

Hängender (Abb. 8) werden in Bremen in der Hauptsache benutzt, wenn Kraftübertragungen auf Kais erfolgen müssen bei streichenden Schiffen, wie z. B. an der Einfahrt der Oslebshäuser Schleuse. Diese Konstruktion ist etwas hart.

Reibehölzer werden in Bremen angewandt, wenn der Kai in aufgelöster oder nicht ebener Konstruktion errichtet ist, wie z. B. Überseehafen, Südseite des Holz- und Fabrikenhafens und auch Pier A der Getreideanlage. Reibehölzer müssen, wenn die von ihnen geschützte Konstruktion zu schwach ist, Teile eines Pfahlbündels einer Dalbe werden, wie z. B. Pier B der Getreideanlage. Es ist auch üblich, an Dalben Reibehölzer anzubringen, wenn eine starke Beanspruchung der Dalben beim Längsverholen von Schiffen zu erwarten ist. Der Abstand der Reibehölzer ist von der Größe der vorliegenden Schiffe und somit von der Wassertiefe abhängig.

Abteilung II — Frage 2

Zweiter Bericht

Unterschiede der Verteilung von Trossenzügen bei zentrischem und exzentrischem Kraftangriff auf die einzelnen Pfähle verdrehbarer und verdrehfester stählerner Bündeldalben.

Von F. Müller, Regierungsbaurat
bei der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Kiel

Zusammenfassung: Die zur Zeit neuartigste Ausbildung des beweglichen Stahldalbens als verdrehfester Bündeldalben hatte die deutsche Wasser- und Schifffahrtsverwaltung veranlaßt, im Binnenhafen Holtenau des Nord-Ostsee-Kanals Großversuche an fünf verschiedenen neuzeitlichen beweglichen Stahldalben auszuführen, um die theoretischen Vorteile des verdrehfesten Dalbens praktisch zu überprüfen. Zur Untersuchung gelangten zwei torsionsfreie Dalben, der eine nach System Mannesmann, der andere nach System Wedekind verholmt, ferner ein verdrehfester Bündeldalben nach System Minnich sowie zwei holzverzimmerte Bündeldalben. Die Versuche zeigten, daß ein verdrehfester Dalben dem torsionslosen Dalben insofern um 50% überlegen ist, als beim torsionslosen Dalben bei exzentrischer Beanspruchung nur $\frac{2}{3}$ seines Arbeitsvermögens bei zentrischer Beanspruchung ausgenutzt werden können, während beim verdrehfesten Dalben bei exzentrischer Beanspruchung nahezu kein Verlust an Arbeitsvermögen eintritt. Die durch die verdrehfeste Ausbildung der Verholmung in den Pfählen zufolge Torsion entstehenden Schubspannungen sind unmaßgeblich, sie setzen die zulässige Spannung etwa um $\frac{1}{2}\%$ herab. Diese Spannungen sind geringer, als sie sich rechnerisch ergeben. — Der Gang der Versuche und die Auswertung werden eingehend beschrieben, das Ergebnis wird durch Diagramme und schematische Darstellungen belegt. Eine für die Auswertung herangezogene geometrische Eigenschaft der Biegelinie wird behandelt.

- Gliederung:
1. Vorwort.
 2. Einführung, Veranlassung und Inhalt der Versuche.
 3. Die Versuchsobjekte.
 4. Beschreibung der Versuche.
 5. Ergebnis der Durchbiegungsmessung.
 6. Ergebnis der Schubspannungsmessung zufolge Verdrillung.

1. Vorwort.

Das Thema wird auf Grund von Versuchen an verschiedenen Stahldalben behandelt, welche das Wasserbauamt Kiel-Holtenau im Sommer 1952 im Nordostseekanal durchgeführt hat. Es klärt die Frage: wie verdrehfester Dalben — wie verdrehbarer Dalben, eine Kernfrage der jüngsten Entwicklung der beweglichen stählernen Bündeldalben.

2. Einführung, Veranlassung und Inhalt der Versuche.

Ein Bündeldalben ist durch die Vermeidung von Zugkräften in seinen Pfählen (keine Bockwirkung) und vom Auftreten einer Rahmenwirkung zwischen Verholmung und Pfählen (Starrheit) charakterisiert.

Die Aufgabe eines Dalbens besteht in der Aufnahme von Trossenzügen (Festmachen und Verholen) und im Abweisen bzw. Aushalten von Schiffsstößen. In beiden Fällen leistet er durch elastische Verformung Arbeit. Bei der Aufnahme von Schiffsstößen wird ein Teil der dem bewegten Schiffskörper innewohnenden Wucht in der ersten Phase der Verformung (Stoßaufnahme) übernommen (nicht vernichtet) und in der zweiten (Stoßrückgabe) wieder voll zurückgegeben. Richtung und Größe der Schiffsgeschwindigkeit ändern sich.

Die vom Dalben bei der Stoßaufnahme zu leistende Arbeit wird von seinem Arbeitsvermögen (Wuchtaufnahmevermögen) begrenzt. An der Arbeitsaufnahme beteiligen sich alle Pfähle. Die Summe der Arbeitsvermögen der einzelnen Pfähle kann aber nur dann als Arbeitsvermögen des Dalbens bezeichnet werden, wenn alle Pfähle gleichmäßig an der Arbeitsleistung beteiligt waren, d. h. wenn sie gleichzeitig an der Grenze ihres Kraftaufnahmevermögens angelangt waren, also sich gleichmäßig durchgebogen haben. Die Gleichmäßigkeit der Durchbiegungen der Einzelpfähle bestimmt somit den Wert eines Dalbens.

Die gleichmäßige Einzelpfahl-Durchbiegung beweglicher Bündeldalben ist zwar ziemlich gut bei jeder Verholmungsart erfüllt, wenn der Dalben zentrisch beansprucht wird. Dieser Fall ist bei Schiffsstößen der seltenste. Bei den maßgebenden exzentrischen Schiffsstößen wird die Gleichmäßigkeit der Durchbiegungen nur dann eintreten, wenn keine Verdrehung der Dalbenverholmung erfolgen kann. Diese wird nur dann verhindert, wenn ihr der Verdrehungswiderstand der Pfähle (zumindestens eines Pfahles) entgegenwirkt, und das ist nur der Fall, wenn die relative Lage der Pfahlquerschnitte (zumindest eines Pfahlquerschnittes) zur Verholmung unveränderlich ist. Alle Dalben, welche dies erzielen, werden unter dem Namen verdrehfeste Dalben zusammengefaßt, bzw. irreführend (denn sie drehen sich nicht) als Torsions-Dalben bezeichnet. Genau gesagt setzen sie die Verdrehbarkeit des Dalbens auf das durch den Torsionswiderstand der Pfähle begrenzte minimale Maß herab.

Bei allen Dalben, bei denen die Pfähle bei einer Drehung der Verholmung nicht mitgedreht werden, wird die Dalbenverdrehung und mit ihr die Ungleichmäßigkeit der Einzelpfahldurchbiegungen auftreten. Bei diesen verdrehbaren und irreführend als torsionsfrei bezeichneten Dalben (denn gerade sie drehen sich) wird die Summe der von den Einzelpfählen geleisteten Arbeit nicht die Summe ihrer Arbeitsvermögen erreichen können. Das Arbeitsvermögen des Dalbens wird bei ihnen durch die Erreichung des Arbeitsvermögens des am meisten durchgebogenen Pfahles bestimmt, es sinkt daher und mit ihm der Wert des Dalbens.

Wie groß diese Wertabminderung, gemessen an der Einbuße an Arbeitsvermögen ist, läßt sich nicht einwandfrei berechnen. Versuche, es zu tun, müssen

daneben greifen, denn — horizontal betrachtet — bildet die Verholmung eine mehrfach auf elastischen Auflagern (biegsame Pfähle) gestützte Scheibe von hoher statischer Unbestimmtheit, bei der die Auflagerbedingungen kaum erfassbar sind. Aber Modellversuche, welche bei verdrehbaren Dalben die Ungleichheit der Durchbiegungen bewiesen haben, liefern noch keine ausreichende Grundlage für die Abschätzung der Wertabminderung, da sie die elastische Einspannung durch feste Einspannung ersetzen. Modellversuche an verdrehfestem Dalben, welche deren gleichmäßige Durchbiegung beweisen sollen, haben nicht nur den gleichen Mangel, sie spiegeln überdies schlecht die wirkliche Wirkung der Verholmungsmittel, vermittels welcher die Verdrehfestigkeit erzeugt wird.

Insbesondere von Minnich angestellte Berechnungen und Modelle ließen erwarten, daß die Wertabminderung verdrehbarer Dalben groß ist und nicht übersehen werden darf. Aus diesem Grund entschloß sich die deutsche Wasser- und Schifffahrtsverwaltung zum Großversuch an verdrehbaren und verdrehfesten Gebrauchsdalben.

Noch ein zweiter Grund erhob sich. Man war zum Gedanken des verdrehfesten Dalbens ursprünglich auf dem indirekten Wege gekommen, neben der Durchbiegungsverformung der Pfähle auch deren Verdrehungsverformung am Arbeitsvermögen teilnehmen zu lassen, weil man erhebliche Formänderungsarbeiten zufolge Pfahltorsion irrtümlicherweise vermutete, und dadurch erhebliche Schubspannungen zufolge Torsion. In letzteren sahen Gegner des verdrehfesten Dalbens eine willkommene Gefahr, und es war naheliegend zu befürchten, diese Schubspannungen könnten im Verein mit den Biegespannungen derartig hohe Vergleichsspannungen erzeugen, daß letztere das Arbeitsvermögen so herabdrücken, daß der Vorteil des verdrehfesten Dalbens (Vermeidung einer Einbuße an Arbeitsvermögen) illusorisch wird. Wohl läßt sich als Grundlage für die Schubspannungsberechnung die Verdrillung berechnen, aber die relative Dünnwandigkeit der Stahlrampfpfähle läßt diesen Berechnungswegen nicht unbedingt trauen.

So erweiterte sich das Ziel der Versuche (die möglichst exakte Durchbiegungsmessung) auf eine halbwegs vernünftige Verdrillungsmessung. Während die Durchbiegungsmessung der Exaktheit zugänglich war, mußte sich die Verdrillungsmessung auf primitive und improvisierte Meßanlagen beschränken. Wegen dieser Unvollkommenheit wird sie besonders kritisch ausgewertet werden müssen.

Die deutsche Wasser- und Schifffahrtsverwaltung verwendet schon seit über zwei Jahrzehnten Stahldalben. Von Anfängen mit nicht befriedigenden starren Dalben ist sie, nach dem Kriege durch den Holzangel zu verstärktem Zugriff zum Stahl gezwungen, in der Seeschifffahrt zu Neukonstruktionen gelangt, bei denen sie im Sinne der zu spät gewürdigten Gedankengänge von Dr. Blum aus dem Jahre 1932 die beweglich verholmten Bündeldalben bevorzugt. Infolge des höheren Arbeitsvermögens, der größeren Wirtschaftlichkeit und der weitaus größeren Weichheit gewinnen die beweglichen Stahldalben seither im Nordostseekanal und in deutschen Seehäfen mehr und mehr Boden. Der ursprünglich skeptische Seemann hat den Stahldalben insbesondere wegen seiner Weichheit wohlwollend aufgenommen.

Nachdem im Binnenhafen Holtenau (Ostseeschleusen des Nordostseekanals) in einer Versuchsdalbenreihe auch der erste verdrehfeste Bündeldalben nach Konstruktionsvorschlägen Minnichs errichtet worden war, konnte zum Versuch

geschritten werden. Eine von den Mannesmann-Werken inzwischen entwickelte Lösungsmöglichkeit des verdrehfesten Dalbens, die sich nicht der verdrehfesten Verbindung aller Pfähle mit der Verholmung bedient und inzwischen mehrfach im Hamburger Hafen und auch in Holtenau verwendet wird, konnte nicht mehr mit untersucht werden.

Es wird vielerorts an Vorschlägen verdrehfester Dalben gearbeitet; die Kunst ist dabei, durch die verdrehfeste Ausgestaltung der Beweglichkeit des Dalbens keinen Abbruch zu tun. Unter Beweglichkeit wird bei Dalben eine solche Gelenkigkeit der Verbindung zwischen Verholmung und Pfahl verstanden, die es mit sich bringt, daß bei Durchbiegung der Pfähle die Verholmung sich in vertikaler Richtung völlig einspannungslos zu sich selbst verschiebt, also sich — im Gegensatz zu den Pfählen — nicht neigt. Details der Verholmungselemente sind beim verdrehfesten Dalben entscheidender für das wirkliche Zutreffen der Verdrehfestigkeit als der allgemeine Konstruktionsgedanke. Nach einem solchen allein die Verdrehfestigkeit zu beurteilen, kann leicht zu Fehlurteilen führen.

