

Mitteilungen der Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau
der Technischen Hochschule Darmstadt

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. H. Breth

Heft 16

**Ermittlung des Tragverhaltens
einer mehrfach verankerten Baugrubenwand
durch Modellversuche**

Dr.-Ing. Reinhard Wolff

Juni 1975

Mitteilungen der Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau
der Technischen Hochschule Darmstadt

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. H. Breth

Heft 16

**Ermittlung des Tragverhaltens
einer mehrfach verankerten Baugrubenwand
durch Modellversuche**

Dr.-Ing. Reinhard Wolff

Juni 1975

Vorwort

Die vorliegende Arbeit bildet den vorläufigen Abschluß einer Reihe von Untersuchungen, die wir über das statische System verankerter Baugrubenwände, die hierbei auftretenden Kräfte und Verformungen angestellt haben. Über die Erfahrungen mit in Ton verankerten Wänden habe ich erstmals 1970 bei der Baugrundtagung in Düsseldorf berichtet. Mit Unterstützung des Bundesministeriums für Verkehr und der Deutschen Bundesbahn konnten wir umfangreiche Messungen in einer 20 m tiefen Baugrube im Frankfurter Hauptbahnhof ausführen, über die ein ausführlicher Bericht von Romberg (Mitteilung Nr. 12) vorliegt. Parallel hierzu hat Stroh (Mitteilung Nr. 13) das Verhalten verankerter Baugrubenwände mit Hilfe der Finite-Element Methode untersucht, die es ihm ermöglichte, auch die nichtlinearen Spannungs-Dehnungsbeziehungen des Bodens in seine Parameterstudie einzubeziehen. Die Studie bringt eine umfassende Darstellung wie sich die in der Praxis angewandten konstruktiven Maßnahmen auf den Erddruck und auf die Verschiebung der Wand auswirken. Obwohl die Berechnungen von Stroh mit den von Romberg ausgewerteten Messungen gut in Einklang zu bringen waren, habe ich Wolff die Aufgabe gestellt, an einer verankerten Modellwand die möglichen Einflüsse auf die Erddruckverteilung und Wandverschiebung zu überprüfen und mit den von Stroh erarbeiteten Ergebnissen zu überprüfen. Voraussetzung hierfür war, daß im Modell der von der Praxis vorgegebene Aushubvorgang und das Spannen der Anker wirklichkeitsgetreu nachgeahmt werden. Die Modellversuche kamen zu dem gleichen Ergebnis wie die Feldmessung und die theoretischen Untersuchungen, sodaß die dort gemachten Feststellungen als bestätigt gelten können.

Zur Abrundung unserer Studien hat Schmitt 1974 (Mitteilung Nr. 14) das Tragverhalten der verankerten Baugrubenwand und die Standsicherheit eines solchen Systems theoretisch untersucht. Er konnte nachweisen, daß der kleinste obere Grenzwert der Ankerkraft, der mit einer logarithmischen Spirale als Gleitfläche erhalten wird, als exakte Lösung angesehen

werden kann. Das System geht als Folge des Bodenaushubs durch die Abnahme der Fußstützkraft zu Bruch. In Übereinstimmung mit der Plastizitätstheorie tritt kein Geländebruch auf. Die Scherfestigkeit in der tiefen Gleitfläche ist bereits ausgenutzt bevor der Erdwiderstand vor der Wand voll mobilisiert ist. Dieser wurde bei den Versuchen erst nach weiterem Bodenabtrag und nach einer größeren Wandverschiebung überwunden. Mit dieser Feststellung erübrigen sich im allgemeinen zwei Standsicherheitsnachweise, die von der durch die Versuche überholten Vorstellung ausgehen, daß die verankerte Wand auf zwei Arten, auf der tiefen Gleitfläche oder infolge eines Geländebruchs, versagen kann.

Unsere Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft in dankenswerter Weise durch Beihilfen unterstützt.

Darmstadt, im Mai 1975

H. Breth

Summary

Tests were carried out in a model whereby particular attention was paid to the excavation of the soil in front of the wall and the preloading of each anchor being carried out as in the construction of a retaining wall supported by several loads of anchors. The model wall had the same potentiality of movement as the wall in reality by means of exact imitation of the dredging process; equally, through this, it was guaranteed that the soil in the model failed in the same way as behind the multianchored retaining wall.

Both wall and soil were able to become deformed without hindrance until the soil failed. The model wall was 1,15 meter high. It was secured with two or three anchors respectively. The test sand was quartz sand which was inserted in loose to medium closepacked compactness. It was filled in the test bin with a medium unit weight of about $1,61 \text{ Mp/m}^3$. Its angle of internal friction ρ is $39^\circ - 40^\circ$ in the range of stress prevailing in the model. Earth pressure, passive earth pressure, anchor loads, angle of wall friction and wall displacement as well as the vertical and horizontal displacement of the sand surface were measured from the start of the excavation at each step in excavation work up till the failure of the wall - ground - anchor system. After each test the failure surfaces in the ground were exposed and measured. The work investigated the influence of the number, set up, length and prestressing of the anchors as well as the influence of the flexibility of the wall and of the dredging on the amount and distribution of earth pressure. A statement of the load made measured at the moment of failure could be made about the stability of the system investigated.

The most important experimental results are:

The earth pressure is distributed triagonally. The vertex of the earth pressure triangle lies at the same level as the last anchor. Below this

the earth pressure drops. The earth pressure is greater than the active earth pressure according to Coulomb. The centre of gravity of the earth pressure plane lies somewhat above the lower third of the height of the wall. This statement is valid when the anchors are prestressed at 80 % of the Coulomb earth pressure which increases linear with the depth. By means of a corresponding prestressing of the anchors, a larger and differently distributed earth pressure can be produced, divergent from this provision. The amount and distribution of the earth pressure on the wall can be alleged to a limited extent by means of the prestressing of the anchors. The anchor length influences the amount of the earth pressure but only slightly the distribution of the earth pressure. Also the influence of the wall flexibility on the earth pressure is slight.

The stability of the wall - earth - anchor system was tested on level and curved failure surfaces. With the assumption of level failure surfaces too much safety is simulated.

As the anchor length is increased, the stability of the wall - ground - anchor system is decisively enlarged, the wall and ground movements are significantly decreased.

The set up and number of anchors determine the stability as well. The length of the bottom anchor has a large influence on the stability of the system and on the wall and soil deformation. The prestressing of the anchors and the flexibility of the wall do not have any influence on the stability. However the wall deformation is somewhat less only in the upper wall area and the settlement of the sand surface behind the wall is somewhat decreased when the anchors are prestressed to a greater extent and the wall is more rigid.

In accordance with a field test carried out in Frankfurt/Main on a multi-anchored wall, the model tests showed that the earth pressure distri-

bution is given with the prestressing of the anchors and the prestressing of the anchors during the excavation is almost preserved. The retaining wall and the model wall moved parallel to each other whereas the wall base remained somewhat behind.

A comparison with calculations according to the finite element method has confirmed the results of the model tests in the most essential matters. This is particularly valid for the statements about the earth pressure distribution as well as the prestressing and length of the anchors. In tests with combined systems of retaining walls supported by anchors and struts an agreement in model and calculations could be attained in the earth pressure distribution as well as in the amount of anchor and strut loads.

The wall and ground deformation in the test agree well qualitatively, also.

A calculations proposal was deduced for the multianchored wall from the experimental results.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	1
2. Bisherige Untersuchungen	5
3. Aufgabenstellung	9
4. Versuchseinrichtung	10
4.1 Allgemeines	10
4.1.1 Ähnlichkeitsgesetz	10
4.2 Versuchsstand	11
4.2.1 Modell der Baugrube	11
4.2.2 Versuchssand	14
4.2.3 Einfluß der Seitenreibung	14
4.3 Meßwertaufnehmer	18
4.3.1 Kraftaufnehmer	18
4.3.2 Wegaufnehmer	20
4.4 Registrierung der Meßwerte und Auswertung	20
4.5 Versuchsdurchführung	22
5. Versuchsprogramm	23
6. Wiederholungsversuche (Reproduzierbarkeit)	27
7. Untersuchung des Systems Wand- Boden- Anker im Bruchzustand	32
7.1 Bedeutung der Versuche	32
7.1.1 Gleitflächenverlauf	33
7.1.2 Standsicherheit	38
7.1.2.1 Kräfte im Bruchzustand	38
7.1.2.2 Einfluß der Ankerlänge	40
7.1.2.3 Einfluß der Ankervorspannung, der Biegesteifigkeit und der Ankeranordnung	43

