daher nach den üblichen hydraulischen Rechenvorschriften für Rohrströmungen, wobei für eine geforderte Abflussleistung entweder bei vorgegebenem Gefälle ein ausreichender Rohrdurchmesser nachzuweisen ist oder umgekehrt.

Gleichgültig nach welchem Fliessgesetz dabei gerechnet wird – in jedem Fall spielt bei dieser Bemessungsaufgabe die Rauigkeit der Rohrinnenwand eine nicht unwesentliche Rolle. Angaben hierüber sind wenige zu finden. Abgesehen von einigen eigenen experimentellen Erfahrungen [10, 11] sind brauchbare Daten nur für den Dränsfall allgemein verfügbar. Vom letzteren wurde wegen des angestrebten Vergleichs zwischen Beton und Kunststoff als Filterrohrmaterialien auf die Veröffentlichungen von *Saxen* und *Karge* [12] sowie *Eylers* [13] zurückgegriffen. Die damit und mit den übrigen als einwandfrei eingeschätzten Daten durchzuführenden Vergleiche sollen im folgenden an Hand des bekannten *Prandtl-Colebrook-Diagrammes* als Vergleichsbasis durchgeführt werden.

Für das nach *Darcy-Weisbach* anzusetzende Reibungsgefälle der Filterrohrleitung,

$$J = \frac{\lambda}{D} \frac{v^2}{2g},$$

mit dem «hydraulischen Durchmesser» $D = 4R = 4F/U$ und mit v als der mittleren Geschwindigkeit Q/F , ist der Rohrwiderstandsbeiwert λ nach Prandtl-Colebrook gegeben durch

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k/D}{3,71} \right).$$

Diese als Vergleichsgrundlage zu verwendende implizite Beziehung mit $Re = v D / \nu$ als Reynoldszahl und k/D als relativer Rauigkeit ist als «Übergangsgesetz» allgemein bekannt und wird in [13] als «theoretische (exakte) Fliessformel» beschrieben.

Nach [10] bzw. [11] ergaben sich als äquivalente Rauigkeit k für die Bildung von k/D Werte bis zu

$k \approx 2,0$ mm für das Beton-Vollfilterrohr

$k \approx 0,15$ mm für Kunststoff-Filterrohre

Es handelt sich allerdings jeweils nur um eine bestimmte Fertigung. Dennoch genügen diese Angaben, um die starken Unterschiede in der Wandrauigkeit deutlich zu machen. Die Frage ist aber, ob sich diese Rauigkeitsunterschiede im gleichen Ausmass auch auf das Widerstandsverhalten der betreffenden Leitung, d.h. auf das benötigte Leitungsgefälle oder den zu wählenden Rohrdurchmesser, auswirken. Ehe zur Beantwortung dieser Frage mit den vorstehend genannten k -Werten, die zumindest die jeweiligen Größenordnungen andeuten, und mit den üblichen Rohrweiten die Relativwerte k/D gebildet und die so entstehenden Widerstandskurven vergleichend in das λ - Re -Diagramm nach Prandtl-Colebrook eingetragen und diskutiert werden, soll für Kunststoffrohre noch auf die von *Saxen* [12] empfohlene empirische Fliessformel

$$v = 182,2 R^{0,719} J^{0,569}$$

zurückgegriffen werden, worin $R = F/U = D/4$ den «hydraulischen Radius» darstellt. Um auch diese Formel in den ange strebten Vergleich mit einbeziehen zu können, muss sie wie das Prandtl-Colebrook-Gesetz mittels λ , Re und k/D ausgedrückt und also entsprechend umgeformt werden. Dazu sei hier folgender Exkurs erlaubt:

Nach [14, 15] kann jede als Potenzprodukt aufgebaute Fliessformel

$$v = K R^\alpha J^\beta$$

nach Einsetzen von $R = D/4$ durch Gleichsetzen mit der Umkehrung der Darcy-Weisbach-Gleichung

$$v = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{2g JD}$$

überführt werden in ein Widerstandsgesetz

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = f(Re, k/D),$$

das dann seinerseits mit der Prandtl-Colebrook-Beziehung verglichen werden kann, wie hier beabsichtigt. Indem man dabei das Reibungsgefälle nach Darcy-Weisbach durch Erweiterung mittels $(D/v)^2$ als

$$J = \lambda Re^2 \frac{v^2}{2g D^3}$$

in Rechnung stellt, entsteht für den Widerstandsbeiwert, der aus der Potenzformel hervorgeht, der Ausdruck