3. Die Versuchsobjekte.

Es wurden fünf verschiedene Dalben untersucht. Alle waren sechspfählig, einholmig, hatten 18,5 m Pfahllänge, 7,5 m Rammtiefe, ragten 2 m über Wasser und besaßen ungefähr das gleiche Arbeitsvermögen von rd. 10 t/m bei zentrischer Beanspruchung. Dalben I bestand aus Mannesmann-Rohren 470/11, Dalben II, III und V aus KP 24, Dalben IV war gemischtpfählig (drei UP 2 und drei KP 24). Dalben III, als vollkommen beweglicher und vollkommen verdrehfester Dalben, war der eigentliche Gegenspieler des vollkommen beweglichen und verdrehbaren Dalben I. Dalben II erhob als vollkommen beweglicher Dalben keinen Anspruch auf Verdrehfestigkeit, besaß sie aber teilweise. Dalben IV und V bildeten die ungleichpfählige und gleichpfählige Abwandlung eines holzverzimmerten Dalbens ohne Verdrehfestigkeits- und vollen Beweglichkeitsanspruch. Die Tabelle I gibt Auskunft über die Haupteigenschaften der Dalben.

Die Abbildungen 1 bis 3 zeigen schematisch das Wesentliche der Verholmungsunterschiede.

Dalben I. 6 nahtlose Mannesmann-Röhre ϕ 470 mm, Wandstärke 11 mm, in Fünfeckanordnung mit Königspfahl in der Mitte. Vollkommen bewegliche, vollkommen verdrehbare Verholmung nach System Mannesmann. Die Wirkung der Verholmung ist einfach. Nicht eingezeichnete, an den Pfählen und an der Unterseite der Hohl-scheibe angeschweißte Mitnehmewinkel sichern zusätzlich gegen seitliches Herausziehen, ohne eine teilweise Verdrehfestigkeit zu bewirken. Die Spielräume gewährleisten volle Beweglichkeit. Die Verholmungsscheibe ruht auf einer nicht eingezeichneten, am Königspfahl angeschweißten Ringkonsole und ist gegen Abheben durch nicht eingezeichnete Gegenkonsolen an den Außenpfählen oberhalb der Scheibe gesichert. Neben letzteren an der Scheibe angebrachte abgeschrägte Abweisbleche verhindern Trossenverklemmungen zwischen Scheibe und Pfahl. Diese Bleche wurden beim Versuch entfernt, da sie geringfügig eine Verdrehfestigkeit bewirken könnten.

Dalben II. Sechs Pfähle KP 24, Wandstärke 10 mm im Fünfeck mit Königspfahl in der Mitte. Verholmung nach System Wedekind vollkommen beweglich mittels kreisförmiger, 25 mm starker, unten durch nicht eingezeichnete Rippen verstärkter Stahlplatte. In einer Richtung (normal zur Dalbenreihe) sind die Spielräume in den Ausnehmungen der Platte so abgestuft, daß bei Stoß in dieser

Tabelle I

Dalben Nr.	L	t	B	h	Haupteigenschaften der Dalben											
					für den Einzelpfahl								für den Dalben			
													b. 20 t	b. Erreich. d. Strgr. $\sigma=3600 \text{ kg/cm}^2$		
					b_{\min}	b_{\max}	W_{\max}	W_{\min}	J_{\max}	J_{\min}	F	G	d_s	P_{Str}	d_s	A
m	m	m	m	cm	cm	cm^3	cm^3	cm^4	cm^4	cm^2	kg/m	cm	t	cm	tm	
I	18,50	7,56	2,10	10,64	47,0	47,0	1 779	1 779	41 796	—	159	125	34,3	31,5	60,5	9,547
II	18,50	7,44	2,06	10,76	47,6	51,5	1 875	1 756	44 614	—	164	130	31,9	32,7	60,7	9,924
III	18,50	7,83	2,36	10,37	47,6	51,5	1 875	1 756	44 614	—	164	130	31,9	32,7	60,7	9,924
IV KP 24					47,6	—	1 875	—	44 614	—	164	130				
(L) UP 2	18,50	7,71	1,15	10,49	36,9	—	—	1 960	43 650	—	197	155	31,9	32,5	60,7	9,879
IV KP 24					47,6	—	1 875	—	44 614	—	164	130				
(Q) UP 2	18,50	7,71	2,00	10,49	—	44,6	2 240	—	—	41 300	197	155	31,9	32,5	60,7	9,879
V (L)	18,50	7,42	1,25	10,78	47,6	—	1 875	—	44 614	—	164	130	31,9	33,6	60,7	10,198
V (Q)	18,50	7,42	2,00	10,78	47,6	—	1 875	—	44 614	—	164	130	31,9	33,6	60,7	10,198

Es bedeuten:

L... Pfahlänge; t... vorhandene Rammtiefe; B... größte Dalbenbreite; h... Höhe des Kraftangriffes über Sohle; b_{\min} ... kleinste Pfahlbreite; b_{\max} ... größte Pfahlbreite; d_s ... nach Blum berechnete Soll-Durchbiegung auf Grundlage Pfahl; P_{Str} ... Dalbenzugkraft

bei gleichzeitiger Erreichung der Streckgrenze in allen Pfählen; A... Arbeitsvermögen des Dalbens bei gleichzeitiger Erreichung der Streckgrenze in allen Pfählen; (L)... bei Zug in Längsrichtung; (Q)... bei Zug in Querrichtung.

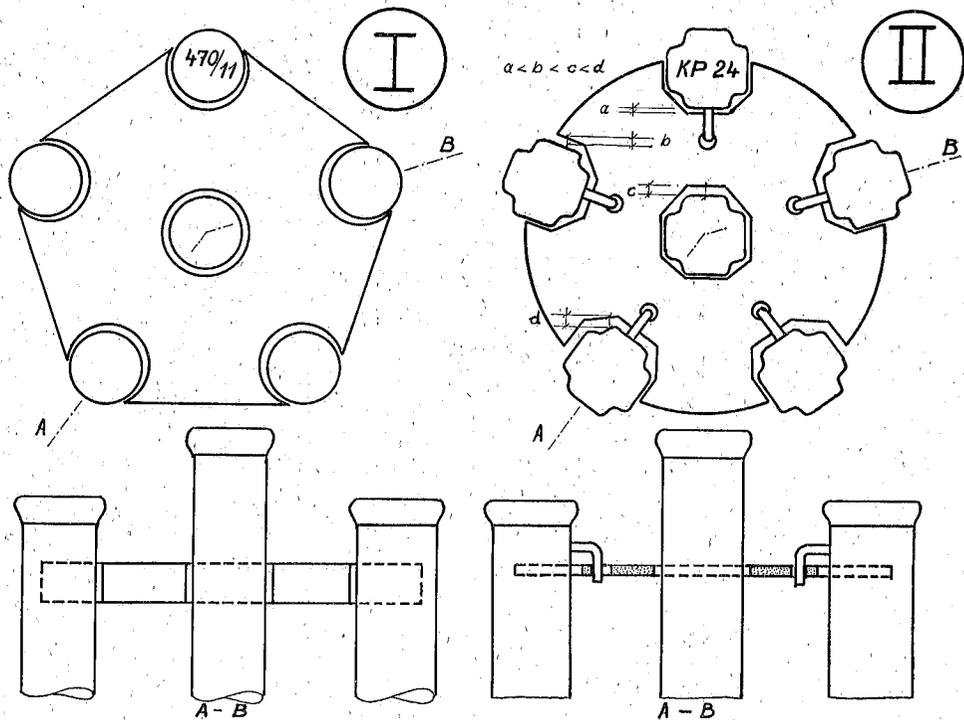


Abb. 1. Links Mannesmann-Verholmung, rechts Wedekind-Verholmung.

Richtung die Pfähle zeitlich nacheinander zur Berührung mit der Platte kommen. Dadurch entsteht bei Stoßbeginn eine allerdings nur anfängliche und sehr geringe Erhöhung der Weichheit, weshalb der Erfinder dem Dalben den Namen »Federdalben« gegeben hat. Ebenso gering wie die Federwirkung ist auch der Verlust an Arbeitsvermögen, der durch die Nichtausnutzung des vollen Arbeitsvermögens der Pfähle mit dem größten Spielraum entsteht. Das seitliche Herausziehen der Außenpfähle ist durch gebogene, an den Pfählen oberhalb der Platte angeschweißte starke Bolzen verhindert, welche lose durch Löcher in der Platte in Konsolen eingreifen, die unterhalb der Platte an den Pfählen angeschweißt sind und auf denen die Platte ruht. Diese Löcher wurden vor dem Versuch erweitert,

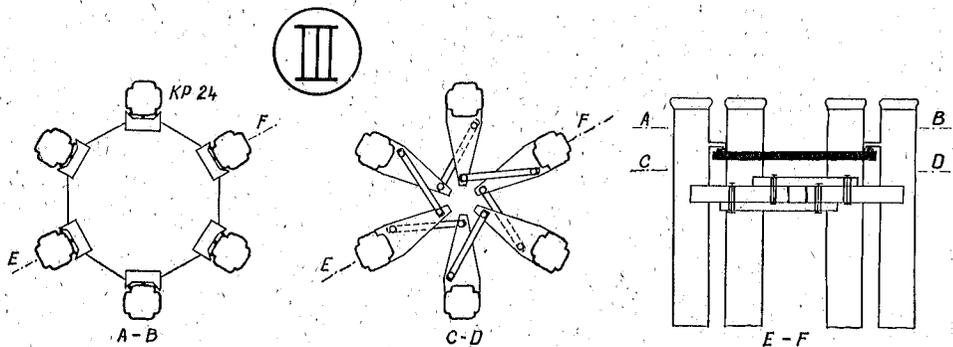


Abb. 2. Minnich-Verholmung.

um eine unbeabsichtigte Verdrehfestigkeitswirkung zu verhindern. Nichts desto weniger kommt eine solche bei stärkerer Verdrehung der Verholmung in deren Ausnehmungen zustande, so daß der Dalben als (unbeabsichtigt) teilweise verdrehfest angesprochen werden muß.

Dalben III. Sechs Pfähle KP 24 in Sechseckanordnung. Die Verholmung nach System Minnich ist vollkommen beweglich und arbeitet in zwei Wirkungsebenen. In der oberen (Schnitt A-B) erfolgt vermittels der vor jedem Pfahl an eine unten versteifte Platte angeschweißten starken Bleche eine exakte dreipunktige Berührung zwischen Verholmung und Pfahl. Die Punktberührung wird durch angeschweißte halbrunde Nocken erzielt. In der unteren Wirkungsebene (Schnitt C-D) spielt sich die eigentliche Übertragung der Verholmungsverdrehung auf die Pfähle — also die Verdrehungsverhinderung — ab. An die Pfähle

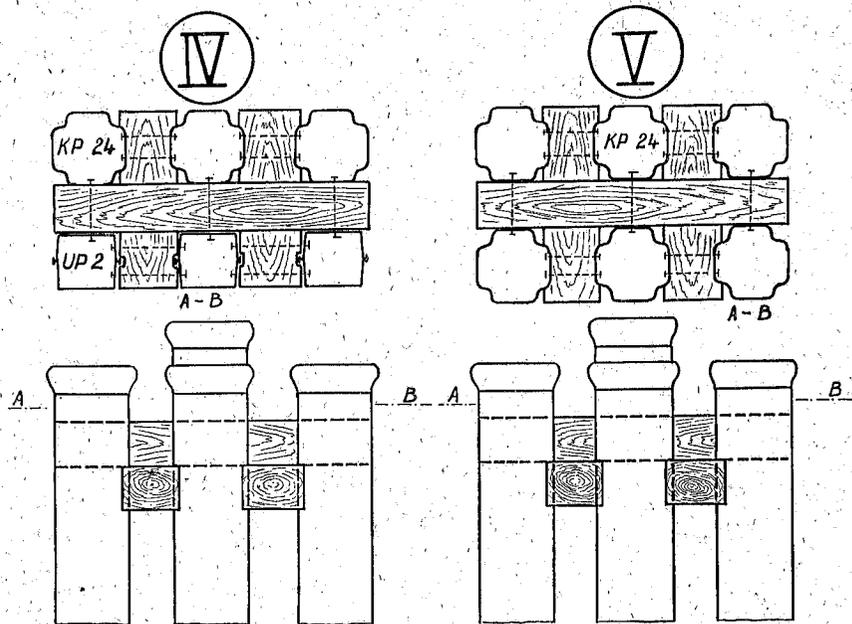


Abb. 3. Holzverzimierung, links ungleichpfählig, rechts gleichpfählig.

angeschweißte Arme sind jeder mit seinen beiden Nachbaramen durch je einen Gelenkstab verbunden. Zur Erhaltung der Beweglichkeit gestattet die Ausbildung der vertikalen Gelenke der Gelenkstäbe eine geringe gegenseitige Neigungsänderung der Arme, denn diese weichen bei der Pfahldurchbiegung zufolge der starren Verbindung mit den Pfählen von der ursprünglichen horizontalen Lage aus. Kinematisch gesehen, würde bereits die untere Wirkungsebene die Verdrehfestigkeit bewirken, aber erst das Zusammenspiel mit der oberen gibt die Gewähr für die volle Erfüllung der Auflagerbedingungen, von denen in erster Linie eine wirkliche Verdrehfestigkeit abhängt. Die obere Platte ruht auf Konsolen an den Pfählen. Gegenkonsolen, die in oben an der Platte angebrachte Bolzen greifen, verhindern das seitliche Herausziehen der Pfähle. Der Erfinder Minnich verfügt über wesentlich einfachere Lösungen, die vorliegende wurde von ihm entwickelt, da die Forderung gestellt war, daß der Dalben kreisrund und außen völlig glatt sein soll.