	<u>Seite</u>
7.2 Erddruck, Erddruckverteilung und Ankerkräfte	46
7.2.1 Übersicht	46
7.2.2 Einfluß der Ankervorspannung	47
7.2.3 Einfluß der Ankerlänge	52
7.2.4 Einfluß der Wandsteifigkeit	55
7.2.5 Einfluß des Aushubvorganges	57
7.2.6 Einfluß der Ankeranordnung und der Ankeranzahl	59
7.2.7 Einfluß der Verankerungsstrecke	64
7.3 Biegemomente	64
7.3.1 Fehlerbetrachtung	64
7.3.2 Einfluß der Ankervorspannung, Biegesteifigkeit und des Aushubvorganges	66
7.3.3 Einfluß der Ankerlänge, der Ankeranordnung und der Ankeranzahl	68
7.4 Zusammenfassung	70
8. Verformungen der Wand und der Bodenoberfläche	72
8.1 Übersicht	72
8.2 Einfluß der Ankerlänge	72
8.3 Einfluß der Ankeranordnung	76
8.3.1 Summe der Ankerlängen ist konstant	76
8.3.2 Summe der Ankerlängen ist nicht konstant	79
8.3.3 Einfluß der Ankeranzahl und der Ankeranordnung	79
8.4 Einfluß des Aushubvorganges	82
8.5 Einfluß der Wandsteifigkeit, der Verankerungsstrecke und der Ankervorspannung	85
8.6 Zusammenfassung	88
9. Vergleich mit anderen Modellversuchen	93
10. Vergleich zwischen Verankerung und Aussteifung	98
11. Vergleich mit einer Feldmessung	102
12. Vergleich mit Finite-Element-Berechnungen	106
12.1 Übersicht	106
12.2 Einfluß der Ankerlänge	107
12.3 Einfluß der Ankervorspannung	111
12.4 Einfluß eines gemischten Stützsystems aus Ankern und Steifen	117

	<u>Seite</u>
13. Berechnungsvorschlag	129
13.1 Erddruck und Ankerlänge	129
13.2 Wand	131
13.3 Verformungen	131
14. Zusammenfassung	134
15. Literaturverzeichnis	137

Bildregister

- 1 Baugrube S-Bahn, Frankfurt Main
- 2 mögliche Brucharten
- 3 Versuchswände
- 4 Versuchswände von Schindler
- 5 Schema der Versuchswand
- 6 Kennwerte des Versuchssandes
- 7 Einfluß der Seitenreibung
- 8 Kraftaufnehmer und Wegaufnehmer
- 9 Versuchsanlage und Blockschaltbild der Meßeinrichtung
- 10 Versuchsprogramm
- 11 Aushubvorgänge
- 12 Sonderversuche
- 13 Reproduzierbarkeit (Versuche Nr. 27 und Nr. 28)
- 14 Reproduzierbarkeit (Versuche Nr. 38 und Nr. 48)
- 15 Vergleich zwischen errechneten und gemessenen Gleitflächen
- 16 Lage der Gleitflächen (Einfluß der Ankerlage, Ankervorspannung und der Biegesteifigkeit)
- 17 Lage der Gleitflächen (Einfluß der Ankeranordnung und der Ankerlänge)
- 18 Entwicklung des Erddrucks, der Erddruckverteilung, der Ankerkraft und der Wandverformung im Augenblick des Bruches
- 19 Einfluß der Ankerlänge auf die errechnete Anker- und Stützkraft und Vergleich mit den Versuchswerten
- 20 Entwicklung der Ankerkraft A_3 , des Erddrucks E_h und der Stützkraft E_{ph} im Augenblick des Bruches (Einfluß h Vorspannung)

- 21 Entwicklung der Ankerkraft A_3 , des Erddrucks E_h und der Stützkraft E_{ph} im Augenblick des Bruches (Einfluß Biegesteifigkeit)
- 22 Entwicklung der Ankerkraft A_3 , des Erddrucks E_h und der Stützkraft E_{ph} im Augenblick des Bruches (Einfluß Ankeranordnung)
- 23 Einfluß der Ankervorspannung auf die Erddruckverteilung bei einer Aushubtiefe von $t = 22,8$ und $t = 45,6$ cm
- 24 Einfluß der Ankervorspannung auf die Erddruckverteilung bei einer Aushubtiefe von $t = 68,4$ und $t = 91,2$ cm
- 25 Einfluß der Ankervorspannung
- 26 Einfluß der Ankerlänge und der Ankervorspannung auf die Größe des Erddrucks E_h
- 27 Einfluß der Ankerlänge auf den Erddruck
- 28 Einfluß der Wandsteifigkeit auf den Erddruck
- 29 Einfluß des Aushubvorganges
- 30 Einfluß der Ankeranordnung
- 31 Einfluß der Ankeranzahl
- 32 Einfluß der Verankerungsstrecke
- 33 Einfluß der Vorspannung, des Aushubvorganges und der Biegesteifigkeit auf die Momente (Aushubtiefe $t = 91,2$ cm)
- 34 Einfluß der Ankeranzahl, der Ankerlänge und der Ankeranordnung auf die Momente (Aushubtiefe $t = 91,2$ cm)
- 35 Einfluß der Ankerlänge auf die Wandverschiebung
- 36 Einfluß der Ankerlänge auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche
- 37 Einfluß der Ankeranordnung auf die Wandverschiebung (Gesamtankerlänge = konst.)
- 38 Einfluß der Ankeranordnung auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche (Gesamtankerlänge = konst.)

- 39 Einfluß der Ankeranzahl auf die Wandverschiebung
- 40 Einfluß der Ankeranzahl auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche
- 41 Einfluß der Aushubvoreilung auf die Wandverschiebung
- 42 Einfluß der Aushubvoreilung auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche
- 43 Einfluß der Wandsteifigkeit auf die Wandverschiebung
- 44 Einfluß der Wandsteifigkeit auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche
- 45 Einfluß der Länge der Verankerungsstrecke auf die Wandverschiebung
- 46 Einfluß der Vorspannung auf die Wandverschiebung
- 47 Einfluß der Länge der Verankerungsstrecke und der Vorspannung auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche
- 48 Vergleich zwischen den Modellversuchen von Abouleid und den Versuchen Nr. 52 und Nr. 46
- 49 Modellversuche von Schindler (1969) und Stavropoulos (1969) und Versuch Nr. 11
- 50 Modellversuche von G. W. Plant (1972) und Versuch Nr. 23
- 51 Vergleich zwischen einer zweifach ausgesteiften und einer verankerten Wand
- 52 Vergleich zwischen einer dreifach ausgesteiften und einer verankerten Wand
- 53 Vergleich zwischen Feldmessung und Versuch (Aushubstufe 1 , 2 und 3)
- 54 Vergleich zwischen Feldmessung und Versuch (Aushubstufe 4 , 5 und 6)
- 55 Einfluß der Ankerlänge auf die Wandverschiebung bei den Versuchen

- 56 Einfluß der Ankerlänge auf die Wandverschiebung bei der Rechnung
- 57 Wandverschiebung während des Aushubs bei den Versuchen und der Rechnung
- 58 Einfluß der Vorspannung auf die Wandverschiebung (Versuche)
- 59 Einfluß der Vorspannung auf die Wandverschiebung (Rechnung)
- 60 Ankerkräfte während des Aushubs bei den Versuchen und bei der Rechnung
- 61 Einfluß der Vorspannung auf die Erddruckverteilung (Versuche und Rechnung)
- 62 Einfluß von Ankern und Steifen auf die Wandverschiebung bei den Versuchen und bei der Rechnung
- 63 Wandverschiebung während des Aushubs , bei Versuchen und bei der Rechnung
- 64 Einfluß von Ankern und Steifen auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Bodenoberfläche (Versuche)
- 65 Einfluß von Ankern und Steifen auf die Erddruckverteilung (Versuche und Rechnung)
- 66 Anker und Steifenkräfte während des Aushubs (Versuche Nr. 36, 43, 49)
- 67 Anker und Steifenkräfte während des Aushubs (Rechnung)
- 68 Einfluß von Ankern und Steifen auf die Biegemomente der Wand (Versuche)
- 69 Gleitflächen bei einem gemischten Stützsystem aus Ankern und Steifen (Versuche)
- 70 Einfluß der Wandverformung auf die Schnittgrößen (Versuch Nr. 25)

FORMELZEICHEN

A	Ankerabstand
AN	Ankerkraft
A 1	Ankerkraft des obersten Ankers
A 2	Ankerkraft des mittleren Ankers
A 3	Ankerkraft des untersten Ankers
$A_{\text{mögl}}$	aufnehmbare Ankerkraft
c	Kohäsion
Dv	Lagerungsdichte
Dva	Lagerungsdichte auf der aktiven Seite
Dvp	Lagerungsdichte auf der passiven Seite
δ	Wandreibungswinkel
e	Erddruckspannung
E_{ah}	horizontaler aktiver Erddruck
E_{h}	gemessener horizontaler Erddruck
E_{o}	horizontaler Erdruhedruck
E_{ph}	horizontaler Erdwiderstand vor der Wand
γ	Raumgewicht
γ_{A}	Raumgewicht auf der aktiven Seite
γ_{N}	Raumgewicht in der Natur
γ_{M}	Raumgewicht im Modell
γ_{P}	Raumgewicht auf der passiven Seite
H	Wandhöhe
Δh	Hebung