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = c (Re \sqrt{\lambda})^{2\beta-1} (k/D)^{-(1+\alpha-3\beta)}$$

mit $c = \frac{K}{4^\alpha} \frac{v^{2\beta-1}}{(2g)^3} k^{1+\alpha-3\beta}$

Nach den in [12] und [13] wiedergegebenen experimentellen Daten über Kunststoffdränrohre ist bei diesem Material mit einer äquivalenten Rauigkeit von $k \approx 0,1$ mm zu rechnen. Zu diesem Wert ist allerdings anzumerken, dass er als Durchschnitt aus experimentell bestimmten k -Werten anzusehen ist, die sich an Kunststoffdränrohren von 40 mm und 50 mm Durchmesser im Bereich $10^4 < Re < 10^5$ zwischen $k = 0,03$ mm und $k = 0,21$ mm ergeben haben. Wird daraufhin mit $k \approx 0,1$ mm auch bei anderen Rohrweiten gerechnet, so entsteht mit den Zahlenwerten $\alpha = 0,719$ und $\beta = 0,569$ sowie $K = 182,2$ und der kinematischen Zähigkeit $v = 1,31 \cdot 10^{-6}$ m²/s (10° C) aus der empirischen Fliessformel von *Saxen* folgender Ausdruck für den Widerstandsbeiwert:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,704 (Re \sqrt{\lambda})^{0,138} (k/D)^{-0,012}.$$

Diese empirische Formel ist zusammen mit den übrigen auf [10, 11] beruhenden Abhängigkeiten in das λ -Re-Diagramm (Bild 12) eingetragen, und zwar für die Rohrdurchmesser 50 mm (Drän), 100 mm, 200 mm und 300 mm. Dabei zeigt sich, dass der Einfluss der Rohrweite bei der *Saxen*-Formel ab $D = 100$ mm aufwärts (Kurven 2 bis 4) hauptsächlich nur über die Re -Zahl wirksam wird, kaum noch über k/D . Deckungsgleich ist die empirische Aussage mit dem Prandtl-Colebrook-Gesetz daher in keiner Weise, weil nach der exakten Beziehung eine wesentlich stärkere k/D -Abhängigkeit vorhanden sein muss. Dennoch werden die Tendenzen des ziemlich nahe an der Glattkurve liegenden Widerstandsverhaltens nach *Saxen* und auch die Größenordnung der λ -Werte einigermaßen anschaulich und in etwa zutreffend wiedergegeben. Dies zeigt auch der Vergleich mit der aus [11] gewonnenen Widerstandskurve 5, der die schon angeführte äquivalente Rauigkeit $k \approx 0,15$ mm bei $D = 100$ mm des dort untersuchten Kunststoff-Filterrohrs zugrunde liegt.

Nach diesen Vergleichen bezüglich Kunststoffrohre lässt sich feststellen, dass deren Widerstandsverhalten ein ausgesprochenes Übergangsverhalten ist, das eher beim Grenzfall «hydraulisch glatt» als zum rauen Bereich hin angesiedelt

ist. Ganz im Gegensatz steht das Widerstandsverhalten der Betonfilterrohre. Mit dem hier zu Vergleichszwecken angesetzten Wert $k \approx 2,0$ mm aus den Untersuchungen [10] ergibt sich für grössere Re -Zahlen vollraues Verhalten, für kleinere Re -Zahlen nur andeutungsweise Übergangsverhalten. Um die vorherrschende Tendenz des Einflusses von k/D bei diesem Rohrmaterial deutlich herauszustellen, sind in Bild 12 als Kurven 6 bis 9 die Rohrdurchmesser 100 mm, 200 mm und 300 mm wiedergegeben. Kurve 10 grenzt in Form der Moody-Grenze die Bereiche «Übergang» und «voll rau» gegeneinander ab.