Dalben IV und V. Dalben V gleichpfählig aus sechs KP 24, Dalben IV ungleichpfählig aus drei KP 24 und drei UP 2, Verholmung mittels Holzverzimmerung. Untereinander nicht verbolzte kräftige Eichenbalken werden durch Verbolzung mit den Pfählen fest an diese angepreßt. Beide Dalben tragen den Charakter der Starrheit, soweit das Nachgeben des Holzes ihnen diese Eigenschaft nicht abnimmt. Die Starrheit in der Längsrichtung überwiegt jene in der Querrichtung. Durch die Holzzerstörung zufolge Beanspruchung des Dalbens wird die Holzverzimmerung mit der Zeit an Beweglichkeit gewinnen. Beide Dalben besitzen aber auch insoweit verdrehfesten Charakter, als die Vollflächigkeit der Pressung zwischen Holz und Pfahl hierzu langt bzw. erhalten bleibt. Mit der Kantennutzung der Hölzer wird die Verdrehfestigkeit mit der Zeit abnehmen. Beim Dalben IV wird zufolge des geringeren Arbeitsvermögens der KP 24-Pfähle das größere der UP 2-Pfähle nicht ausgenutzt.

4. Beschreibung der Versuche.

Eine durch Handwinde erzeugte und durch Flaschenzug verstärkte horizontale Trossenkraft wurde an alle Dalben in stetiger Steigerung bis 20 t einmal zentrisch (bzw. möglichst zentrisch) und einmal möglichst exzentrisch in Verholmungshöhe angesetzt und in Stufen von 2 zu 2 t mit Dynamometern gemessen. Bei den Dalben IV und V geschah dies in Längs- und Querrichtung. In allen Kraftstufen wurde die Bewegung jedes einzelnen Pfahles durch optische Messung der Bewegungskomponenten zweier Richtungen beobachtet. Dies geschah vermittels zweier Theodoliten, deren Zielrichtungen aufeinander normal standen, wobei die Ablesung an horizontalen Nivellierlatten erfolgte, welche in zwei Gruppen von je sechs Stück jeweils normal zu den Zielrichtungen starr an den sechs Pfählen des Dalbens befestigt waren und seitwärts aus ihm herausragten. Die Resultierende beider Bewegungen ergab für jeden Pfahl Größe und Richtung seiner Einzeldurchbiegung. Auf rechnerischem Wege und durch geometrische Kontrolle wurde aus der Neulage der Pfähle die Verdrehung des Dalbens gefunden.

In zeitlicher Übereinstimmung mit der Bewegungsmessung erfolgte im Inneren der wasserfrei gehaltenen Pfähle etwas über Sohle (also im geradlinigen Bereich des Momentenverlaufes) in zwei zueinander normal stehenden Vertikalebene die Dehnungsmessung zufolge Biegung, welche die Biegungsspannung lieferte. Dies geschah unter Verwendung der sogenannten Ritz-Dehnungs-Messer von Prof. Ebner, Hamburg, welche ohne Übertragung, in natürlicher Größe vermittels Diamantschreibes auf rotierenden Glaszylindern arbeiten und durch Mikroskopablesungen eine Spannungsermittlung mit der Genauigkeit von 10 kg/cm^2 gestatten. Aus den Biegespannungen in zwei Richtungen konnten zwei Komponenten der auf den Einzelpfahl entfallenden Kraft, somit deren Größe und Richtung errechnet werden. Kontrolle dafür bot nicht nur das Gleichgewicht mit der Zugkraft, die Einzelkräfte waren auch durch Hinzuziehung von Kraft-Durchbiegungskurven prüfbar, welche für die gleichen Pfahlprofile als Ergebnisse aus den Flemhuder Pfahlversuchen 1951 zur Verfügung standen. Mit der Kenntnis von Kraft und Durchbiegung jedes Einzelpfahles war die Kenntnis der von jedem Pfahl geleisteten Einzelarbeit gegeben.

Beim verdrehfesten Dalben III wurde überdies die Verdrillung eines Einzelpfahles bestimmt durch Messung der horizontalen Verschiebung zweier zugeordneten Mantellinienpunkte an den Enden einer Mantellinie von 60 cm Meßlänge vermittels Tastuhren mit der Genauigkeit von $1/100 \text{ mm}$. Die Beschreibung dieser primitiven Verdrehungsmessung wird im Hinblick darauf, daß Verdrillungs-

200

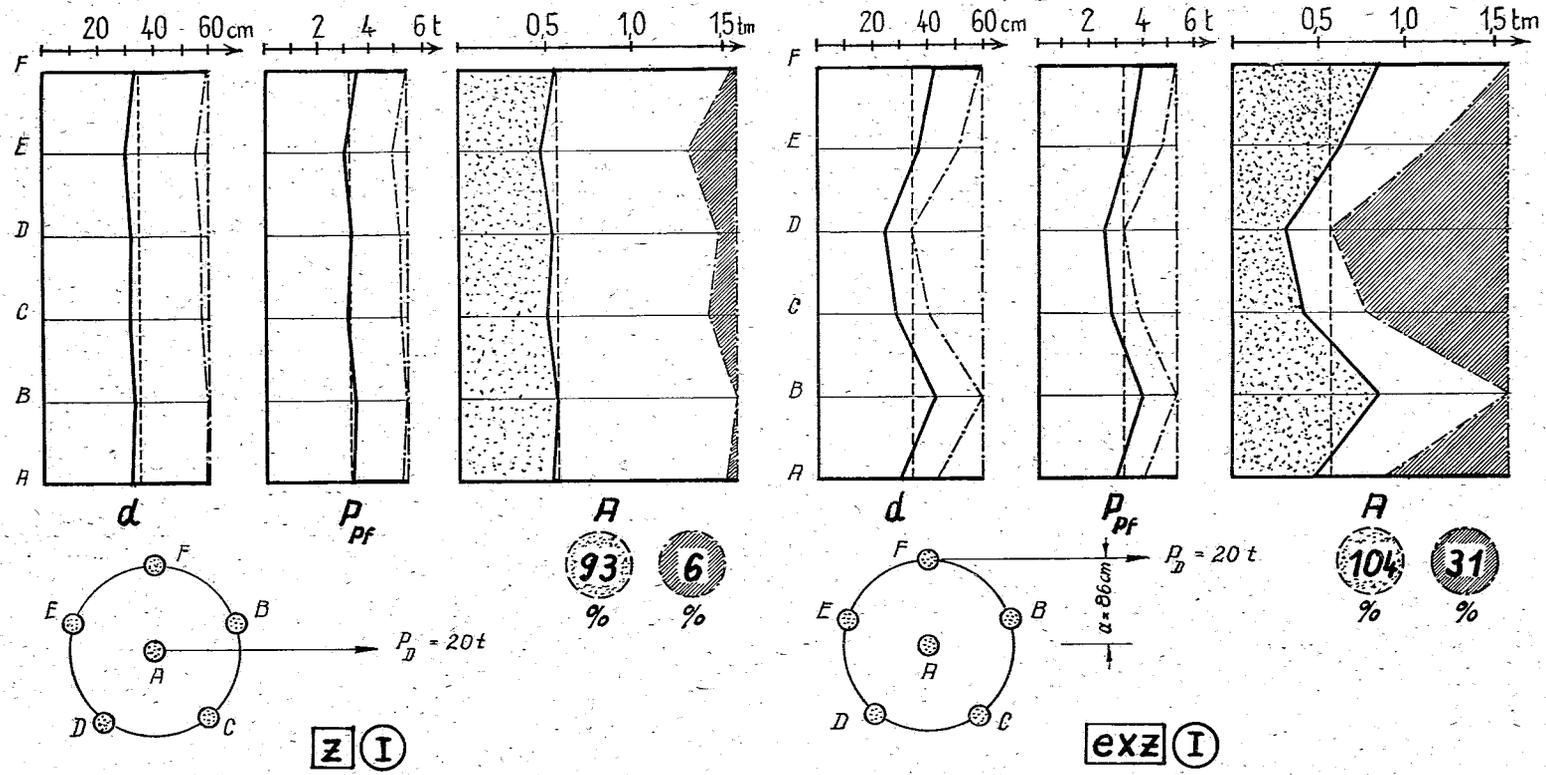


Abb. 4. Ergebnis-Schema für Dalben I, System Mannesmann.
 Es bedeuten: A, B, C, D, E, F .. Pfahlbezeichnung; \boxed{z} .. bei zentrischem Zug; \boxed{exz} .. bei exzentrischem Zug; d.: Durchbiegung; P_{Pf} ... Pfahlkraft; A ... Formänderungsarbeit; P_D ... Dalbenzug; a ... Exzentrizität; weitere Erklärung siehe Text.

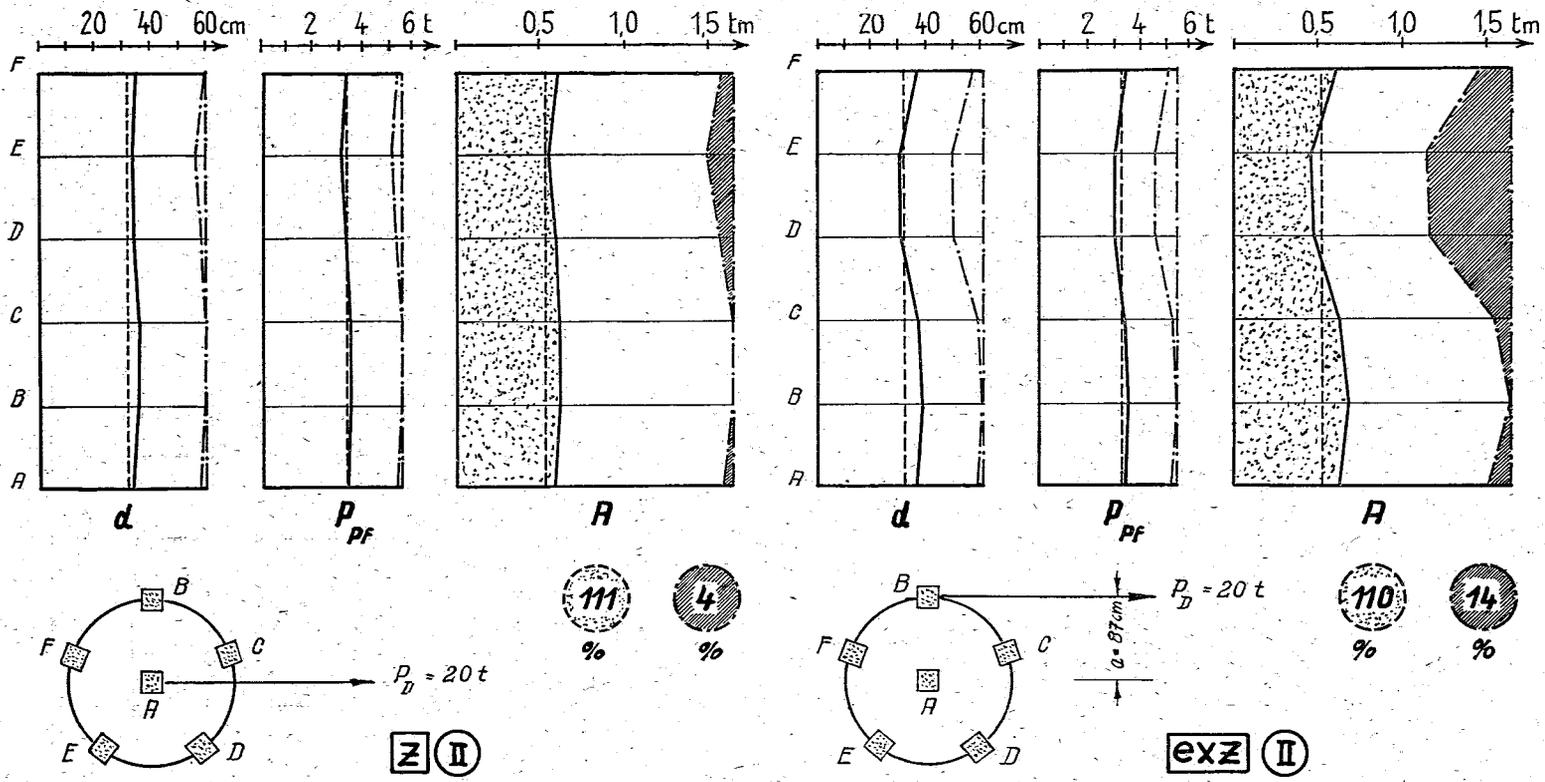


Abb. 5. Ergebnis-Schema für Dalben II, System Wedekind.
Bezeichnungen wie bei Abb. 4.