J	Wandsteifigkeit
L_A	Verankerungsstrecke
L_m	Ankerlänge
L_N	Länge in der Natur
L_M	Länge im Modell
λ	Erddruckbeiwert
λ_0	Ruhedruckbeiwert
λ_L	Maßstabsfaktor für die Abmessungen
λ_σ	Maßstabsfaktor für die Spannungen
λ_S	Maßstabsfaktor für die Verschiebungen
n	Porenvolumen
P	Pond
P_N	Kräfte in der Natur
P_M	Kräfte im Modell
R	Kreisradius
R_0	Polarkoordinate
ρ	wirksamer Reibungswinkel
φ	Polarkoordinate
S	Scherweg
Skt	Skalenteile
S_N	Verschiebung in der Natur
S_M	Verschiebung im Modell
σ_N	Spannung in der Natur
σ_M	Spannung im Modell
t	Aushubtiefe
W	Wandverschiebung
x	Abstand des Schwerpunktes der Erddruckfläche vom Wandfuß

1. Einleitung

Im städtischen Tiefbau werden in zunehmendem Maße die Baugrubenwände im Boden verankert. Der Verbau kann eine Spundwand, Schlitzwand oder eine Trägerbohlwand sein. Die Verankerung der Baugrubenwände hat gegenüber der Aussteifung den Vorteil, daß der Bauablauf nicht durch die in der Baugrube befindlichen Steifen behindert wird. Der Vorzug, eine freie Baugrube zu haben, und die Entwicklung immer tragfähigerer Anker führte dazu, auch die Wände tiefer Baugruben durch mehrere Ankerlagen zu sichern.

In letzter Zeit wurden über 20 m tiefe Baugruben mit sechs Ankerlagen ausgehoben (Bild 1). Zur Bemessung des Baugrubenverbauens und der Zahl der Ankerlagen müssen die Größe und die Verteilung des Erddruckes auf die Wand bekannt sein. Durch einen theoretischen Ansatz lassen sich der Erddruck und seine Verteilung nicht ermitteln, da die Voraussetzungen für die Anwendung bisher bekannter Erddrucktheorien bei mehrfach verankerten Baugrubenwänden nicht mehr zutreffen. Die Unsicherheit in der Beurteilung der Größe und Verteilung des Erddruckes erfordert entsprechend hohe und damit wirtschaftlich nicht vertretbare Sicherheitszuschläge. Die Standsicherheit der Baugrubenwände ist in der Praxis nur dadurch gegeben, daß sie als Folge der unsicheren Grundlagen überbemessen werden. Notfalls hilft sich das mehrfach statisch unbestimmte System durch Lastumlagerung von zu schwachen auf überdimensionierte Anker.

Die Länge der Anker wird durch eine Untersuchung der Gesamtstabilität des Systems Wand-Boden-Anker ermittelt. Hierbei werden zwei verschiedene Bruchzustände untersucht. Es wird sowohl die Geländebruchsicherheit nach DIN 4084 als auch die Sicherheit in der tiefen Gleitfuge nach Rankine/Ostermayer (1968) für mehrfach verankerte Stützwände bestimmt (Bild 2). G. P. Schmitt (1974) hat jedoch für eine einfach verankerte Stützwand nachgewiesen, daß der Standsicherheitsnachweis für die tiefe Gleitfuge allein ausreicht, das System Wand-Boden-Anker sicher zu bemessen.

Für mehrfach verankerte Baugrubenwände ist der Einfluß der Ankerlänge und der Ankeranordnung auf die Art des Bruches bis jetzt noch nicht untersucht worden.

Mit zunehmender Baugrubentiefe nimmt die Verformung der Baugrubenwand und des Bodens verstärkt zu. Hinter der Wand treten Setzungen und Horizontalverschiebungen des Bodens auf, die zu Schäden an der angrenzenden Bebauung führen können. Mit der Verschiebung des Gesamtsystems, bestehend aus Wand-Boden-Anker, treten Verformungen der Einzelglieder auf (z. B. Dehnung des Ankerstahls, Durchbiegung der Wand). Unklarheit herrscht weiterhin darüber, wie die Verformung des Bodens unter Kontrolle gehalten und damit Setzungsschäden an der benachbarten Bebauung vermieden werden können.

Messungen an Baugrubenwänden haben entscheidende Nachteile: Die Ergebnisse der Messungen sind nur schwer auf andere Baugrubenwände zu übertragen, da die einzelnen Aushubzustände, die Bodenverhältnisse, die Wandsteifigkeit und die geometrischen Abmessungen verschieden sind. Der Einfluß der Wandsteifigkeit, der Ankerlänge, der Ankervorspannung und der Ankeranordnung kann durch Messungen an einer Baugrubenwand allein nicht ermittelt werden. Hinzu kommt, daß Messungen in der Praxis aufwendig und teuer sind.

Um systematische Untersuchungen anstellen zu können, wurden in einem Versuchsstand mit einer 1,15 m hohen Modellwand Versuche gemacht. Mit diesem Modell können die verschiedensten Einflüsse, wie die Steifigkeit der Wand, Anordnung, Vorspannung und Länge der Anker auf die Größe und Verteilung des Erddruckes und auf die Verformungen des Bodens untersucht werden. Außerdem lassen sich im Modell der Baugrubenaushub und die einzelnen Bauzustände, wie sie in der Praxis auftreten, nachahmen.

Ziel dieser Arbeit soll es sein, den Einfluß der Ankerlänge, der Ankeranordnung und der Ankervorspannung auf das Tragverhalten des Systems Wand-Boden-Anker zu untersuchen.

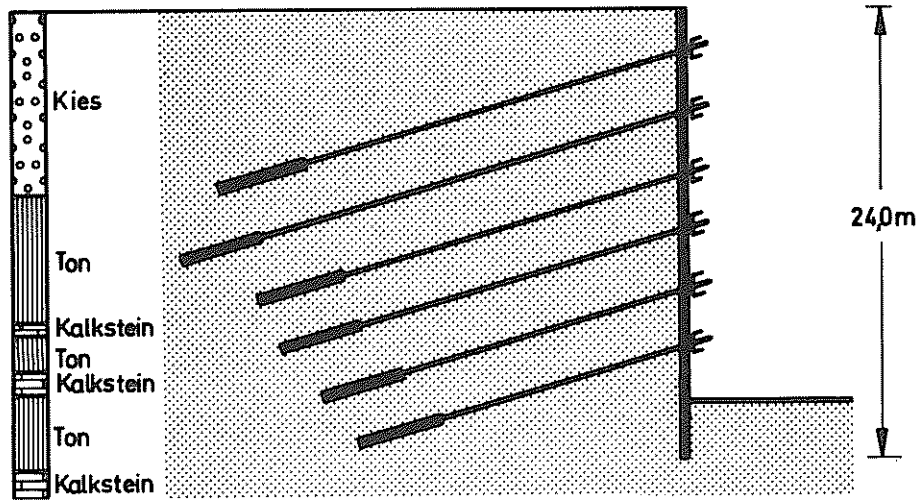


Bild 1: Baugrube S-Bahn, Frankfurt/Main

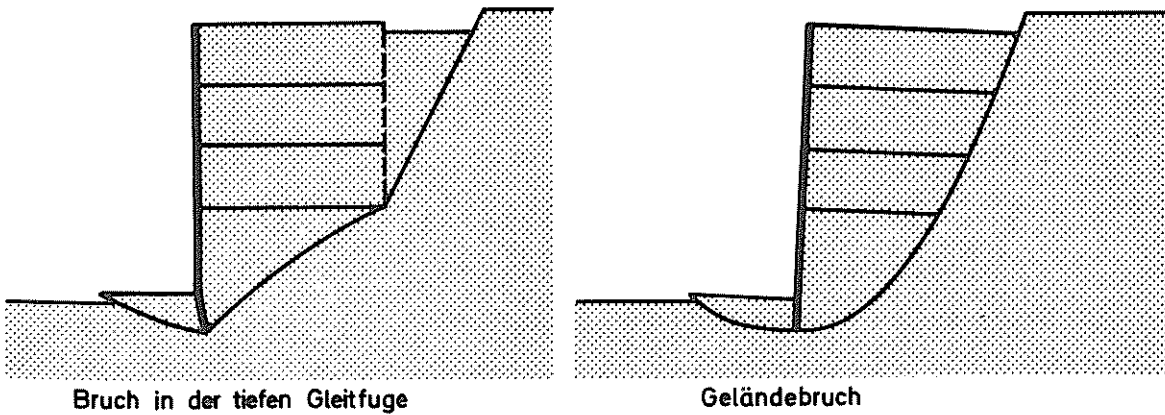


Bild 2: Mögliche Brucharten

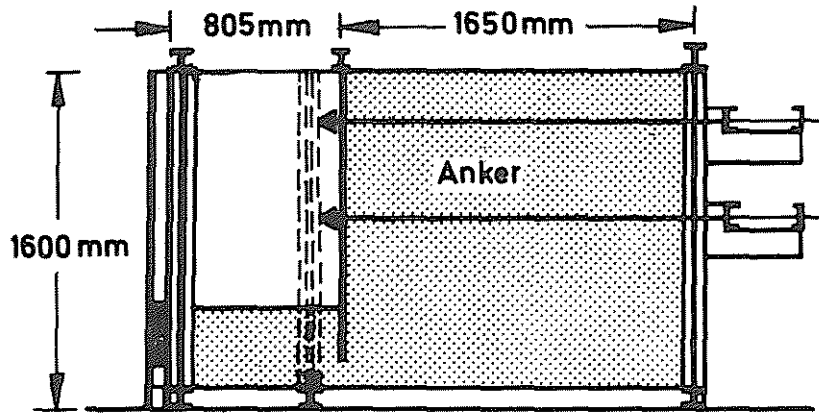
Weiterhin sollen konstruktive und bautechnische Möglichkeiten, die Wandverformung, die Setzung und Zerrung des Bodens hinter der Wand möglichst gering zu halten, untersucht und aufgezeigt werden.