Aus dem mit Bild 12 möglichen Vergleich des Widerstandsverhaltens von Filterrohren als Transportleitungen aus den beiden Rohrmaterialien Beton und Kunststoff ergeben sich folgende Feststellungen:

- Das nahe an der Glattkurve gelegene und daher verhältnismässig wenig streuende Widerstandsverhalten der Kunststoffrohre hat ausgeprägten Übergangscharakter. Mit abnehmender Re -Zahl ist eine kräftige Zunahme des Widerstandsbeiwertes λ verbunden.
- Im Gegensatz dazu ist das Widerstandsverhalten von Betonfilterrohren durch verschwindende Re -Abhängigkeit gekennzeichnet, während der Widerstandsbeiwert λ mit wachsender Rohrweite stark abnimmt.
- Wie die Darstellung in Bild 12 erkennen lässt, nehmen die Widerstandsbeiwerte λ der beiden Rohrarten für Re -Zahlen zwischen Re_{krit} und 10^4 durchaus nahezu die gleiche Größenordnung an. Derart kleine Re -Zahlen werden allerdings nicht oft als Bemessungsfall (Vollfüllung, volle Abflussleistung) in Frage kommen, treten aber bei Teillösungen auf.

Zu diesen Schlussfolgerungen muss jedoch mit aller Deutlichkeit vermerkt werden, dass es sich um Aussagen aufgrund von Versuchsergebnissen handelt, die sämtlich aus Experimenten mit kontinuierlicher Rohrströmung, also ohne das Eindringen von Sickerwasser, gewonnen wurden. In [14] und [16] wurde dagegen gezeigt, wie der Massen- und Impulseintrag durch den Sickerwasserzustrom bei diskontinuierlicher Rohrströmung auch bei Vollfüllung unter Umständen eine merkliche Veränderung des Widerstandsverhaltens herbeiführt.

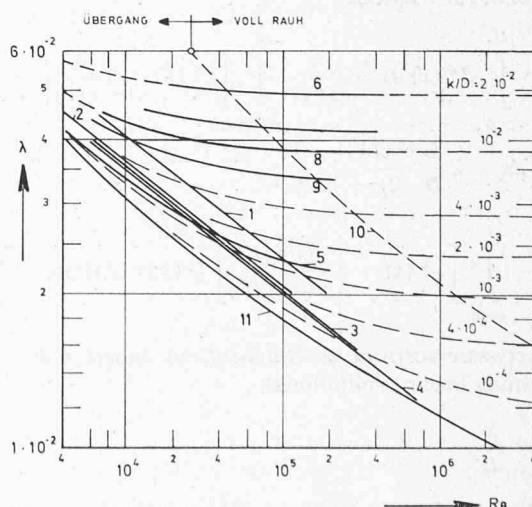


Bild 12. Widerstandsverhalten verschiedener Filterrohre
 1 Kunststoffdränrohr $D = 50$ mm 6 Betonfilterrohr $D = 100$ mm
 2 Kunststofffilterrohr $D = 100$ mm 7 dgl. $D = 150$ mm nach [10]
 3 dgl. $D = 200$ mm 8 dgl. $D = 200$ mm
 4 dgl. $D = 300$ mm 9 dgl. $D = 300$ mm
 5 Kunststofffilterrohr $D = 100$ mm 10 Moody-Grenze
 nach [11] 11 Glattkurve

ren kann. Diese Veränderung gegenüber der reinen Transportleitung wird nach den genannten Untersuchungen in einer Verlusterhöhung bestehen, die um so mehr in Erscheinung treten dürfte, je weniger homogen der Sickerwassereintritt ist. Insofern wird für das tatsächliche Widerstandsverhalten einer aus Filterrohren bestehenden Entwässerungsleitung nicht allein die äquivalente Rauhigkeit k der Rohrinnenfläche, also das Material, massgebend sein, sondern ebenso – vermutlich mit entgegengesetzter Wirkung (Perforation beim Kunststoffrohr statt gleichmäßig poröser Rohrmantel) auch die materialabhängige Fertigungstechnologie. Abgesehen von den wenig befriedigenden Aussagen von *Helmert* [16] zu dieser Frage, die überdies auch noch den entgegengesetzten Fall, die Absaugung durch die Filterrohrwand bei gleichzeitigem Längstransport, betreffen, liegen bis jetzt praktisch keine diesbezüglichen experimentellen Erfahrungen vor. Hier sind also dringend entsprechende Untersuchungen erforderlich, denn erst, wenn es gelingt, den Einfluss des Einsickers auf das Widerstandsverhalten der Filterrohrleitung zuverlässig nachzuweisen, kann ein wirklich exakter, nämlich alle Einflüsse berücksichtigender Vergleich der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Filterrohre durchgeführt werden. Somit ist die Gegenüberstellung der Widerstandskurven in Bild 12 vorerst noch als Provisorium anzusehen.