202

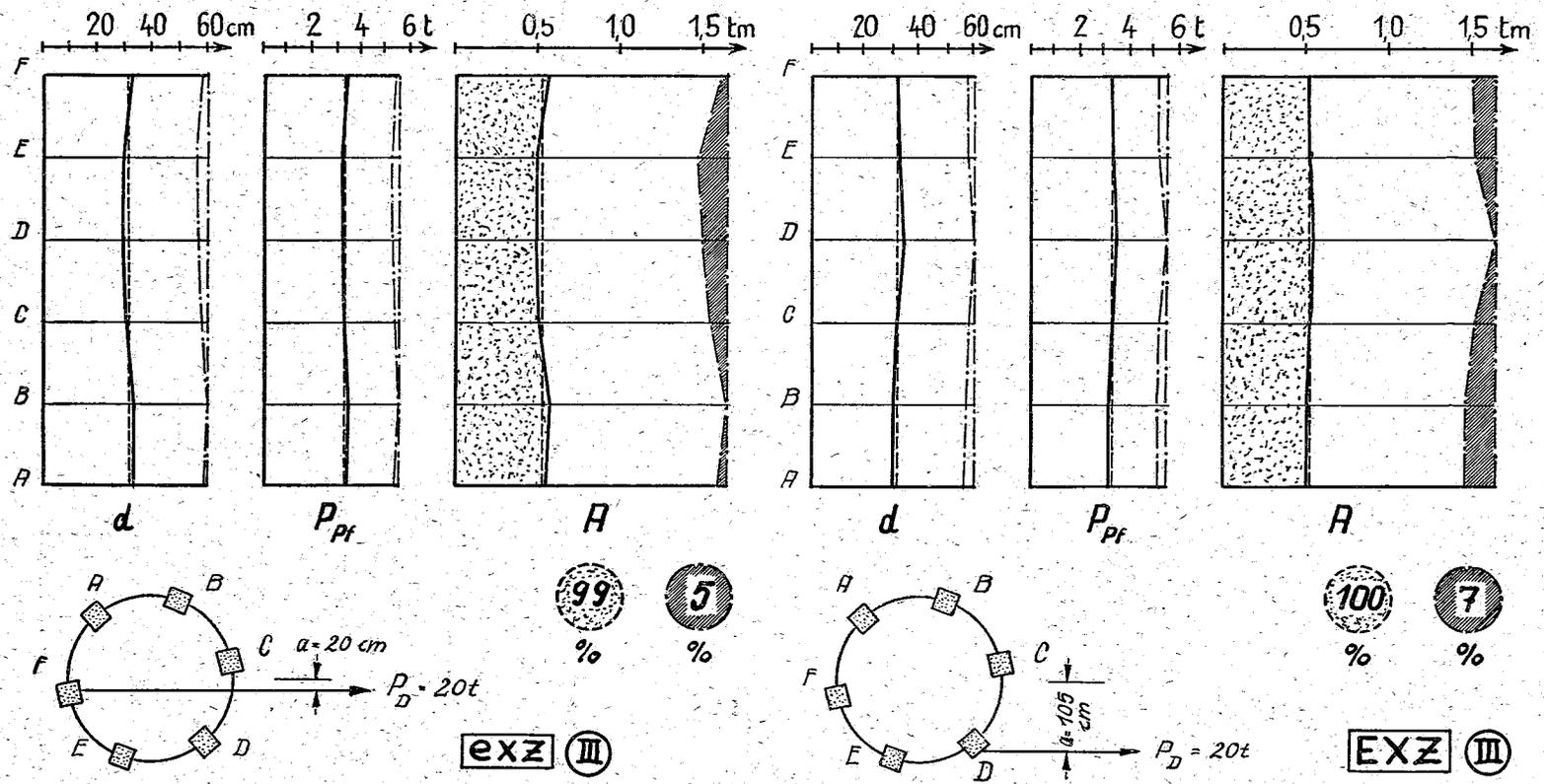


Abb. 6. Ergebnis-Schema für Dalben III, System Minnich.
 Bezeichnungen wie bei Abb. 4, jedoch bedeutet hier **exz** .. bei kleinexzentrischem und **EXZ** .. bei großexzentrischem Dalbenzug.

messungen an dünnwandigen Rohren sehr anfällig auf Wandverformungen sind, im Abschnitt 6 noch gegeben und deren Zuverlässigkeit kritisiert.

Obwohl die Bewegungsmessung bereits die Grundlage für die nachherige exakte Berechnung des Verdrehungswinkels des Dalbens lieferte, wurde bereits beim Versuch primitiv mit Hilfe von Winkelmessern die Dalbenverdrehung kontrolliert, was bei den verdrehbaren Dalben schon ein hinreichend deutliches Bild ergab.

Die Durchbiegungen wurden, obwohl nicht erforderlich, nach Dr. Blum vorausberechnet, wofür auf Grund von 18 Unterwasserbohrungen mit Entnahme von 15 ungestörten Bodenproben die Bodenwerte bestimmt wurden. Da die Flemhuder Pfahlversuche 1951 die ausgezeichnete Übereinstimmung der nach Blum berechneten Durchbiegungen einzelner Pfähle bewiesen hatten, war Gelegenheit gegeben, die Berechnung der Durchbiegung ganzer Dalben nach Blum zu kontrollieren, bei welcher nach üblicher Weise die Dalbenbreite an Stelle der Pfahlbreite unter Ansatz der Gesamtwiderstandsmomente genommen wird. Hierdurch kam ein nicht in der eigentlichen Zielsetzung des Versuches gelegenes Nebenergebnis zustande.

5. Ergebnis der Durchbiegungsmessung.

Für diese wird lediglich die Endbelastung mit 20 t ausgewertet. Die Größe der Einzelpfahldurchbiegungen und ihre Abweichungen von der Zugrichtung sind in Tabelle II ersichtlich.

Der Veranschaulichung halber wird das Ergebnis hinsichtlich Unterschiedlichkeit der Durchbiegungen, der Kräfte und der geleisteten Arbeiten jedes Einzelpfahles in den Abb. 4 bis 10 in Form von »Ergebnis-Schemen« dargestellt. Diese enthalten außer den bei 20 t gemessenen Werten auch deren Sollwerte bei dieser Belastung unter Annahme gleichmäßiger Verteilung, ferner die Sollwerte unter der gleichen Annahme bei Streckgrenzbelastung und überdies jene Werte, die sich bei Streckgrenzenerreichung im ungünstigsten Fall auf Grund der festgestellten Ungleichmäßigkeit ergeben würden.

Die Bezeichnungen der international gehaltenen Abb. 4 bis 10 müssen erklärt werden. In allen »Ergebnis-Schemen« befinden sich links drei Schemen für zentrischen Zug (bzw. fast zentrischen) und rechts drei Schemen für exzentrischen Zug. In der Reihenfolge von links nach rechts stellen diese dar: Schema der Durchbiegung (d), Schema der Kraft (P_{Pf}) und Schema der geleisteten Arbeit (A).

In allen drei Schemen bedeuten die Stricharten:

- voll ausgezogen gemessener Wert bei 20 t Dalbenzug,
- strichliert für gleichmäßige Verteilung gerechneter Wert bei 20 t Dalbenzug,
- strichpunktirt
- linker Linienzug für jene Belastung gerechneter Wert, bei welcher die Streckgrenze in dem am meisten durchgebogenen Pfahl erreicht wird (unter Berücksichtigung der festgestellten Ungleichmäßigkeit der Kräfteverteilung),
- strichpunktirt
- rechter Linienzug ... für gleichmäßige Verteilung bei Streckgrenzbelastung.

Tabelle II

**Einzelfahldurchbiegung und ihre Richtungsabweichung α von der Dalbenzugrichtung und Dalbenverdrehung ω
in Verholmungshöhe bei 20 t Dalbenbelastung.**

d_s = nach Blum berechnete Soll-Durchbiegung; z.... bei zentrischem Zug; ex (cm).... bei exzentrischem Zug;
(.....) Exzentrizität; (L) bei Zug in Dalbenlängsrichtung; (Q) bei Zug in Dalbenquerrichtung

Dalb. Nr.		Pfehlbezeichnung												bei	
		A		B		C		D		E		F		d_s cm	ω Grad
		d cm	α Grad	d cm	α Grad	d cm	α Grad	d cm	α Grad	d cm	α Grad	d cm	α Grad		
I	z	32,6	+ 0,17	33,1	+ 0,33	31,5	+ 0,17	31,6	+ 0,17	29,9	+ 3,67	32,9	+ 1,00	34,3	6,77
	ex (86)	30,9	+ 2,00	43,0	- 7,17	28,7	- 10,0	24,3	+ 15,0	36,3	+ 16,5	43,0	+ 6,67		
II	z	35,4	+ 0,17	36,2	+ 0,17	36,1	0,00	35,1	0,00	34,2	- 0,67	35,5	0,00	31,9	2,45
	ex (87)	36,4	- 1,84	38,1	- 1,67	36,7	- 7,00	31,4	- 3,39	30,9	0,00	35,5	+ 3,84		
III	ex (20)	32,3	+ 2,67	32,8	+ 1,50	31,6	+ 1,33	30,8	+ 1,84	30,5	+ 2,33	32,2	+ 2,50	31,9	0,50
	ex (105)	31,1	+ 1,17	31,4	+ 1,50	32,0	+ 1,53	33,5	+ 1,33	32,1	- 0,67	31,9	- 2,33		
IV (L)	z	24,9	- 2,84	23,2	- 2,50	23,4	- 2,50	23,2	- 0,67	22,7	- 2,33	2,31	- 2,33	31,9	0,13
	ex 35	24,7	- 0,50	24,0	- 1,84	24,2	- 1,84	24,1	- 0,67	24,2	- 1,67	23,8	- 2,17		
IV (Q)	z	28,4	- 1,67	29,2	- 1,33	29,5	- 1,17	29,1	- 1,84	29,1	- 1,33	29,3	- 1,33	31,9	1,08
	ex (78)	29,3	- 1,50	31,2	- 1,33	31,9	- 1,33	29,2	- 4,00	29,8	- 2,67	32,0	- 3,33		
V (L)	z	30,7	- 1,50	29,0	- 1,00	25,0	- 0,33	29,8	0,00	28,9	- 1,00	28,6	- 0,33	31,9	0,23
	ex (39)	30,6	+ 0,33	29,7	0,00	29,5	- 1,00	30,7	+ 1,00	29,9	- 0,33	29,3	- 0,84		
V (Q)	z	34,2	- 2,67	35,2	- 2,50	35,2	- 3,17	35,2	- 3,00	34,8	- 2,67	35,4	- 2,33	31,9	0,99
	ex (72)	33,6	- 2,84	34,3	- 2,00	33,4	- 2,50	36,0	- 0,17	34,4	- 1,17	33,7	- 1,00		

- In den Schemen für die Arbeit (A) bedeuten die Flächen:
- punktiert bei 20 t Dalbenzug geleistete Arbeit. Der Anteil dieser Arbeit an der für gleichmäßige Verteilung der 20 t errechneten Arbeit ist in dem punktierten Kreis in Prozenten angegeben,
 - nur eng schraffiert .. Einbuße des Arbeitsvermögens des Dalbens zufolge ungleichmäßiger Verteilung bei Streckgrenzenerreichung im meist durchgebogenen Pfahl. Der Anteil dieser Einbuße an dem vollen Arbeitsvermögen bei Streckgrenzenerreichung und gleichmäßiger Verteilung ist in den gleichschraffierten Kreisen in Prozenten angegeben,
 - eng schraffiert und
breiter quer schraffiert Einbuße des Arbeitsvermögens zufolge Starrheit bei Streckgrenzenerreichung im meist durchgebogenen Pfahl. Der Anteil dieser Einbuße an dem vollen Arbeitsvermögen bei Streckgrenzenerreichung und gleichmäßiger Verteilung ist in den gleichartig schraffierten Kreisen in Prozenten angegeben.