2. Bisherige Untersuchungen

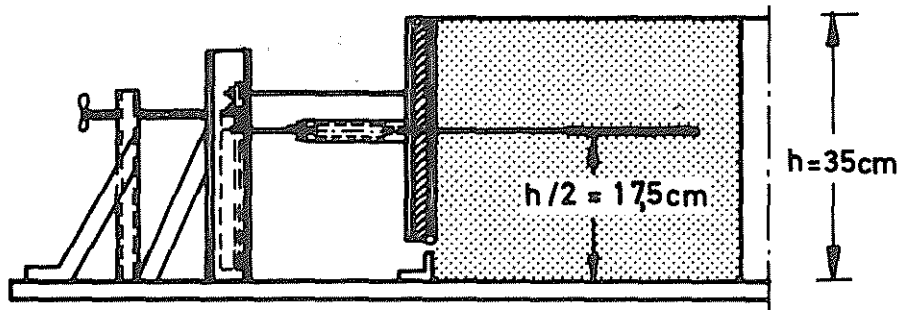
Alle bisher durchgeführten Modellversuche in kohäsionslosem Boden haben den Nachteil, daß die in der Praxis vorhandenen Verhältnisse nur ungenau nachgeahmt werden. Besonders deutlich wird dies, wenn z. B. die Ankerdrähte durch den Versuchssand geführt werden und außerhalb des Bodens am Modellkasten befestigt sind. Dadurch wirkt die Verankerung praktisch wie eine Aussteifung. Somit ist der Spannungszustand im Modell völlig anders als in der Praxis, da hier die Ankerkräfte über Verpresskörper in den Boden eingeleitet werden. In der Mehrzahl der Fälle werden nur quasi-elastische Spannungs- und Verformungszustände betrachtet. Das System Wand-Boden-Anker kann sich nicht ungehindert bis zum Bruch verformen.

Abouleid (1963) ermittelt die Größe und die Verteilung des Erddruckes auf eine 1,5 m hohe zweifach verankerte Spundwand (Bild 3), wobei er eine Versuchsserie mit unverschieblichen Ankern und eine andere mit vorgegebenen Verschiebungen der Anker durchführt. Größe und Verteilung des Erddruckes wird nicht direkt gemessen, sondern durch numerische Differentiation aus der Momentenverteilung der Spundwand gewonnen. Die Biegemomente werden mit Hilfe von Dehnmeßsteifen, die über die Trägerlänge verteilt sind, ermittelt.

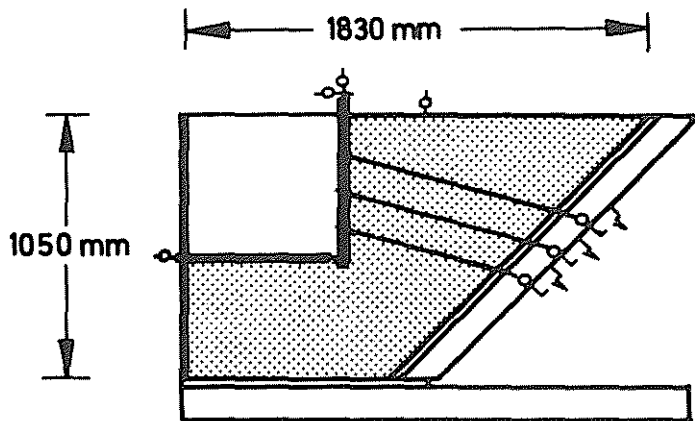
Schindler (1969) untersucht eine 0,75 m und eine 2,25 m hohe Modellwand. Er unterteilt die kleine Versuchswand (Bild 4), mit der er die Hauptversuche durchführte, in fünf voneinander unabhängige Lamellen, die je von einem Anker gehalten werden. Seine Versuchswand besitzt also keine Biegesteifigkeit. Die große Wand ist dagegen nicht in einzelne Lamellen eingeteilt und hat daher eine gewisse Biegesteifigkeit. Die Ankerkräfte werden jedoch im Boden eingeleitet. Bei beiden Wänden wird durch Drehen der Verankerungsschrauben die Wandbewegung vorgegeben. Die Erddruckverteilung ist identisch mit der Verteilung der Ankerkräfte.



Abouleid (1963)



Stavropoulos (1969)



Hanna/Matallana (1970) und G.W. Plant (1972)

Bild 3: Versuchswände

Stavropoulos (1969) untersucht das Bruchverhalten einer einfach verankerten 0,35 m hohen starren Wand (Bild 3), die er einmal um den Fußpunkt, zum anderen um den Wandkopf drehen läßt. Die Ankerkraft wird in den Boden eingeleitet. Der Bruch des Systems Wand-Boden-Anker wird nicht durch das Eigengewicht des Bodens hervorgerufen, sondern wird durch eine Zugkraft, die in Höhe des Ankers angreift, künstlich herbeigeführt.

Hanna / Matallana (1970) ermitteln die Größe und Verteilung einer dreifach verankerten 0,66 m hohen Wand (Bild 3) mit Erddruckzellen, die über die Wandhöhe verteilt sind. Die Ankerkräfte werden ebenfalls wie bei Abouleid nicht im Boden eingeleitet, sondern sind an der Rückwand des Modells befestigt.

G. W. Plant (1972) untersucht an derselben Modellwand wie Hanna / Matallana den Einfluß der Ankerneigung auf die Verformungen der Wand und die Setzungen der Geländeoberfläche.

Neben den hier aufgeführten praktischen Arbeiten gibt es zwei theoretische Arbeiten von Egger (1972) und Stroh (1974). Beide Arbeiten versuchen mit Hilfe der Finite-Element-Methode die Größe und Verteilung des Erddrucks sowie die Verformungen der Wand und des Bodens zu berechnen. Egger untersucht für ein spezielles Beispiel den Einfluß der Wandsteifigkeit und der Ankervorspannung auf die Erddruckverteilung bei einer einfach verankerten Spundwand. Das Bodenprofil besteht bis in Höhe des Wandfußes aus Sand, unterhalb des Wandfußes steht bis in große Tiefe Fels an. Die Spundwand berührt also gerade noch den Fels.

Stroh dagegen ermittelte für eine vierfach verankerte Wand im Ton den Einfluß der Ankervorspannung, der Ankerneigung, Ankerlänge, Ankeranordnung und den Einfluß eines gemischten Stütz-Systems aus Ankern und Steifen auf den Erddruck und die Verformungen der Wand und des Bodens. Die Schwierigkeit dieser Berechnungen liegt jedoch darin, eine sinnvolle Spannungs-Dehnungsbeziehung für den Boden zu finden.

3. Aufgabenstellung

Durch die Modellversuche soll das Tragverhalten einer mehrfach verankerten Baugrubenwand ermittelt werden. Es soll geklärt werden, inwieweit die Ankerlänge, Ankeranordnung und Ankervorspannung das Bruchverhalten des Systems Wand-Boden-Anker beeinflussen. Der Verlauf der verschiedenen Gleitflächen wird durch Einlegen biegsamer Metallstreifen festgehalten.

Die für die Untersuchung des Tragverhaltens notwendige Größe und Verteilung des Erddruckes soll ermittelt werden. Weiterhin soll geprüft werden, wie sich die Variation der Wandsteifigkeit und der Vorspannung der Anker auf den Erddruck auswirken.

All diese Untersuchungen sind jedoch nur dann sinnvoll, wenn im Modellversuch der Aushub und das Anspannen der Anker genau wie in der Praxis durchgeführt werden. Ferner soll auf eine wirklichkeitsgetreue Nachahmung der einzelnen Bauvorgänge geachtet werden.

In den Versuchen sollen außer dem Erddruck und den Ankerkräften auch die Wandverformung, die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche während eines jeden Aushubschrittes gemessen werden um den Einfluß des Aushubvorganges auf den Erddruck und die Verformungen festzustellen.