Inzwischen kann hier – wenigstens überschlägig – eine qualitative Studie zu diesem Thema durchgeführt werden, deren Ausgangspunkte die in [14] als Gl. (289) für poröse Rohre wiedergegebene modifizierte Darcy-Weisbach-Gleichung bildet. Danach gilt abschätzend bei gleichmäßig zusickerndem Wasser

$$J^* = \frac{\lambda^* + 8v_s/v}{D} \cdot \frac{v^2}{2g},$$

worin v_s = konst. die rechnerische Eintrittsgeschwindigkeit des Sickerwassers darstellt und v nunmehr vom Fliessweg x abhängig ist. Der λ^* -Index am Widerstandsbeiwert λ und beim Gefälle J soll deren v -Abhängigkeit, also die Veränderlichkeit mit dem Fliessweg, betonen.

Ein vergleichbarer Gesamtwiderstandsbeiwert muss nun von Fall zu Fall bestimmt werden, zweckmässigerweise dadurch, dass man mit der Leitungslänge L und der Fliessgeschwindigkeit $v(L)$ am Leitungsende $x = L$ für die Verlusthöhe h_v bzw. für λ ansetzt:

$$\begin{aligned} h_v &= \int_{x=0}^L J^*(x) dx = \frac{1}{2g D} \int_{x=0}^L \left[\lambda^*(x) + 8 \frac{v_s}{v(x)} \right] v^2(x) dx \\ &= \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2(L)}{2g}, \\ \lambda &= \frac{1}{L} \int_{x=0}^L \left[\lambda^*(x) + 8 \frac{v_s/v(L)}{v(x)/v(L)} \right] [v(x)/v(L)]^2 dx. \end{aligned}$$

Ist der Sickerwasserzstrom gleichmäßig, so ändert sich v längs der Leitung linear (Vollfüllung),

$$\frac{v(x)}{v(L)} = \frac{x}{L},$$

während λ^* entweder konstant ist (Betonfilterrohre, voll rauh) oder eine Änderung mit etwa $Re^{-1/4}$ erfährt, wenn man für Kunststoffrohre die zuvor erläuterte Saxenformel als Näherung hinzuzieht, so dass dann

$$\lambda^* = c_B \text{ bzw. } \lambda^* \approx c_K \left(\frac{x}{L} \right)^{-1/4}$$

angesetzt werden kann. Alle übrigen Größen unter dem Integral sind gegebene Konstanten, und die nun problemlose Integration ergibt in beiden Fällen einen Ausdruck nach Art von

$$\lambda = \lambda_0 + 4 v_s/v(L)$$

Hier entspricht λ_0 dem Widerstandsbeiwert des Längstransports allein, und es wird deutlich, dass der Sickerwasserzufluss eine Erhöhung bewirkt. Wie diese qualitativ ausfällt, kann ohne experimentelle Erkundigung nur abschätzend angegeben werden, wobei Unterschiede, die auf nichthomogene Einsickerung (z.B. durch Schlitze) zurückzuführen sind, wegen der vorausgesetzten Berechnungsannahmen nicht in Erscheinung treten.

Für λ^* lauten die Systemwerte c_B (Beton, voll rauh) und c_K (Kunststoff, Saxenformel) genügend genau:

$$c_B = 0,25 \left(\log \frac{k/D}{3,71} \right)^{-2}$$

$$c_K = 0,392 (k/D)^{0,02} Re_L^{-1/4}.$$

Hierin stellt $Re_L = v(L) \cdot D/v$ die Reynoldszahl am Filterrohrleitungsende bei $x = L$ dar, die nach Wahl der Rohrweite D durch den verlangten Bemessungsabfluss eine gegebene Ausgangsgröße ist.

Für den Grundanteil λ_0 am Gesamtwiderstandsbeiwert λ folgt aus dem zuvor aufgestellten Integral bei Betonvollfilterrohren

$$\lambda_0 = c_B/3 = 0,0833 \left(\log \frac{k/D}{3,71} \right)^{-2}$$

und bei Kunststoffrohren (voll perforiert)

$$\lambda_0 = 4 c_K/11 = 0,1425 (k/D)^{0,02} Re_L^{-1/4}.$$

Mit diesen Ausdrücken kann nun, um den Einfluss der Einsickerung zu untersuchen, unter Hinzuziehung der Kontinuitätsbedingung