Die zuletzt angeführte Schraffur und Prozentangabe kommt nur bei den Dalben IV und V vor (Abb. 7 bis 10). Die Berechnung der ungleichmäßigen Verteilung bei Streckgrenzenerreichung im ungünstigsten Fall erfolgte durch geradlinige Extrapolation der Werte bei tatsächlicher Verteilung bei 20 t.

Die Prozentzahl im punktierten Kreis müßte theoretisch 100 lauten, da keine Arbeit verlorengehen kann, vorausgesetzt, daß die Arbeit lediglich bei der Pfahldurchbiegung geleistet wird. Daß diese Prozentzahl meist anders lautet (auch 100 übersteigt), ist darauf zurückzuführen, daß bei der Berechnung der Formänderungsarbeit bei gleichmäßiger Kraftverteilung die P zwar unantastbar als Sechstel der Zugkraft festliegen, jedoch die d der Zuverlässigkeit der Berechnungsmethode unterworfen sind, von welcher bei noch so gutem Zutreffen eine 100%ige Übereinstimmung nicht verlangt werden kann. Gleichzeitig spielt hierbei der Verlust zufolge anderweitiger Arbeitsübernahme mit. Insbesondere wird bei den Holzverzimmerten Dalben, besonders beim Zug in der starren Längsrichtung, ein erheblicher Anteil der Arbeit von der elastischen Formänderung der Holzverzimierung geleistet und ein Teil von den auftretenden Reibungskräften und von den unelastischen Verformungen bzw. Zerstörungen des Holzes vernichtet.

Die Abb. 4 bis 10 sprechen für sich, das Ergebnis wird noch kommentiert:

a) Der verdrehbare Dalben I (Abb. 4 Schema A rechts) weist bei exzentrischer Belastung eine Arbeitsvermögen-Einbuße von 31% auf, der verdrehfeste Dalben III (Abb. 6 Schema A rechts) lediglich von 7%. Beim verdrehbaren Dalben II (Abb. 5 Schema A rechts) beträgt diese Einbuße 14%. Es ist zu beachten, daß bei Dalben III an Stelle der zentralen Belastung eine kleinexzentrische (20 cm) der Fall war. Während also der verdrehbare Dalben (I) rd. $\frac{1}{3}$ an Arbeitsvermögen einbüßt, behält der verdrehfeste (III) fast sein ganzes. Der sich gemischt verhaltende Dalben II verliert etwa $\frac{1}{6}$.

b) Beim verdrehbaren Dalben I leisten bei 20 t exzentrischem Zug die vom angezogenen Pfahl (F) am meisten entfernten Pfähle (D und C) die kleinste Arbeit, welche etwa nur $\frac{2}{5}$ jener des angezogenen Pfahles beträgt. Gemäß Abb. 4 Schema d rechts verhalten sich die analogen Durchbiegungen wie 5,5 : 10.

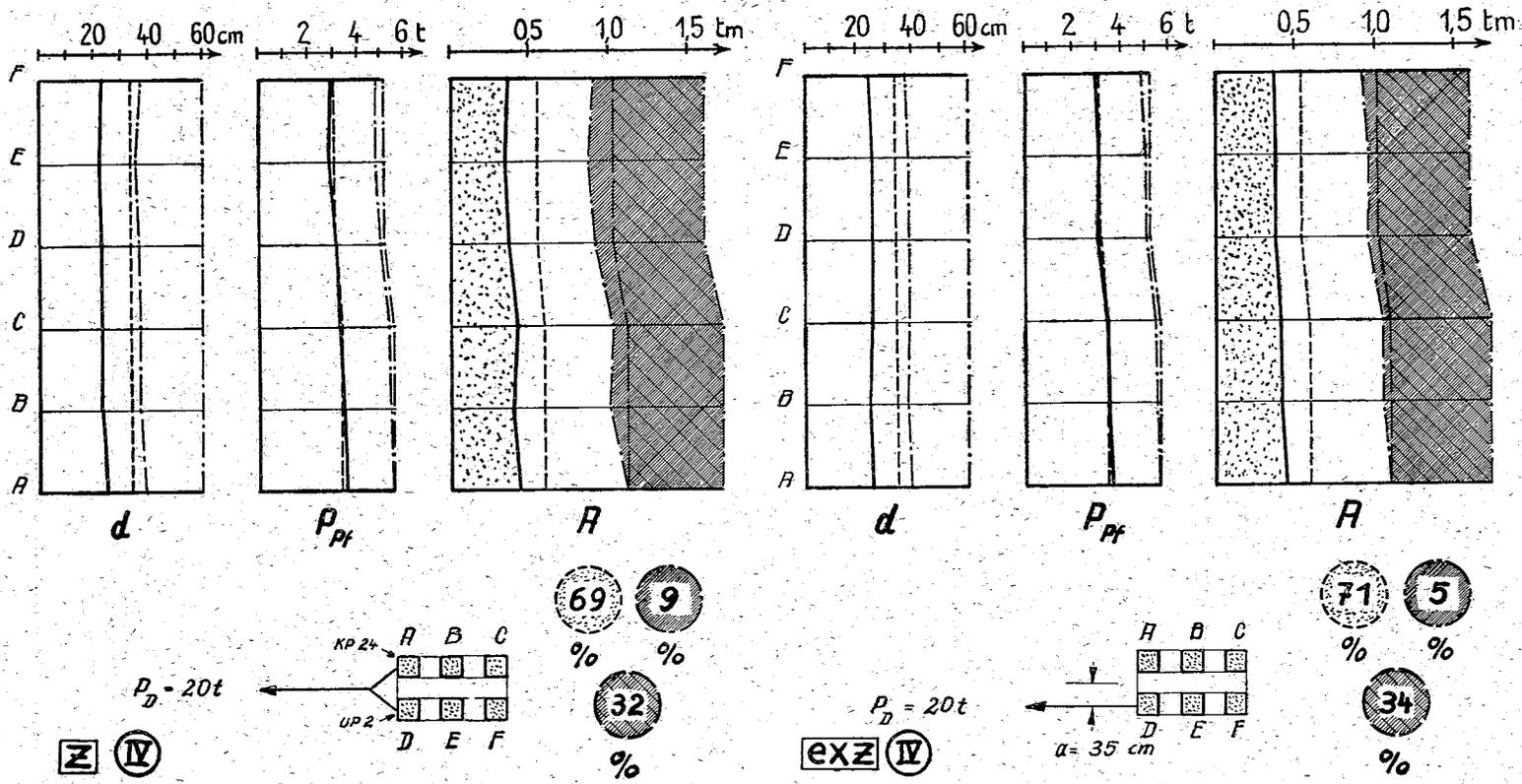


Abb. 7. Ergebnis-Schema für Dalben IV, ungleichpähliger holzverzimmter Dalben bei Längszug.
Bezeichnungen wie bei Abb. 4.

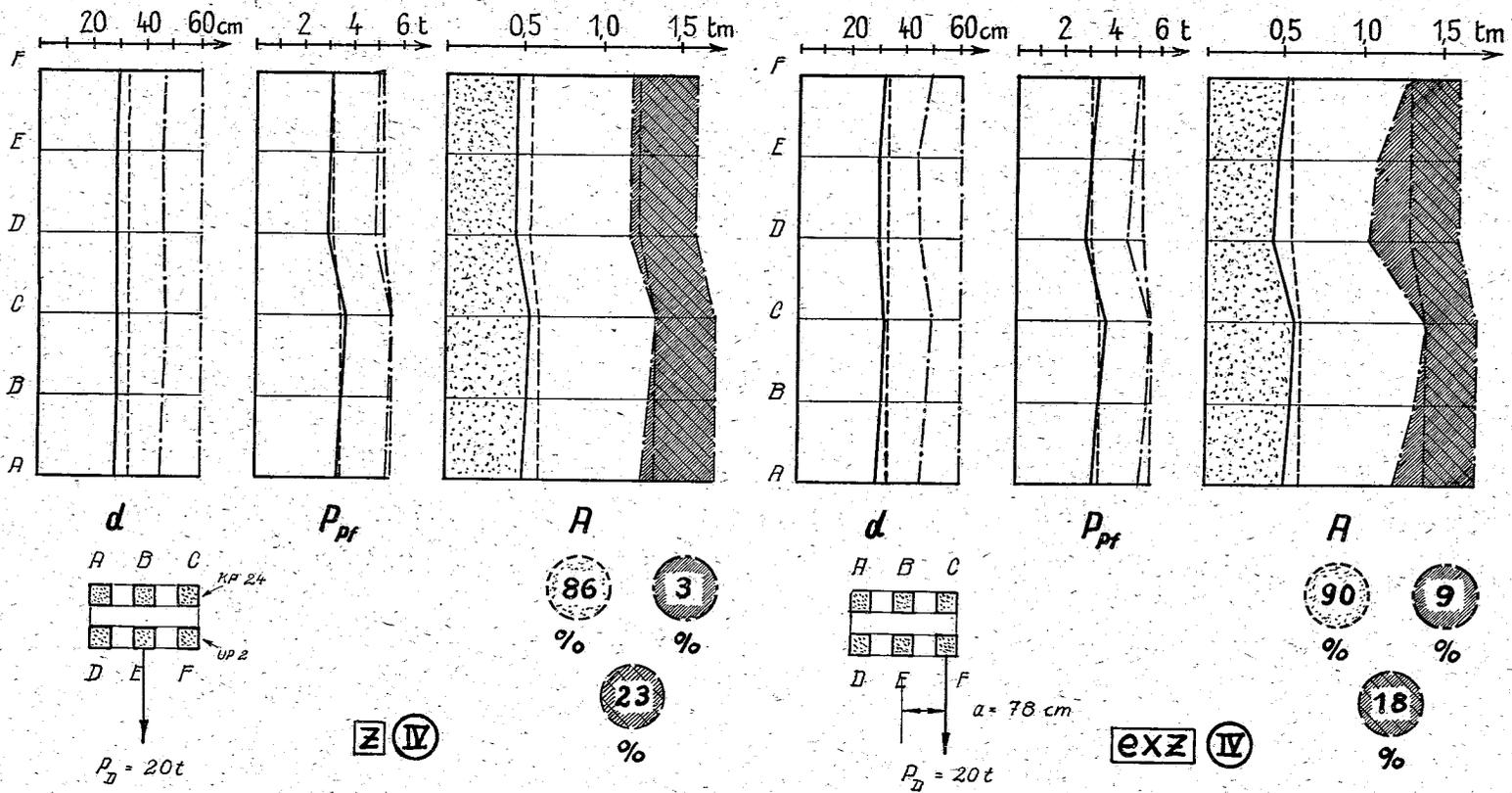


Abb. 8. Ergebnis-Schema für Dalben IV, ungleichpfähliger Holzverzimmerter Dalben bei Querzug.
 Bezeichnungen wie bei Abb. 4.

Dagegen sind im gleichen Fall beim verdrehfesten Dalben III (Abb. 6 Schemen A und d rechts) die Durchbiegungen und Arbeitsleistungen aller Pfähle kaum unterschiedlich.