Die aus den Versuchsserien gewonnenen Erkenntnisse sollen systematisch zusammengestellt und mit den derzeitigen Erddruckannahmen und Berechnungsverfahren verglichen werden. Daraus sollen sichere und wirtschaftliche Bemessungsregeln für die mehrfach verankerte Baugrubenwand hergeleitet werden.

4. Versuchseinrichtung

4.1 Allgemeines

Mit der hier verwendeten Modellwand hat W a n o s c h e k 1971 Modellversuche gemacht, um den Einfluß von Fundamentlasten auf die Größe und Verteilung des Erddruckes auf biegsame, abgesteifte Baugrubenwände zu untersuchen. Daher wird im Detail auf die Bauart der Anlage nicht weiter eingegangen. Es sollen vielmehr nur die Änderungen aufgezeigt werden, die für die in Kap. 3 aufgeführten Untersuchungen durchgeführt werden mußten.

4.1.1 Ähnlichkeitsgesetz

Nach O b e r t i (1959) ist der Zustand am Modell ("M") dem Zustand in der Natur ("N") ähnlich, wenn sich die Spannungen (σ) und die Verschiebungen (S) im gleichen Verhältnis ändern wie die geometrischen Abmessungen (L).

Wenn man die Maßstabsfaktoren

$$\lambda_L = \frac{L_N}{L_M} \quad \text{für die Abmessungen}$$

$$\lambda_\sigma = \frac{\sigma_N}{\sigma_M} \quad \text{für die Spannungen}$$

$$\lambda_S = \frac{S_N}{S_M} \quad \text{für die Verschiebungen}$$

einführt, so muß bei vollkommener Ähnlichkeit

$$\lambda_L = \lambda_\sigma = \lambda_S \quad \text{sein.}$$

Eine Ähnlichkeit in bezug auf die Spannungen oder den Erddruck ist nur dann gegeben, wenn die Raumgewichte in der Natur und im Modell gleich sind ($\gamma_N = \gamma_M$). Im anderen Fall ist das Spannungsverhältnis zwischen Natur und Modell

$$\lambda_S = \lambda_L = \frac{\gamma_N}{\gamma_M}$$

Für die Kräfte P (Ankerkräfte, Querkräfte) bedeutet dies

$$\lambda_P = \frac{P_N}{P_M} = \frac{\gamma_N}{\gamma_M} \cdot \lambda_L^2$$

oder

$$P_M [\text{Mp/m}] = P_N [\text{Mp/m}] \cdot \frac{1}{\lambda_L^2} \cdot \frac{\gamma_M}{\gamma_N}$$

Diese Ähnlichkeitsbedingungen gelten nur für die Modellwand. Für den Versuchsboden, der ein natürlicher Sand ist, gelten die strengen Ähnlichkeitsgesetze nicht mehr, außer der Boden wäre ideal elastisch. Rowe (1955) zeigte, daß sich natürlicher Sand bei gleicher Lagerungsdichte unter kleinen Spannungen spröder verhält, als unter hohen Spannungen.

Bei der Untersuchung des Bruchzustandes im Modell hängen die Spannungen nur noch vom Reibungswinkel des Bodens ab. Nach Sokolovski (1960) gilt für den plastischen Zustand, wenn die Kohäsion und Auflasten Null sind, daß gleiches ρ und ähnliche Geometrie bei beliebigem Raumgewicht für die Ähnlichkeit genügen. Jedoch muß man beachten, daß der Reibungswinkel bei kleinen Spannungen stark anwächst und bei gleicher Lagerungsdichte im Modell größer ist als in der Natur.

Dagegen kann man für den Gebrauchszustand die im Modell gemessenen Kräfte und Verformungen nicht ohne weiteres auf die Natur übertragen. Eine Übertragung wäre nur dann möglich, wenn sowohl für den Versuchssand als auch für den im Modell herrschenden Spannungszustand die Spannungs-Dehnungs-Beziehung bekannt ist.

In Kap. 11 und 12 wird gezeigt, daß man auch in den Aushubzuständen vor dem Eintreten des Bruches qualitativ brauchbare Ergebnisse erhält.

4.2 Versuchsstand

4.2.1 Modell der Baugrube

An dem in der Versuchsanlage erstellten Modell einer Baugrube sollen möglichst alle in der Praxis auftretenden Einflüsse berücksichtigt werden können. Hierzu wurde in einem Versuchskasten eine 115 cm hohe Modell -

wand so angeordnet, daß vor und hinter der Wand der Versuchssand eingefüllt bzw. ausgehoben werden kann. Entsprechend den Ähnlichkeitsgesetzen simuliert die Modellwand eine 17 m hohe Baugrubenwand. Der Boden im Modell ist gewaschener, trockener Quarzsand mit einem Größtkorn von 2mm (Sieblinie siehe Bild 6).

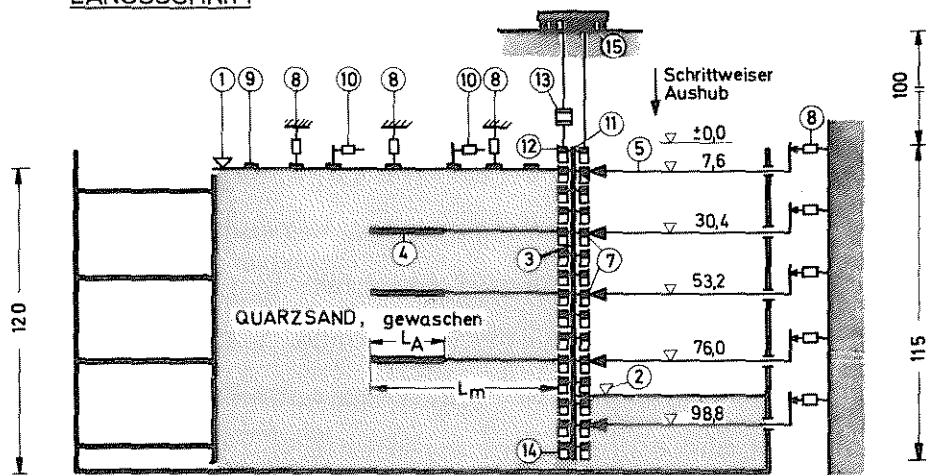
Bild 9 zeigt einen Blick auf die gesamte Versuchsanlage, bestehend aus Baugrubenmodell und Meßeinrichtung. Der Aufbau des Modells ist in Bild 5 schematisch dargestellt.

Die Modellwand (3) trennt im Kasten die rechts von der Wand liegende Baugrube vom hinter der Wand liegenden Boden. Um die Verteilung des Erddruckes auf die Wand messen zu können, ist die Wand in horizontale Lamellen (14) aufgegliedert. Jede einzelne Lamelle stellt in waagrechter Richtung einen Balken auf zwei Stützen dar, der durch den Druck des Sandes belastet wird und sich auf zwei vertikal angeordnete biegsame Vierkantstäbe (11) abstützt, die dem Gesamtverband ihre Biegesteifigkeit verleihen. Die gesamte Wand besteht aus zwei derartigen Gliedertafeln, die jeweils die Vorder- und Hinterseite der Wand darstellen. Die Auflagerkräfte einer jeden Lamelle können mit speziellen Kraftaufnehmern (Bild 8) gemessen werden, so daß der aktive Erddruck und der Erdwiderstand im Bereich des Wandfußes erfaßt werden.

Die Steifigkeit der Wand wird durch Austauschen der vertikalen Vierkantstäbe (11) variiert.

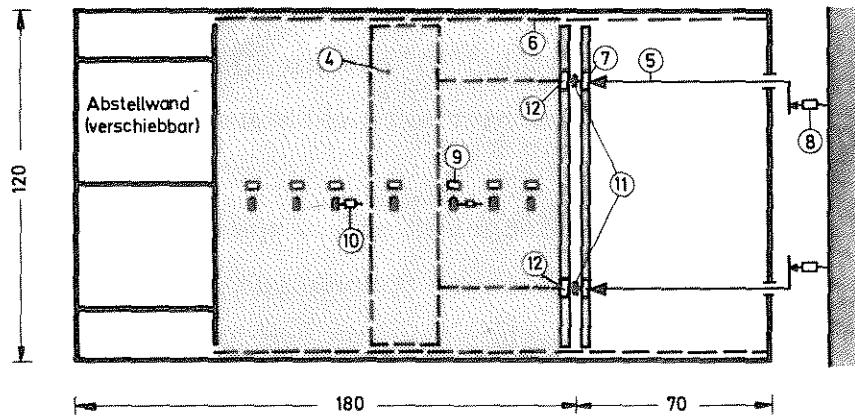
Die Anker bestehen aus Stahldrähten von 1,5 mm Durchmesser (4). Die Verankerungsstrecke wird durch dünne besandete Metallplatten simuliert. Die Metallplatten reichen über die gesamte Breite des Modells, um somit einen ebenen Verformungszustand herbeizuführen. Zur Messung der Ankerkräfte sind Kraftaufnehmer (7) in der Modellwand eingebaut. Der Wandreibungswinkel auf der aktiven Seite wird in drei verschiedenen Wandabschnitten durch die Messung der Kräfte in der Aufhängung der Wand ermittelt.