$$Q = v(L) F = v_s UL,$$

wodurch (für ideal poröse Rohre) die Relation

$$v_s = v(L) \cdot D/UL$$

entsteht, für den Gesamtwiderstand der Leitung gebildet werden:

$$\lambda = \lambda_0 + D/L.$$

Erfolgt die Zusickerung dagegen durch Löcher oder Schlitze mit überhöhter Einsickerungsgeschwindigkeit, so wäre mit einem Loch- oder Porenanteil α am Rohrmantel,

$$\alpha = \frac{\sum F_{\text{Sickeröffnungen}}}{UL},$$

als Kontinuitätsbedingung für die Gesamtleitung anzusetzen:

$$Q = v(L) F = \alpha v_s UL$$

$$v_s = \frac{1}{\alpha} v(L) F/UL = \frac{1}{4\alpha} \frac{D}{L} v(L).$$

Damit entsteht als Abschätzung des Einflusses von unterschiedlichen Eintrittsgeschwindigkeiten zusickerndem Wasser für den Gesamtwiderstandsbeiwert:

$$\lambda = \lambda_0 + D/\alpha L.$$

Die relative Erhöhung des λ_0 -Wertes durch den Impulseintrag des zusickernden Wassers beträgt danach:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{D}{\alpha \lambda_0 L} = \frac{3}{\alpha c_B} \cdot \frac{D}{L} \text{ bzw. } \frac{11}{4\alpha c_K} \cdot \frac{D}{L}.$$

Diese Beziehung ist in Bild 13 dargestellt und lässt die Wirkung von λ deutlich erkennen. Danach ist für gelochte Rohre usw. ein grösserer Widerstandszuwachs infolge der Zusicherung zu erwarten als für Rohre, die dem ideal porösen Fall näher kommen. Die hier durchgeföhrte qualitative Untersuchung sollte daher unbedingt durch experimentelle Nachweise ergänzt werden. Ferner wurde sie durchgeföhr, um unterschiedliche Rohrarten miteinander zu vergleichen, nicht aber, um neue Überlegungen zur Dimensionierungsfrage zu unterbreiten.

Zusammenfassung

Die geschilderten experimentellen Erfahrungen mit Filterrohren aus den Werkstoffen Beton und Kunststoff haben ausser einigen wesentlichen Schlussfolgerungen für die hydraulische Dimensionierung auch interessante Vergleiche bezüglich der unterschiedlichen materialbedingten Eigenschaften ergeben.

Die diesbezüglichen Studien wurden im Blick auf die Bemessung von Anlagen zur Frostschutz- sowie zur Tiefenentwässerung durchgeföhr. Auf potentialtheoretischer Grundlage liess sich zeigen, dass die Bemessungsannahme eines scheitervollen Filterrohrs bezüglich der Ergiebigkeit gesicherte Ergebnisse liefert, weil sich bei Teifüllungszuständen (Grenzfall «leer») eine mindestens etwa 17% grössere Leistungsfähigkeit einstellt, wie auch experimentell belegt werden konnte. Für die Tiefenentwässerung wurde ein einfaches Bemessungsverfahren dargestellt, das im wesentlichen auf der Ermittlung der Spiegellinie des Sickerwasserstroms beruht. Die in dimensionsloser Form wiedergegebene Spiegellinie ermöglicht festzustellen, ob die Tiefenlage des Filterrohrs ausreicht, um mit hinreichender Sicherheit eine Absenkung des Wasserspiegels unter die Frostgrenze zu gewährleisten. Vergleiche bezüglich der hydraulisch wirksamen Rohrdurchmesser haben weiter ergeben, dass beim Betonfilterrohr in den weitaus meisten Anwendungsfällen nicht der Innen-, sondern der Aussendurchmesser als vergleichbare Rohrweite gegenüber dem dünnwandigen Kunststofffilterrohr massgebend ist. Daraus folgt für das Betonfilterrohr eine gewisse hydraulische Überlegenheit gegenüber dem Kunststofffilterrohr, die man freilich im Vergleich zu anderen Eigenschaften nicht überbewerten darf. Dies gilt letztlich z.B. auch beim Vergleich des Gewichts der beiden Rohrarten, dem die Deformierbarkeit genau umgekehrt gegenübersteht (vgl. diesbezügliche Erfahrungen in [18]). Bei der Bemessung von Filterrohren als Transportleitung, also als eigentliche Entwässerungsleitung, zeigen sich natürlich erhebliche Unterschiede infolge der unterschiedlichen Rohrmaterialien, die jedoch bei näherem Hinsehen nicht so stark ins Gewicht fallen, wie man zunächst vermutet.