Beim Dalben II verhalten sich im gleichen Fall die Arbeiten wie 7 : 10, die Durchbiegungen wie 8 : 10 (Abb. 5 Schemen A und d rechts).

c) Bei Steigerung der Kraft steigern sich die Unterschiede zwischen angezogenem und am weitest entfernten Pfahl bei exzentrischer Beanspruchung stark bei den verdrehbaren Dalben. Beim Dalben I beträgt das Verhältnis hinsichtlich Arbeit 3 : 10, hinsichtlich Durchbiegung 4 : 10. Beim verdrehfesten Dalben ist das Arbeitsverhältnis nur noch 9 : 10, das Durchbiegungsverhältnis 9,5 : 10. Bei Dalben II ergibt sich ein Arbeitsverhältnis von 7 : 10 und ein Durchbiegungsverhältnis von 8 : 10.

d) Die Unterschiede hinsichtlich Einbuße an Arbeitsvermögen zwischen zentrischer und exzentrischer Belastung verhalten sich beim verdrehbaren Dalben I wie 6% : 31% = 2 : 10. In absoluter Höhe gewertet ist mit 5 bzw. 7% beim verdrehfesten Dalben III kaum ein Unterschied vorhanden. Beim Dalben II ist er mit 4 bzw. 14% bereits erheblicher.

e) Bei zentrischer Belastung sind die Einbußen an Arbeitsvermögen bei den Dalben I bis III fast gleich gering (Dalben I 6%, Dalben II 4%, Dalben III 5%). Bei wirklich zentrischer Belastung des Dalben III (er wurde lediglich klein-exzentrisch belastet) dürfte eine noch geringere Einbuße zu erwarten sein. Der verdrehbare Dalben I verhält sich also bei zentrischer und bei exzentrischer Belastung wesentlich anders, der verdrehfeste jedoch fast gleich. Bei zentrischer Belastung verhalten sich verdrehbare und verdrehfeste Dalben nahezu gleich.

f) Bei den holzverzimmerten Dalben IV und V ist die Einbuße an Arbeitsvermögen zusammengesetzt aus jener zufolge ungleichmäßiger Kraftverteilung und aus jener zufolge Starrheit.

Die Einbuße zufolge Starrheit ist in Längsrichtung besonders groß. Sie beträgt beim ungleichpfählichen Dalben IV bei zentrischem Zug 32% und bei exzentrischem 34% (Abb. 7 Schema rechts und links). Beim gleichpfählichen Dalben V beträgt sie zentrisch 10% und exzentrisch 16% (Abb. 9 Schema A rechts und links).

Die Gesamteinbuße in Längsrichtung beträgt beim ungleichpfählichen Dalben IV zentrisch $32 + 9 = 41\%$, exzentrisch $34 + 5 = 39\%$. Beim gleichpfählichen Dalben V beträgt sie zentrisch $10 + 16 = 26\%$, exzentrisch $16 + 4 = 20\%$.

Bei Querkzug beträgt die Gesamteinbuße beim ungleichpfählichen Dalben IV zentrisch $23 + 3 = 26\%$ und exzentrisch $18 + 9 = 27\%$, während sich beim gleichpfählichen Dalben V bei Querkzug auffallenderweise keine Starrheit gezeigt hat.

g) Dagegen zeigen sich beide holzverzimmerte Dalben ziemlich verdrehfest. Die Einbuße zufolge ungleichmäßiger Durchbiegungen (also der eigentliche Grad der Verdrehfestigkeit) betrug

bei Längszug	bei Dalben IV	zentrisch 9%	exzentrisch 5%
	bei Dalben V	zentrisch 16%	exzentrisch 4%
bei Querkzug	bei Dalben IV	zentrisch 3%	exzentrisch 9%
	bei Dalben V	zentrisch 3%	exzentrisch 9%

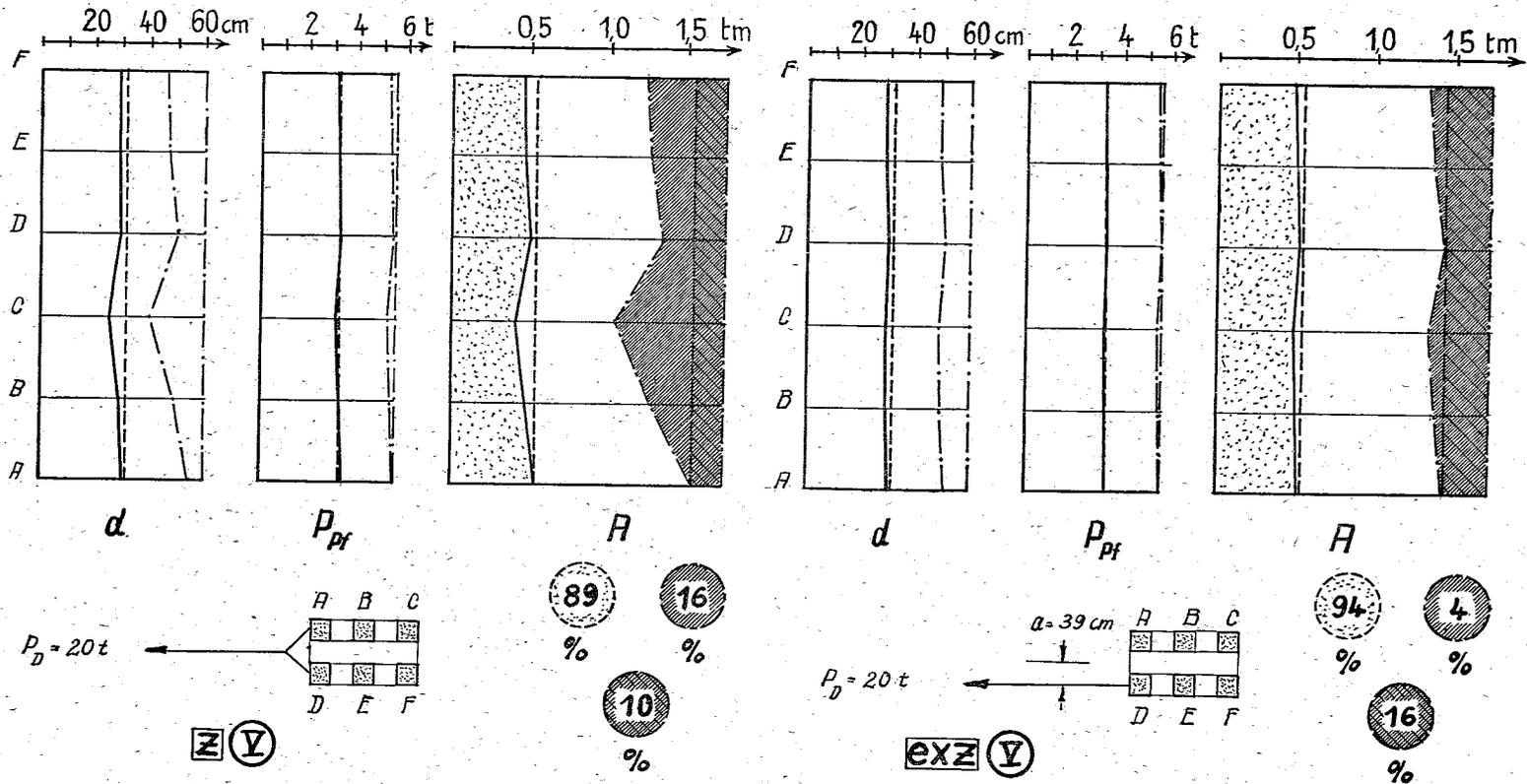


Abb. 9. Ergebnis-Schema für Dalben V, gleichpähliger holzverzimmter Dalben bei Längszug.
Bezeichnungen wie bei Abb. 4.

210

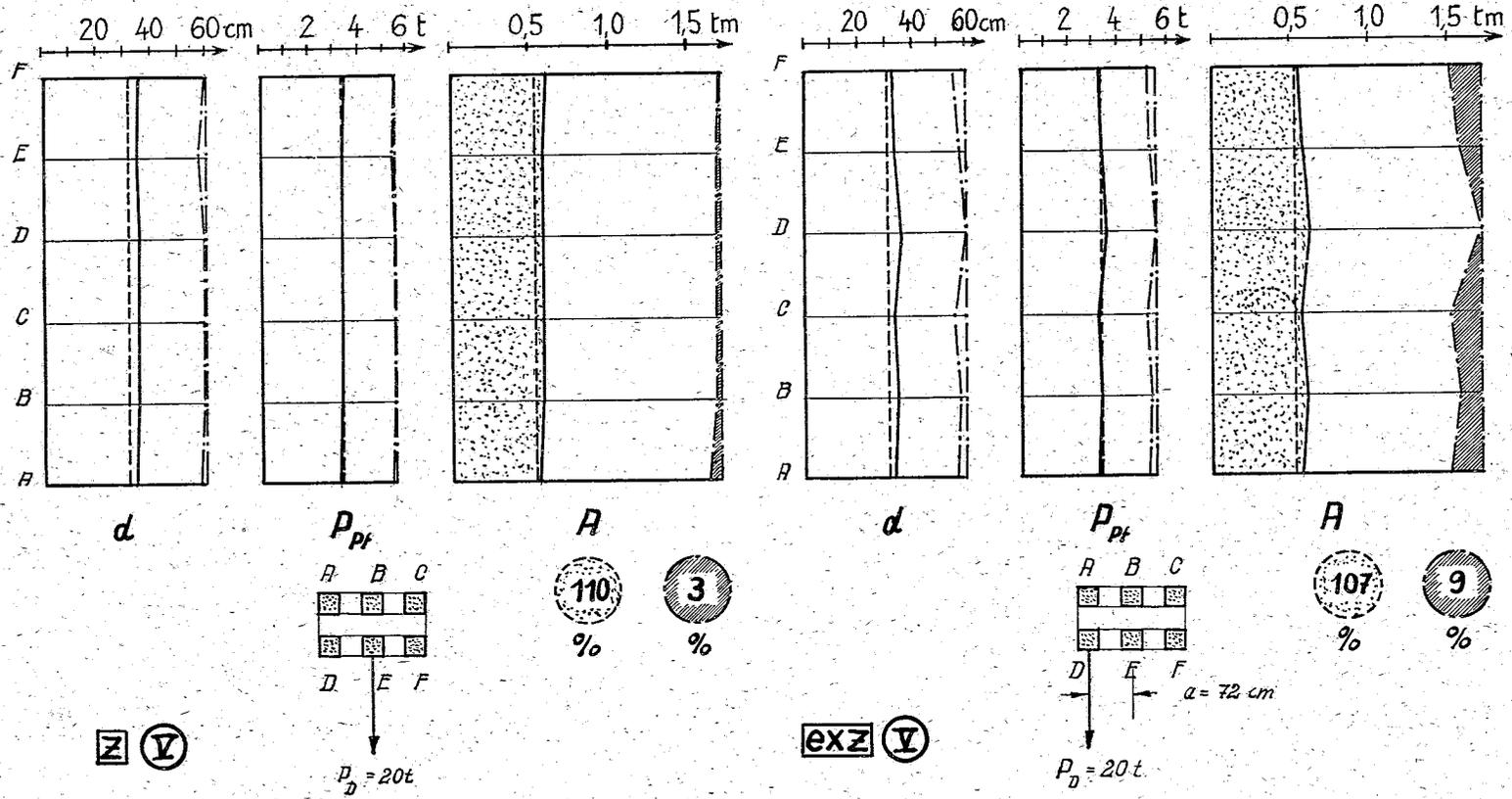


Abb. 10. Ergebnis-Schema für Dalben V, gleichfähiger holzverzimmerter Dalben bei Querkzug.
Bezeichnungen wie bei Abb. 4.

Während also die Starrheit der Holzverzimmerten Dalben besonders in der Längsrichtung beträchtlich ist und Einbußen an Arbeitsvermögen bis zu 34% mit sich bringt, ist ihre Verdrehfestigkeit mit Einbußen um rd. 10% herum recht gut. Immerhin weist der ungleichpfähliche Dalben IV, sogar bei zentrischer Kraft mit 41% die größte Gesamteinbuße auf, welcher eine Einbuße des verdrehbaren Dalben I von 13% gegenübersteht.