LÄNGSSCHNITT



GRUNDRISS

Maße in cm



- ① Füllungs - OK
- ② Aushubsohle ($t = 91,2 \text{ m}$)
- ③ Modellwand
- ④ Anker (dünne besadete Metallplatten und Ankerdrähte)
- ⑤ Taster zur Verformungsmessung
- ⑥ Flexible Gleitfolie
- ⑦ Kraftaufnehmer zur Messung der Anker
- ⑧ Induktive Wegaufnehmer zur Messung der Wandverformung
- ⑨ Induktive Wegaufnehmer zur Messung der Setzungen der Geländeoberfläche
- ⑩ Induktive Wegaufnehmer zur Messung der horizontalen Bewegungen der Geländeoberfläche
- ⑪ Vierkantstab (Biegesteifigkeit der Wand)
- ⑫ Kraftaufnehmer zur Messung des Erddruckes
- ⑬ Kraftaufnehmer zur Messung der Vertikalkräfte
- ⑭ Gliedertafel mit Lamellen
- ⑮ Rollenlager

			Modell	umgerechnet auf die Wirklichkeit *)
Wandhöhe	H	cm	115,0	17,2
Wandsteifigkeit	J	cm^4/m	0,48	27 400
Anzahl der Anker	—		2, 3	2, 3
Ankerabstand	A	m	0,456 ; 0,228	6,8 ; 3,4
Ankerlänge	L_m	m	0,495 ; 0,595	7,5 ; 9,0
Verankerungstrecke	L_A	m	0,1 ; 0,2	1,5 ; 3,0
max. Aushubtiefe im Mittel	T	m	0,988	14,8

*) Umrechnung mit $\lambda_L = \frac{L_N}{L_M} = 15$; $\frac{Y_N}{Y_M} = \frac{1,85}{1,61}$ (Kap. Nr. 4.1.1)

Bild 5: Schema der Versuchswand

4.2.2 Versuchssand

Das Trockenraumgewicht des Quarzsandes beträgt bei lockerster Lagerung rund $1,51 \text{ Mp/m}^3$ und bei dichtester Lagerung rund $1,77 \text{ Mp/m}^3$. Der Sand wurde lagenweise in den Versuchskasten eingebaut. Dabei wurde besonders darauf geachtet, daß eine gleichmäßige Lagerungsdichte des Sandes erreicht wurde. Im Mittel stellte sich ein Raumgewicht von $1,60 \text{ Mp/m}^3$ ein. Dies entspricht einem Porenvolumen von $n = 0,4$ und einer Lagerungsdichte von $D_v = 0,35$.

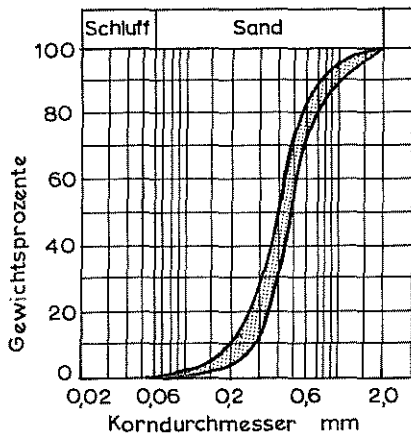
Diese Lagerungsdichte (locker bis mitteldicht) hat sich als besonders günstig erwiesen, da der Reibungswinkel ρ nur im Mittel $39^\circ - 40^\circ$ beträgt und somit der Bruchzustand leichter erreicht wurde.

Der Reibungswinkel wurde von Wanoschek in einem speziellen Rahmenschergerät für die im Modell herrschenden Spannungen ermittelt. Der Reibungswinkel ergab sich für Normalspannungen von $\sigma = 0,53 \text{ Mp/m}^2$ zu $\rho = 40,5^\circ$ bei $\sigma = 2,13 \text{ Mp/m}^2$ zu $\rho = 39,5^\circ$. Locker eingebauter Sand lieferte bei einer Normalspannung von $0,53 \text{ Mp/m}^2$ einen Wert von $\rho = 36^\circ$.

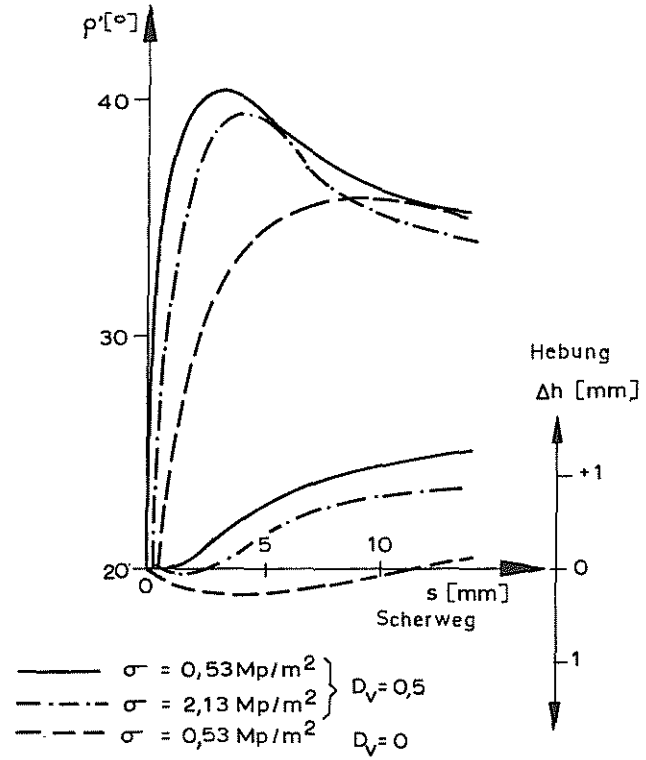
Außerdem kann man den Reibungswinkel aus der Neigung der Gleitflächen (Bild 6), die sich hinter den Anker ausbilden, feststellen. Dies gilt für den Fall, daß die Ankerlänge mit der Tiefe abnimmt und sich eine aktive Rankine'sche Zone bildet. Für den Fall gleichlanger Anker bildet sich ebenfalls hinter den Anker ein dreieckförmiger Gleitkörper aus.

4.2.3 Einfluß der Seitenreibung

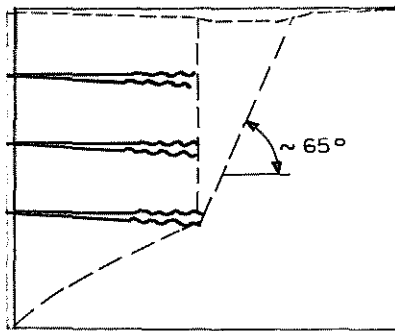
Um die Seitenreibung zu vermindern, wurden die Seitenwände mit Folien belegt. Eine Folie bestand jeweils aus zwei Lagen Latexgummi (1. Lage $0,5 \text{ mm}$ dick, 2. Lage $0,3 \text{ mm}$ dick), die eine besondere Schmiermasse einschließen. Diese Schmiermasse besitzt keine Kohäsion und ruft folglich keinen bleibenden Widerstand in den Gleitfolien hervor.



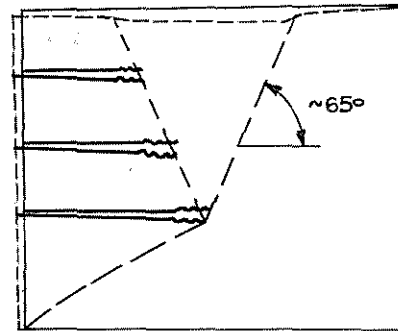
Sieblinie



Ergebnisse der Scherversuche (37)