Lässt man bei der Bemessung als reine Transportleitung den Sickerwasserzustrom ausser acht und berechnet die Leitung wie eine Druckrohrleitung, so wirken sich Unterschiede in der Rauigkeit der Rohrinnenwand relativ stark auf das Berechnungsergebnis aus, denn es liegen normalerweise Rauigkeitswerte vor, die sich bei Beton- und Kunststofffilterrohren um etwa eine Zehnerpotenz unterscheiden. Die Auswirkungen auf den Widerstandsbeiwert λ nach Prandtl-Colebrook sind allerdings um so geringer, je kleiner die Reynoldszahl des Strömungsvorganges ist. Diese Unterschiede zwischen Filterrohren aus den Materialien Beton und Kunststoff werden darüber hinaus aber noch weiter vermindert, wenn man berücksichtigt, dass Filterrohre als Entwässerungsleitung diskontinuierlich durchflossen werden, womit je nach Rohrart durch den Sickerwasserzustrom Querimpulse eingeleitet werden, die eine Widerstandserhöhung bewirken. Es konnte qualitativ dargestellt werden, dass diese Wider-

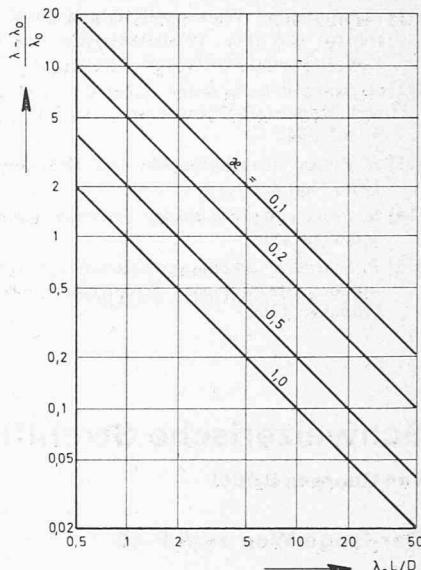


Bild 13. Einfluss des Sickeröffnungsanteils an der Rohrmantelfläche auf die Erhöhung des Längstransportwiderstands infolge des Sickerwassereintritts

standserhöhung bei Betonfilterrohren geringer ausfallen dürfte als bei Kunststofffilterrohren. Experimentelle Angaben hierzu liegen bislang leider nicht vor, man kann jedoch auch so schon feststellen, dass die grössere Rauigkeit des Betonfilterrohrs in der Gesamtheit des Strömungswiderstands, der sich aus Wandreibungseinfluss und Wirkung des Sickerwassereintritts zusammensetzt, nicht die Rolle spielt, die bei oberflächlicher Betrachtung meist unterstellt wird.

Literatur

- [1] Merkblatt für die Entwässerung von Strassen. Herausgegeben von der Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen e.V., Köln, Arbeitsgruppe Untergrund. [1a] Ausgabe 1974, [1b] Ausgabe 1971.
- [2] G. Graf und S. Zimmermann: 10 Jahre Raudril. Untersuchungen und Beobachtungen an Raudril-Rohren im Labor und in der Praxis. «REHAU-Mitteilungen» 14/1973, herausgegeben von der REHAU-Plastics GmbH, Rehau/Bay.
- [3] K. Jagersberger: Entwässerung und Filterrohre im Strassenbau. «Die Bauwirtschaft», Band 23, Juni 1969.
- [4] H. Lacher und K.J. Ueker: Untersuchung zur Ermittlung der Abflussleistung poröser Betonfilterrohre unter natürlichen Bedingungen. «Betonstein-Zeitung», 34. Jahrgang, Heft 11/1968, Seiten 563–567.
- [5] H. Stefan und J. Meyer: Untersuchung ebener Sickerströmung in heterogenem Untergrund mit Hilfe der elektrischen Analogie. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Berlin, Nr. 63 (1966).
- [6] H. Lacher und M.T. Monzavi: Einfluss von Teifüllungsgrad und von Wanddicke des porösen Rohrmantels auf die Ergiebigkeit von Betonfilterrohren. «Betonwerk und Fertigteil-Technik», Heft 2 (1972).
- [7] J. Kühn: Potentialströmung zu Filterrohren. Diplomarbeit am Institut für Hydraulik und Hydrologie der Techn. Hochschule Darmstadt (1973). Nicht veröffentlicht.
- [8] DIN 1185, Dränanweisung, Beuth-Vertrieb.
- [9] SNV 70125, Filtermaterial, Qualitätsvorschriften. Bearbeitet und herausgegeben von der Vereinigung Schweizerische Strassenfachmänner (VSS) (1960).
- [10] Bestimmung des Reibungsbeiwerts für Beton-Vollfilterrohre NW 150. Versuchsbericht Nr. 127/69 des Instituts für Hydraulik und Hydrologie, Darmstadt 1969. Nicht veröffentlicht.