Abgesehen davon, daß beim Holzverzimmerten Dalben, insbesondere beim ungleichpfählichen Dalben IV, welcher die in der Diagonalachse besonders ungünstigen UP 2 enthält, beim Zug in der Diagonalrichtung, der nicht untersucht wurde, noch ungünstigere Werte zu erwarten sind, muß die Holzverzimierung hinsichtlich Einbuße an Arbeitsvermögen unter allen untersuchten Dalben als die ungünstigste bezeichnet werden.

h) Außer der Betrachtung der Einbußen an Arbeitsvermögen wird der Grad der Verdrehfestigkeit besonders durch die Gradanzahl des Verdrehungswinkels der Verholmung bei 20 t exzentrischem Zug anschaulich. Gemäß Angabe des Winkels ω in Tabelle II ist sein niedrigster Wert bei den Längszügen der Dalben IV und V 0,13 bzw. 0,23 Grad, während er beim verdrehbaren Dalben I 6,77 Grad beträgt. Bei verdrehfesten Dalben III beträgt die Verdrehung 0,5 Grad. Diesem zwar absolut nicht geringsten Wert stehen die immerhin noch geringen Verdrehungswinkel von 1,08 bzw. 0,99 Grad in der Querrichtung der Holzverzimmerten Dalben gegenüber. Die absolut größte Verdrehfestigkeit der Holzverzimmerten Dalben in der Längsrichtung wird aber durch ihre geringere Verdrehfestigkeit in der Querrichtung herabgesetzt. Auch die Verdrehfestigkeit des Dalbens II mit einem Verdrehungswinkel von 2,45 Grad ist recht gut.

Zusammenfassend ergibt sich aus dem Versuch: Der verdrehfeste Bündeldalben nutzt sein Arbeitsvermögen bei exzentrischer Beanspruchung nahezu völlig aus, während ein verdrehbarer Dalben bei exzentrischer Beanspruchung von seinem Arbeitsvermögen rd. $\frac{1}{3}$ einbüßt. Der verdrehfeste Dalben ist somit dem verdrehbaren hinsichtlich Arbeitsvermögen (Wuchtaufnahmevermögen) um rd. 50% überlegen.

Die in neuem Zustand außerordentlich verdrehfesten Holzverzimmerten Dalben nutzen wegen ihrer anfänglichen Starrheit in der Längsrichtung ihr Arbeitsvermögen nur mit rd. 60% aus. Der verdrehfeste Dalben ist somit dem Holzverzimmerten um 66% überlegen.

Der verdrehfeste Dalben und die Holzverzimmerten Dalben verdrehen sich bei exzentrischer Beanspruchung mit 20 t um Bruchteile eines Grades, dagegen erreicht diese Verdrehung bei einem verdrehbaren Dalben ungefähr 7 Grad.

Der verdrehfeste Dalben bedeutet daher einen wesentlichen Fortschritt gegenüber einem verdrehbaren Dalben und einen noch größeren gegenüber Holzverzimmerten Dalben.

Nebenergebnis: Aus den Durchbiegungsmessungen ergab sich in mehrfacher Bestätigung, daß die Durchbiegung des Dalbens bei gleichmäßiger Kraftverteilung nahezu mit jener Durchbiegung übereinstimmt, die sich ergibt, wenn man den Einzelpfahl mit der Einzelkraft belastet und in der Blumschen Berechnung für den Wert b die Pfahlbreite einsetzt. Die übliche Berechnungsart für die Berechnung der Dalbendurchbiegung, bei welcher man die Dalbenkraft auf die Summe der Einzelpfahlwiderstandsmomente bezieht und in der Blumschen Berechnung für den Wert b die Dalbenbreite einsetzt, liefert nicht zutreffende Werte (im vorliegenden Fall waren sie etwa 20 bis 30% zu groß).

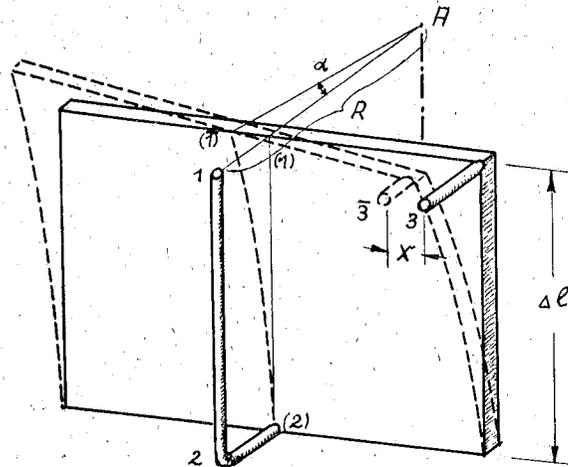
6. Ergebnis der Schubspannungsmessung zufolge Verdrillung

- A. Beschreibung der Verdrillungsmessung. Berechnung der Schubspannungen.
- B. Ergebnis der Schubspannungsermittlung.
- C. Anhang: Bedeutung des Meßwertes »u« und eine Biegelinieneigenschaft.

A.

Die auf den Pfahl C des Dalbens III beschränkte Verdrillungsmessung gelang fünfmal, zweimal bei großexzentrischer und dreimal bei kleinexzentrischer Kraft. Zehn Kraftstufen wurden ausgewertet, um das Zutrauen zur Messung beurteilen zu können.

Die Verdrillung darf nicht aus der bereits aus der Biegemessung erhaltenen Verdrehung der Dalbenverholmung abgeleitet werden, weil das geringste Spiel



$$t = (1) \bar{(1)} = 3 \bar{3} = x = R \cdot \alpha$$

Abb. 11.

und die geringsten Verformungen in den Verholmungselementen es zur Folge haben, daß nur ein Teil der an sich minimalen Verholmungsverdrehung sich auf die Pfähle überträgt.

Als Grundlage für die Schubspannungsermittlung muß die Verdrillung feiner und direkt am Pfahl gemessen werden. Hierfür wurde die in Abb. 11 schematisch skizzierte Anordnung getroffen, deren Höhenlage am Pfahl gleichgültig ist, da die Verdrillung überall gleich groß ist. Für die Bestimmung der Pfahlverdrillung ϑ (Verdrehung je cm Pfahllänge, Dimension cm^{-1}) wurde eine Meßlänge Δl von 60 cm gewählt. Der auf diese entfallende Verdrehungswinkel α wurde durch die Messung der Sehne $t =$ Strecke (1) (1) der Bogenlänge \bar{t} erhalten. Der Wert $\text{tg } \alpha = t/R$ kann bedenkenlos $= \alpha$ gesetzt werden. Der Ist-Wert der Verdrillung beträgt $\vartheta_{\text{ist}} = \alpha / \Delta l = t / R \Delta l \text{ cm}^{-1}$.

An Stelle der Strecke $t = (1) \bar{(1)}$ wurde die Strecke $x = 3 \bar{3} = R \alpha$ mit Tastuhren gemessen.

Da der Pfahl auf Torsion und Biegung beansprucht ist, enthält die Messung von x den Torsionseinfluß und den Durchbiegungseinfluß auf die Mantellinie (1) (2). Um beide Verschiebungen zu eliminieren, wurde gemäß Abb. 12 der Wert x auch an einer analogen gegenüberliegenden Anlage gemessen. Gemäß der schematischen Abb. 13 ist x als Strecke (3) (3) an der linken Anlage mit $r = b - t$ und als Strecke III (III) an der rechten Anlage mit $r = b + t$ bezeichnet, wobei jetzt t die Verschiebung zufolge Torsion und b jene zufolge Biegung bedeuten.

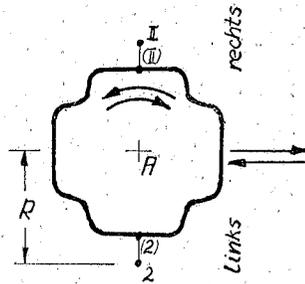


Abb. 12.

Es ergibt sich, daß $t = -(1-r)/2$ und $b = (1+r)/2$. Somit liefern die gemessenen Werte l und r die Verschiebungen zufolge Torsion und Biegung.

Der Sollwert der Schubspannung beträgt $\tau_{\text{soll}} = M_T / W_T = Pa / W_T = c_2 P$, wobei a die Exzentrizität der Kraft P bedeutet. Der Meßwert der Schubspannung beträgt $\tau_{\text{ist}} = c_3(1-r)/2$, worin $c_3 = GJ_T / W_T r \Delta l$. Da c_2 und c_3 konstant sind, muß die Beziehung zwischen P und $(1-r)/2$ geradlinig sein. Im Anhang ist nachgewiesen, daß auch die Beziehung zwischen P und $(1+r)/2 = u$ geradlinig sein muß.

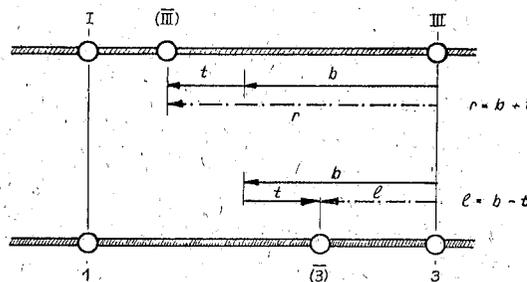


Abb. 13.

In der Abb. 14 sind über P die Werte $(1-r)/2$ und in Abb. 15 jene von $(1+r)/2$ als Istwert-Kurven i aufgetragen. Beide Zeichnungen enthalten auch die Sollwert-Geraden s und zeigen, daß die Istwerte nicht geradlinig verlaufen. Das kann entweder bedeuten, daß — wenn die Messung richtig ist — während der Kraftsteigerung die Gleichmäßigkeit der Verdrillungsverteilung auf die Pfähle geschwankt hat, oder daß — wenn letzteres nicht der Fall war — die Messung ungenau war. Weil aber in allen Kraftlagen die Kräfteverteilung gleich blieb, muß auch das Dalbentorsionsmoment sich in jeder Kraftlage gleichmäßig in

Pfahl-torsionsmomente aufgeteilt haben. Somit ist die Torsionsmessung ungenau. Trotzdem bringt sie ein deutliches Ergebnis.

Leider erlaubt der beschränkte Raum nicht die nähere Begründung der Schlussfolgerungen. Die Abb. 15 ist mit Maßstäben für die Schubspannung ζ , für die Verdrillung ϑ , für die Gesamtverdringung des Pfahles Θ und für das Pfahl-torsionsmoment M_T versehen, so daß diese Werte aus dem aufgetragenen Verlauf der Werte $(1-r)/2$ ablesbar sind.

Gemäß Abb. 14 zeigt die Schubspannung τ bei den kleinexzentrischen Versuchen 16 bis 18 bei verschiedenen Kräften Über- und Unterschreitungen von ungefähr 6 bis 7 kg/cm⁻², welche absolut gering, aber proportional groß sind. Bei

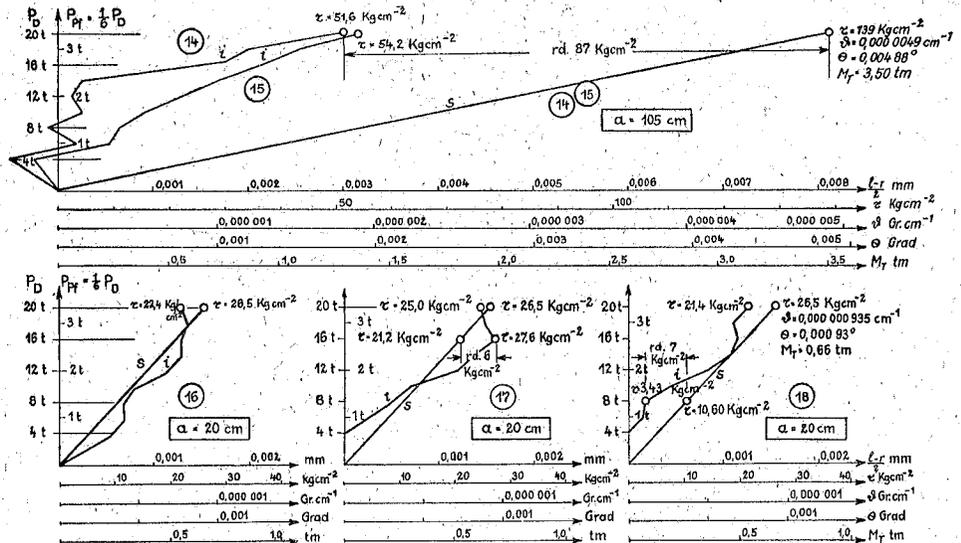


Abb. 14. Soll- und Istwerte der Torsionsmessung. Es bedeuten: Zahlen im Kreis ... Versuchsnummer; α ... Exzentrizität; s ... Sollwert der Berechnung; i ... Istwert der Messung; P_D ... Dalbenzug; P_{Pf} ... Pfahlkraft; τ ... Schubspannung; ϑ ... Verdrillung; Θ ... Pfahlverdringung; M_T ... Torsionsmoment; $\frac{1-r}{2}$... Ablesung der Messung.

den großexzentrischen Versuchen 14 und 15 kommen nur Unterschreitungen vor, die absolut und proportional groß sind, u. z. bei allen Kräften (bei 20 t beträgt die Sollspannung 139 kg/cm⁻², die Istspannung 50 kg/cm⁻², die Unterschreitung 90 kg/cm⁻² = (65⁰/o).