Versuch Nr. 55
3 gleichlange Anker



Versuch Nr. 51
mit der Tiefe zunehmende
Ankerlänge

— — — — — Gleitflächen
- - - - - verformter Erdkörper

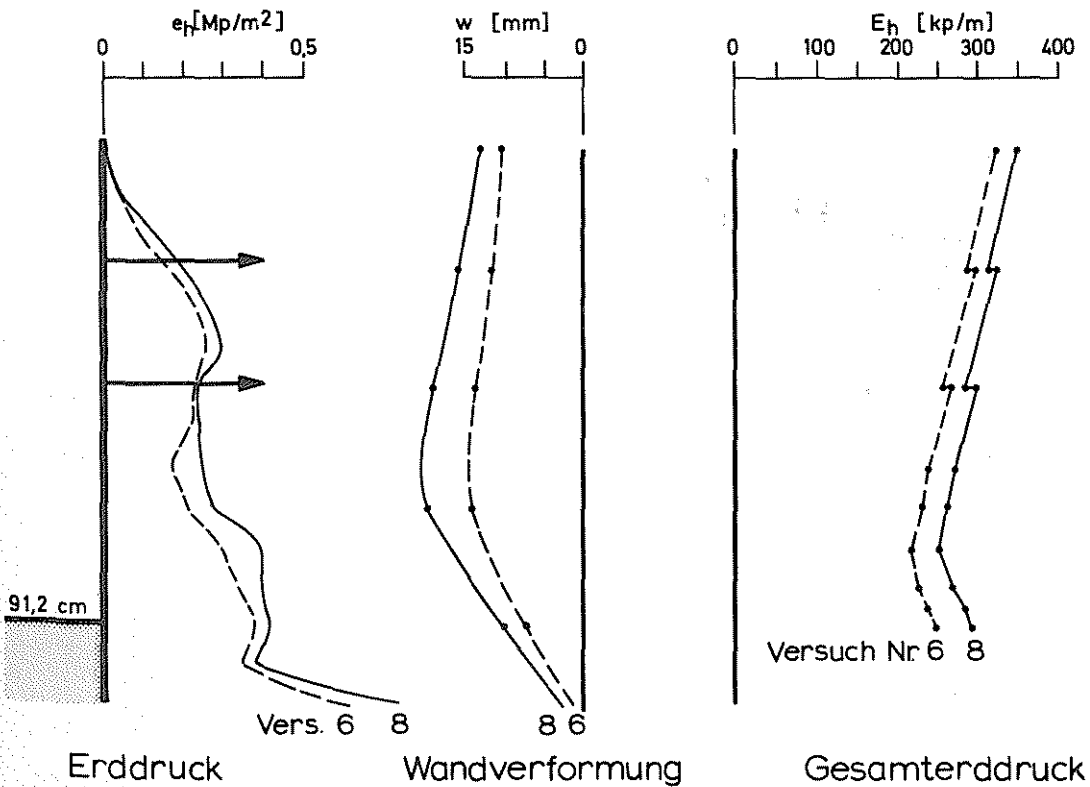
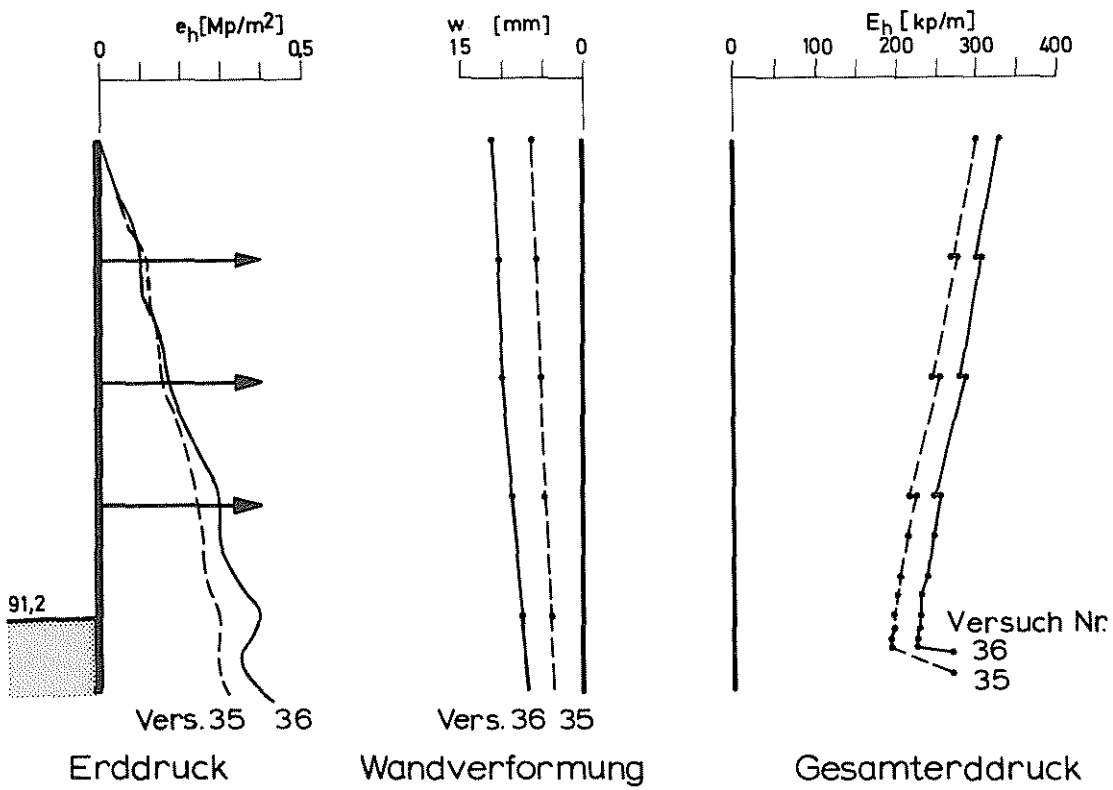
Bild 6: Kennwerte des Versuchssandes

Der Reibungswinkel wurde zu 1° ermittelt (37).

Der Einfluß der Seitenreibung wird durch den Vergleich zweier Versuche (Bild 7) ersichtlich. Beim ersten Versuch wurden die Seitenwände mit den Folien belegt. Beim zweiten Versuch wurden die Folien weggelassen und der Sand hatte direkten Kontakt mit den Glasscheiben der Seitenwände.

Zu Beginn der Versuchsserie wurde der Einfluß der Seitenreibung durch die Versuche Nr. 6 (ohne Schmierung) und Nr. 8 (mit Schmierung) ermittelt. Die Ergebnisse der Versuche Nr. 6 und Nr. 8 sind jeweils durch Wiederholungsversuche gesichert. Da sich die Durchführung der Versuche über ein Jahr erstreckte, wurde der Einfluß der Seitenreibung zu einem späteren Zeitpunkt (9 Monate später) durch die Versuche Nr. 35 (ohne Schmierung) und Nr. 36 (mit Schmierung) (Bild 7) überprüft. Gegenüber den Versuchen Nr. 6 und Nr. 8 konnte keine wesentliche Änderung festgestellt werden. Die Gummifolien waren durch Alterung nicht versprödet. Der Unterschied im Gesamterddruck liegt bei beiden Versuchsserien bei 13 % bzw. 14 %. Außerdem haben die Kurven für den Gesamterddruck bei jeder Aushubtiefe den gleichen Abstand. Dies besagt, daß der Einfluß der Seitenreibung in jeder Aushubstufe gleich groß ist und sich durch Erddruckumlagerungen nicht verändert.

Wie auf Bild 7 (Erddruckverteilung) ersichtlich ist, sind die Erddruckordinaten bei Versuch Nr. 8 größer als bei Nr. 6. Die Erddruckverteilung dagegen ist bei den Versuchen Nr. 6, Nr. 8 und Nr. 35, Nr. 36 nahezu gleich. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Arthur/Roscoe (1965) überein, die experimentell festgestellt haben, daß der Sand an der Glaswand eines Modells die gleichen Verformungszustände aufweist, wie in der Längsebene des Modells, und daraus gefolgert haben, daß auch die Spannungsverteilung im Modell durch die Seitenreibung nicht wesentlich beeinflusst wird. Der Einfluß der Seitenreibung wirkt sich besonders stark auf die Verformung der Wand und des Bodens aus. Die Verformung bei den Versuchen Nr. 8 und Nr. 36 ist max. 35 % bzw. 37 % größer



Einfluss der Seitenreibung bei 2 und 3 Anker

- - - - - Versuche Nr. 6 Nr. 35 ohne Gleitfolie
 ————— Versuche Nr. 8 Nr. 36 mit Gleitfolie