- [11] Hydraulisches Widerstandsverhalten von Kunststoffsickerleitungsrohren NW 100. Versuchsbericht Nr. 164/73 des Instituts für Hydraulik und Hydrologie, Darmstadt 1973. Nicht veröffentlicht.
- [12] A. Saxon und H. Karge: Über die hydraulische Leistungsfähigkeit von Kunststoff-Dränrohren. «Die Wasserwirtschaft» 12 (1968) S. 362–364.
- [13] H. Eylers: Rohrhydraulik und Dränung. «Wasser und Boden» 1970, Heft 1, S. 1–4.
- [14] H. Press und R. Schröder: Hydromechanik im Wasserbau. Berlin/München 1966.
- [15] R. Schröder: Strömungsberechnungen im Bauwesen, Teil I. Stationäre Strömungen. Bauingenieur-Praxis, Heft 121, Berlin/München 1968.
- [16] F. Helmert: Die Rauigkeit poröser Betonrohre. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin 1961, Nr. 55, S. 37–46.
- [17] R. Eggelmann: Dränanleitung. Verlag Wasser und Boden, Hamburg 1973.
- [18] J. Honing: Erfahrungen mit PVC-Rohren in Holland. «Beton» 23 (1973), Heft 6, S. 267–271.
- [19] A. Neuburger: Die Technik des Altertums, 2. Aufl., S. 463ff. Römische Straßen bei Hedderheim. Voigtländer, Leipzig 1920.

Adresse der Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Hannes Lacher, D-6101 Rossdorf bei Darmstadt, Hundsrückstr. 7, und Prof. Dr.-Ing. Ralph C. M. Schröder, D-6101 Seeheim 1, Im Weingarten 27b.

Schweizerische Strahlflugzeuge und Strahltriebwerke

DK 629.13:621.438.2

Von Georges Bridel

Fortsetzung von H. 12, 1976, S. 142

Der lange Weg zum P-16

Die Flugzeuge P-12 und P-13

Ein Vorschlag aus Emmen sah vor, dass vom F+W die zukunftsträchtige Lösung N-20 und von der Privatindustrie die einfacheren Typen der Art N-10 bzw. N-11 entwickelt werden sollten. Der Zeitbedarf war richtig vorausgesehen: Man war sich bewusst, dass die Entwicklung des N-20 einiges an Aufwand bringen würde; um so mehr wurde die rasch zu verwirklichende Lösung N-10 sowie die weiterentwickelte Ausführung N-11 auf der Grundlage von unmittelbar verfügbaren (Nene) bzw. von selbst herstellbaren (EW) Triebwerken vorangetrieben.

Am 17. August 1946 wurden gemäss der Übereinkunft vom 8. August die konstruktionsreifen Unterlagen der N-10 und N-11 an die Dornier-Werke zur weiteren Bearbeitung übergeben. Allerdings hatte Dornier einige Bedenken und behielt sich vor, allenfalls die zweimotorige Entwicklung P-25 vorzuschlagen. In der Folge wurden die Arbeiten an den Projekten N-10 und N-11 vorläufig nicht weitergeführt, obwohl in Emmen noch Windkanalversuche unternommen wurden. Der Typ N-10 mit dem unmittelbar verfügbaren Nene-Triebwerk wurde überhaupt nicht mehr weitergeführt.

Erst am 15. Februar 1947, aufgrund eines Auftrages der KMF vom November 1946, wurden die Arbeiten am eindüsigen Flugzeug N-11 wieder in Angriff genommen. Für den Antrieb konnte nur das Triebwerkprojekt von Escher-Wyss vorgesehen werden, da Triebwerke dieser Grösseordnung im Ausland noch nicht verfügbar waren.