Die absolut kleinen Über- und Unterschreitungen der Versuche 16 bis 18 stellen die Streuung der Messung dar. Legt man diese an die großen Unterschreitungen der Versuche 14 und 15 an, so bleiben immer noch erhebliche Unterschreitungen, die wohl kaum anzuzweifeln sind.

Aber selbst wenn tatsächlich der weit unterschrittene Sollwert aufgetreten sein sollte, d. h. wenn die gesamte Formänderungsarbeit zufolge Dalbentorsion durch die Torsionsverformung der Pfähle ohne Beteiligung der Formänderungsarbeiten in den torsionsübertragenden Elementen der Verholmung stattgefunden hätte, gilt folgendes:

Bei Streckgrenze 3600 vermag Dalben III laut Tabelle I 32,7 t Zugkraft aufzunehmen. Bei der großexzentrischen Kraft $P = 20$ t beträgt $\tau_{\text{soll}} 140 \text{ kg/cm}^{-2}$. Bei 32,7 t würde es 230 kg/cm^{-2} betragen und 6,4% der Streckgrenzspannung ausmachen. Der bei 20 t gemessene Istwert der Schubspannung beträgt 55 kg/cm^{-2} und würde bei Streckgrenzkraft 90 kg/cm^{-2} betragen, somit 2,5% der Streckgrenzspannung. Dann wäre Diskussion überflüssig.

Die Messung hätte also ruhig um $100 \cdot 640/250 = \text{rd. } 250\%$ in ungünstiger Richtung falsch sein können, damit das Verhältnis der Schubspannungen zur Biegespannung 6,4% beträgt.

Aber selbst ein 6,4%iger, dem rechnungsmäßigen Sollwert entsprechender Schubspannungsanteil ergäbe erst eine Vergleichsspannung

$$\sigma_{v4} = \sqrt{\sigma^2 - (1,73 \tau)^2} = 0,995 \sigma = 1/2\% \text{ von } \sigma.$$

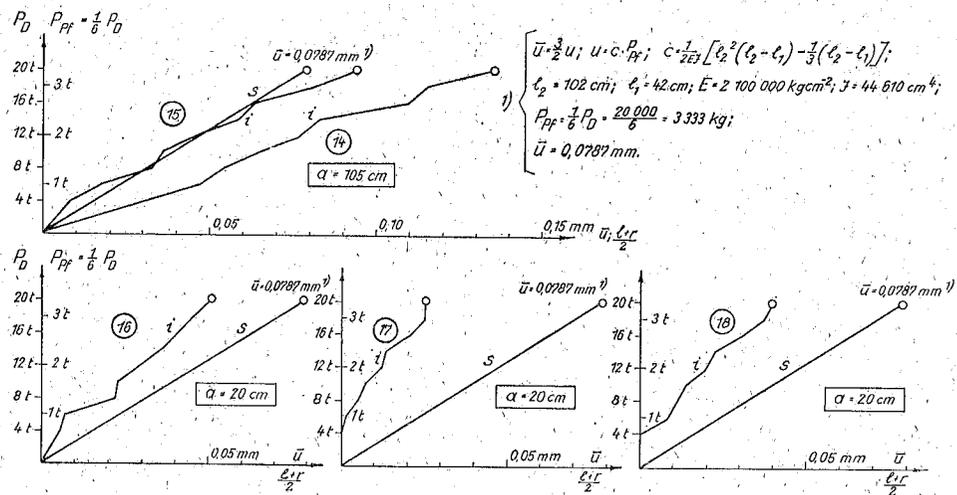


Abb. 15. Soll- und Istwerte des Wertes $\bar{u} = \frac{1 + \tau}{2}$ bei der Torsionsmessung. Bezeichnungen wie in Abb. 14.

B.

Im verdrehfesten Bündeldalben III nach System Minnich, in welchem sämtliche Pfähle auf Torsionswiderstand beansprucht waren, vermochte die Schubspannung zufolge Torsion die zulässige Streckgrenzspannung schlechtestenfalls, der Berechnung entsprechend, um 1/2% herabzusetzen. Somit spielen die Schubspannungen bei verdrehfesten Dalben, bei denen alle Pfähle am Torsionswiderstand beteiligt sind, keine Rolle. Bei Beteiligung weniger Pfähle oder eines Pfahles kann der rechnerischen Bestimmung der Schubspannung zufolge Torsion getraut werden.

Beim Minnich-Dalben betrug die Verdrehung des Einzelpfahles $0,000002 \text{ Grad} \cdot \text{cm}^{-1}$, die Gesamtverdrehung des Pfahles 0,002 Grad, während die rechnerischen Werte das Zweieinhalbfache davon betragen. Da die gemessene Verdrehung des Dalbens 0,5 Grad betrug, überträgt sich nur ein Bruchteil der Dalbenverdrehung auf die Pfahlverdrehung zufolge retardierenden Verhaltens der die Verdrehfestigkeit bewirkenden Verholmungselemente. Auf die Streckgrenzbelastung bezogen betrug die Schubspannung $\text{rd. } 55 \text{ kg/cm}^{-2}$ gegenüber einer rechnungsmäßigen von $\text{rd. } 140 \text{ kg/cm}^{-2}$. Selbst bei letzterer würde das Arbeitsvermögen des Dalbens nur

um 1/2% herabgesetzt werden. Dem gegenüber steht die Vermeidung einer rd. 33%igen Einbuße an Arbeitsvermögen, welche ein verdrehbarer Dalben bei exzentrischer Beanspruchung erleidet. Somit ändert die Berücksichtigung der Schubspannungen nichts daran, daß ein verdrehfester Dalben einem verdrehbaren hinsichtlich Arbeitsvermögen um die Hälfte überlegen ist.

Gemäß Abb. 16C bedeutet beim einseitig fest eingespannten Stab der Wert u den in der Biegerichtung gemessenen Abstand eines Biegelinienspunktes 1 von der Tangente eines Biegelinienspunktes 2, wobei der in der Normalrichtung zur Ruhelage des Stabes gemessene Abstand zwischen 1 und 2 konstant ist.

Es wird nachgewiesen, daß u unabhängig von der Stablänge und der Lage der Strecke 1 2 zur Einspannstelle und lediglich von der Lage der Strecke 1 2 zum Stabende abhängig ist. Ferner wird nachgewiesen, daß die Beziehung zwischen u und der im Stabende angreifenden Kraft P geradlinig ist.

Im Abschnitt A entspricht u dem Werte $b = (1+r)/2$, dessen geradlinige Beziehung zu P als Kontrolle der Verdrillungsmessung verwendet wurde.

War es bei der Verdrillungsmessung hinsichtlich der Torsionsverschiebung $t = (1-r)/2$ gleichgültig, wo gemessen wurde, so war es hinsichtlich der Biegeverschiebung $b = u$ nicht mehr gleichgültig, da u vom Abstand der Meßlänge $l_1 = l_2$ vom Stabende abhängig ist. Es hatten sich zwar andere Werte für b, jedoch die gleichen für t ergeben.

Beweis für die erwähnte Unabhängigkeit und die erwähnte geradlinige Beziehung: In Abb. 16A ist die übliche Berechnung der Biegelinie angeführt. Bei B ist eine abgeleitete bequemere Form der Biegeliniengleichung angegeben. Sie lautet $x = -ay^3 + 3aby^2$, worin $a = P/6EJ$ und $b = h =$ Stablänge. Aus dieser Gleichung ergibt sich der Wert u mit

$$u = \frac{P}{2EJ} \left\{ l_2^2 (l_2 - l_1) - \frac{1}{3} (l_2^3 - l_1^3) \right\}$$

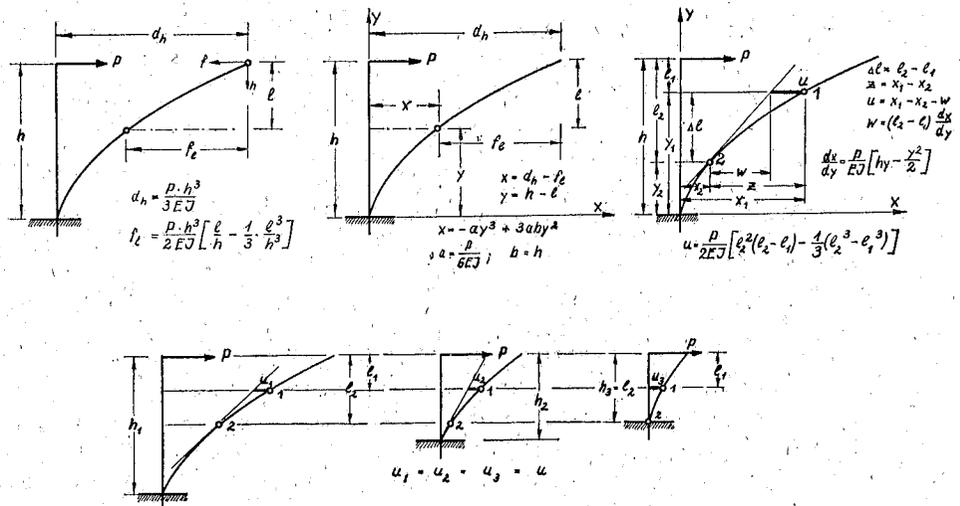


Abb. 16. Bedeutung und Berechnung des Wertes u der Biegelinie des einseitig fest eingespannten Stabes.

Weil h nicht enthalten ist, ist u unabhängig von der Stablänge und bei konstantem P nur abhängig von l_2 und l_1 , d. h. von der Lage der Strecke 1 2 zum Stabende. Bei konstanten Werten von l_1 und l_2 , also bei konstanter Lage der Meßlänge $\Delta l = l_2$ (was beim Versuch der Fall war) ist u eine geradlinige Funktion von P , quod erat demonstrandum.

Bei Verwendung von u im Verdrillungsergebnis der Abb. 15 mußte der Wert $u = \frac{2}{3} u$ genommen werden, da die bei elastischer Einspannung nach Blum gerechneten, durch die Pfahlversuche Flemhude 1951 als zutreffend nachgewiesenen Durchbiegungen etwa $\frac{2}{3}$ der auf Grundlage fester Einspannung errechenbaren Durchbiegungen betragen.

Eine einfachere Deutung des Wertes u demonstrieren die Abb. 16 D, E und F. Die Gleichheit der Werte u_1 , u_2 und u_3 mit u (welche sich aus der Gleichung für u ergibt) sagt bei Betrachtung der Strecke u_3 in Abb. 16 F aus, daß u gleichbedeutend mit der Durchbiegung eines um l_1 vom Stabende entfernten Punktes eines Stabes der Länge l_2 ist. Als solche Durchbiegung gemäß Abb. 16 A gerechnet, ergibt sich die in Abb. 16 C angeführte Formel für u auf einfacherem Wege.

Abteilung II — Mitteilung 2

Neueste Entwicklungen.

Neueste Entwicklungen in der Anordnung der Kaiflächen der Häfen und in ihrer Ausrüstung (insbesondere die auf beiden Seiten der Schuppen usw. verfügbaren Flächen);

Neueste Entwicklungen in der Behandlung verschiedener Güter, mit Ausnahme der Massengüter, zwischen dem Schiff und dem endgültigen Transportmittel (Eisenbahn, Lastkraftwagen, Binnenschiff usw.);

Neueste Entwicklungen in der Lagerung der Güter;

Neueste Entwicklungen in der Abdeckung der Kaiflächen;

besondere Einrichtungen an Land für Kühllagerung;

Vergleich zwischen den Umschlageinrichtungen an Bord und an Land;

Abfertigung von Reisenden.

A. Die neuesten Entwicklungen in Hamburg

von Dipl.-Ing. Friedrich Mühlradt,
Erster Baudirektor des Strom- und Hafenaubau Hamburg.

B. Die neuesten Entwicklungen in Bremen/Bremerhaven

von Professor Dr.-Ing. e. h. Dr.-Ing. Arnold Agatz,
Präsident der Bremischen Hafenbauverwaltung.

C. Zusammenfassung

von Professor Dr.-Ing. e. h. Dr.-Ing. Arnold Agatz,
Präsident der Bremischen Hafenbauverwaltung.