Der aus dem Flugzeugwerk Emmen stammende Urentwurf des N-11 wurde in Altenrhein unter der Leitung von Dr. Studer und Dr. Pfenninger in verschiedener Beziehung abgeändert und erhielt die Bezeichnung P-12. In erster Linie wurde das Seitenverhältnis des N-11 von 3 auf 4,75 beim P-12.05 (Bild 39) erhöht. Man versprach sich davon bessere Steig- und Kurvenleistungen. Der mittlere Pfeilwinkel des N-11 von 35° wurde beibehalten. Auf den negativ gepfeilten Flügel der Art P-25 wurde wegen der verhältnismässig hohen installierten Leistung verzichtet (Auskipp-Gefahr).

Die optimale Tragflügel-Konfiguration und die Anordnung der Klappen wurden im Kleinwindkanal von Altenrhein ermittelt. Die Landehilfen wurden wie beim P-25 über die gesamte Spannweite angeordnet. Es handelte sich um eine Art Spaltwölbungsklappen, die im Aussenteil des Flügels als Querruder ausgebildet waren, und die im Langsamflug gesamthaft abgesenkt werden konnten. Im Schnellflug waren die inneren Hinterklappen auch als Querruder vorgesehen. Die für das grössere Seitenverhältnis als unumgänglich erachteten Nasenklappen konnten translatorisch in Flugrichtung nach vorne ausgefahren werden. Sehr interessant war die Möglichkeit,

diese Klappen in beliebiger Zwischenstellung als Manövilstütze im Luftkampf zu verwenden. Erst kürzlich wurde diese Idee an verschiedenen Jagdflugzeugen wieder aufgegriffen.

Um das Fahrwerksgewicht möglichst klein zu halten und um für den Luftpfeintritt günstige Bedingungen zu schaffen wurde das Tragwerk als Knickflügel in Tiefdeckeranordnung vorgesehen. Damit konnte aber der von der Grundlagenkommission geforderte Wechselsatz nicht mehr ausgeführt werden. Indessen wurden diese Abweichungen mit der entsprechenden Herabsetzung der zulässigen Geschwindigkeit (Aussenbewaffnung) von der Abteilung für Flugwesen und Fliegerabwehr gutgeheissen.

Der Aufbau des P-12.05 war in Halbschalensbauweise und selbstverständlich in Ganzmetall vorgesehen. Der Brennstoffvorrat umfasste insgesamt 2240 l, er war in 8 Tankräumen im Flügel und in einem Rumpftank untergebracht. Als Fördersystem war, wie beim N-20, eine kombinierte Quellenpumpe-Überdruckanlage vorgesehen. Die gesamte Steuerung wurde als Stangensteuerung ausgebildet, wobei die Betätigung gemischt hydraulisch und mechanisch erfolgte. Das freitragende V-Leitwerk konnte im Mittelteil hydraulisch getrimmt werden und die Kupplung von Seiten- und Höhensteuerung erfolgte über eine Hebelwaage, welche eine Überlagerung der beiden Steuerkreise ermöglichte.

Das eigentliche Ruder war mit einem aerodynamischen Kraftausgleich versehen. Der Rumpfvorderteil samt Fahrwerk wurde von der früheren N-20-Ausführung übernommen. Das Fahrwerk konnte nicht mit Zwillingsrädern ausgerüstet werden, weil der entsprechende Raum im Flügel fehlte. Die Betätigung des Fahrwerks erfolgte hydraulisch.

Als Antrieb wurde ein Zweistromtriebwerkprojekt der Firma Escher-Wyss mit Nebenstromverbrennung vorgesehen. Weil Zweistromtriebwerke dieser Bauart grosse Variationen in der Austrittstemperatur aufweisen, war es notwendig, den

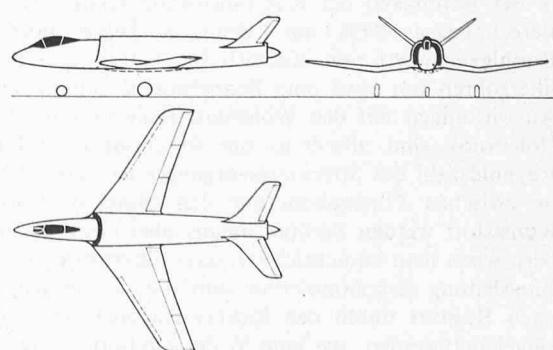


Bild 39. P-12.05, Vorprojekt Juli 1947. Massstab 1:400