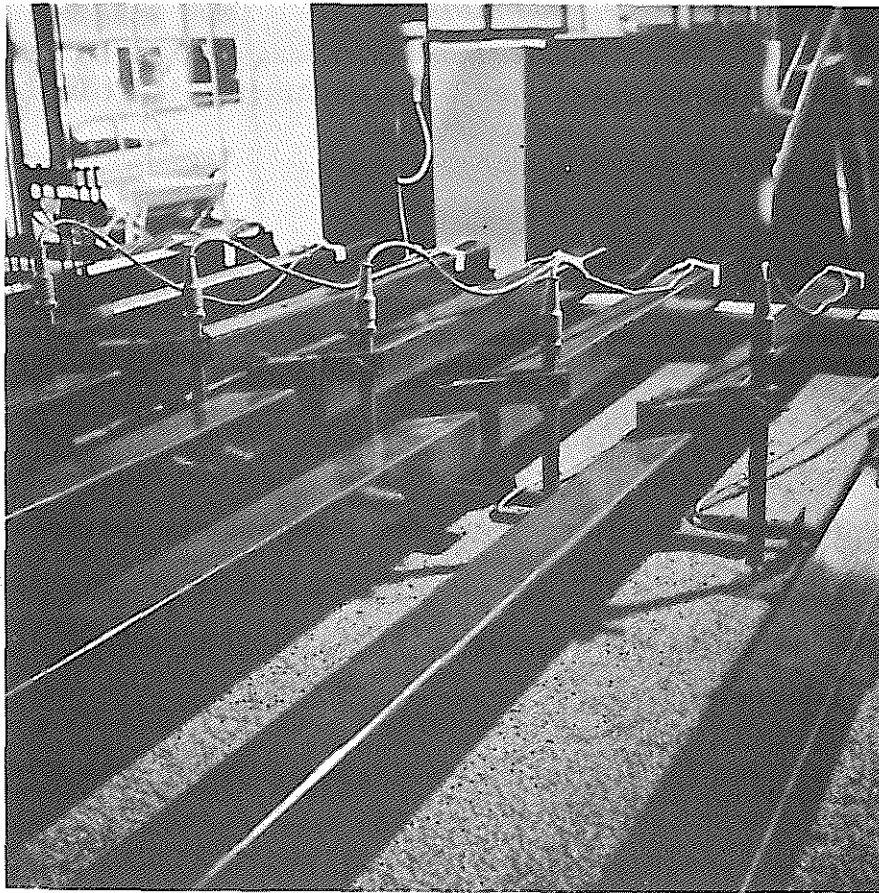
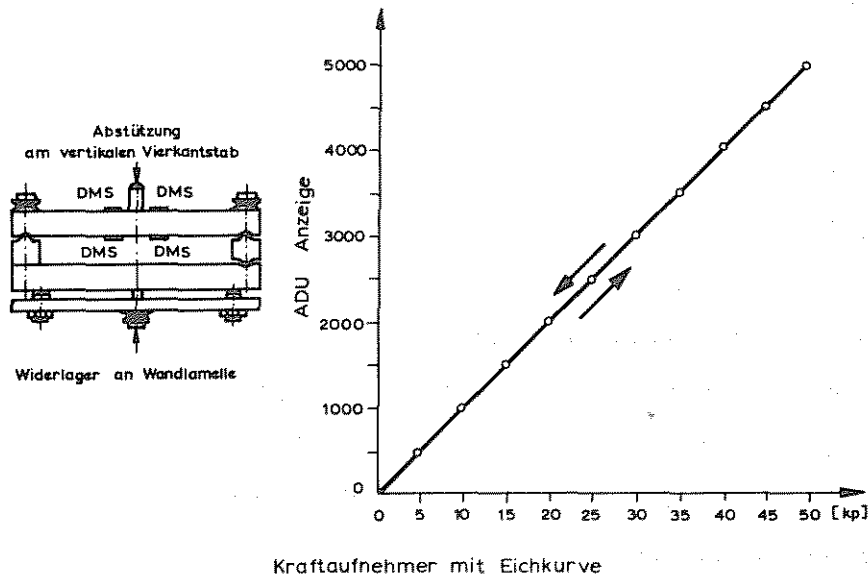
Bild 7: Einfluß der Seitenreibung

als bei den Versuchen Nr. 6 und Nr. 35. Qualitativ hat sich am Verlauf der Wandverformungen und der Setzungsmulde nichts geändert. Die Verformungen haben nur stark zugenommen.

4.3 Meßwertaufnehmer

4.3.1 Kraftaufnehmer

Die Auflagerkräfte der einzelnen Wandlamellen werden mit Hilfe von besonders flach gebauten Kraftaufnehmern (Bild 8), die im Institut für Bodenmechanik und Grundbau entwickelt und hergestellt wurden, gemessen. Der Kraftaufnehmer ist ein auf zwei Schneidenlagern statisch bestimmt gelagerter Biegebalken, auf den vier Dehnmeßstreifen von 3 mm Gitterlänge geklebt und zu einer Vollbrücke geschaltet sind. Die Vollbrückenschaltung verbürgt größtmögliche Unempfindlichkeit gegen Temperaturschwankungen und ungewollte Längs- und Querbeanspruchung und liefert im Vergleich zum Einzelstreifen das vierfache Meßsignal. Die gesamte Vollbrücke mit Verkabelung ist mit einem Abdeckkitt abgedeckt, um die DMS gegen Luftfeuchtigkeit und plötzliche Temperaturschwankungen abzuschirmen. Von jedem Kraftaufnehmer wurde vor dem Einbau in die Modellwand die Kennlinie (Eichkurve) ermittelt (Bild 8). Das Auflösungsvermögen eines Kraftaufnehmers beträgt rund 10 P/Skt. Eine spezielle Auswertung aller 54 durchgeführten Versuche ergab eine absolute mittlere Abweichung der Nullwerte eines Gebers zwischen Beginn und Ende eines Versuches von 14 Skt. Dies entspricht einer Unsicherheit von ± 7 Skt. (entsprechend 70 P) Ablesung. Da jede Lamelle bei einer Fläche von $0,091 \text{ m}^2$ auf zwei Gebern gelagert ist, beträgt der absolute Fehler in der Erddruckanzeige $2 \times 0,070/0,091 = 1,54 \text{ kp/m}^2$ oder $0,0015 \text{ Mp/m}^2$. Der relative Meßfehler beträgt somit 0,6 % bei einer gemittelten Erddruckordinate von $0,25 \text{ Mp/m}^2$. Der Meßfehler bleibt also damit knapp unter 1 %. Bei den Versuchen von Wanoschek betrug der Meßfehler 1,5 % bei der Erddruckordinate, dies liegt daran, daß der damals verwendete Meßverstärker inzwischen durch einen neuen Meßverstärker mit höherem Auflösungsvermögen und geringerer Temperaturempfindlichkeit ersetzt wurde.



Anordnung der induktiven Wegaufnehmer an der Bodenoberfläche

Bild 8: Kraftaufnehmer und Wegaufnehmer

Weiterhin hat sich bei allen Versuchen gezeigt, daß im Endaushub das Gleichgewicht der Horizontalkräfte $\sum H = 0$ im Mittel mit einem Fehler von 0,6 % erfüllt ist.

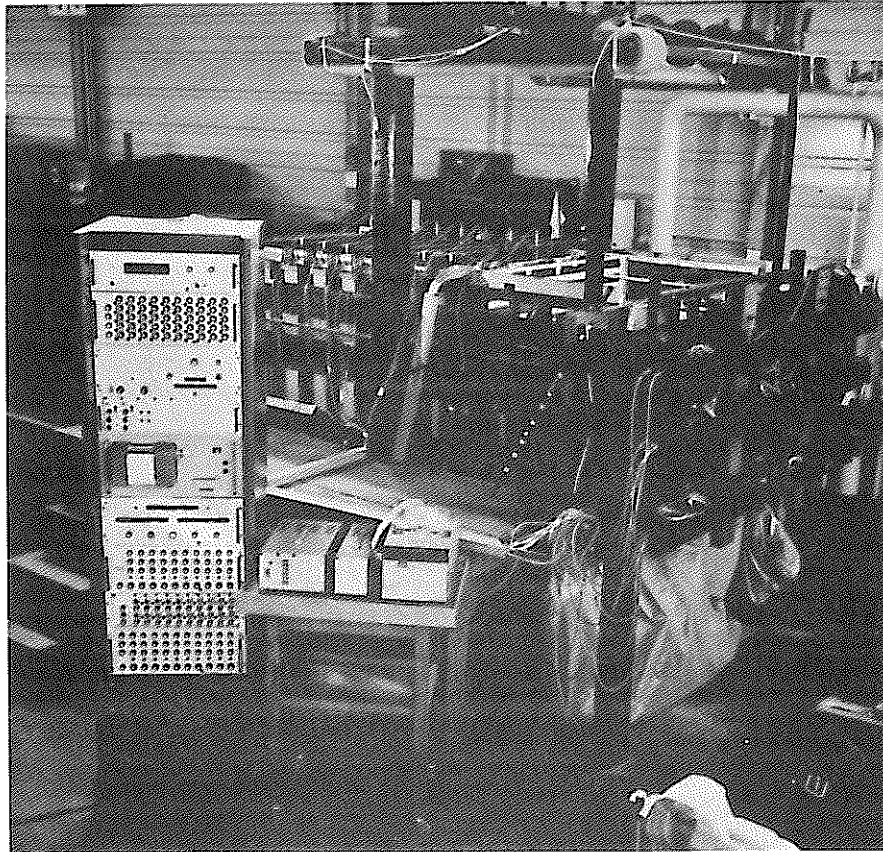
4.3.2 Wegaufnehmer

Während der einzelnen Aushubzustände werden die Verformung der Wand, die Setzung und Horizontalverschiebung der Bodenoberfläche hinter der Wand gemessen. Die Anordnung der für diese Messungen verwendeten induktiven Wegaufnehmer ist in **B i l d 5** schematisch dargestellt. Zur Setzungsmessung werden acht Wegaufnehmer vertikal über der Bodenoberfläche angeordnet, deren Tastspitzen die Pegel auf der Oberfläche abtasten. Sieben weitere Wegaufnehmer nehmen die horizontale Bodenverschiebung auf. Sie wurden horizontal direkt über der Bodenoberfläche angeordnet und tasten gegen abgewinkelte, auf der Bodenoberfläche befestigte Anschläge. **B i l d 8** zeigt einen Blick auf die Anordnung der Wegaufnehmer. Die Meßgenauigkeit der Wegaufnehmer beträgt im Mittel 1/100 mm.

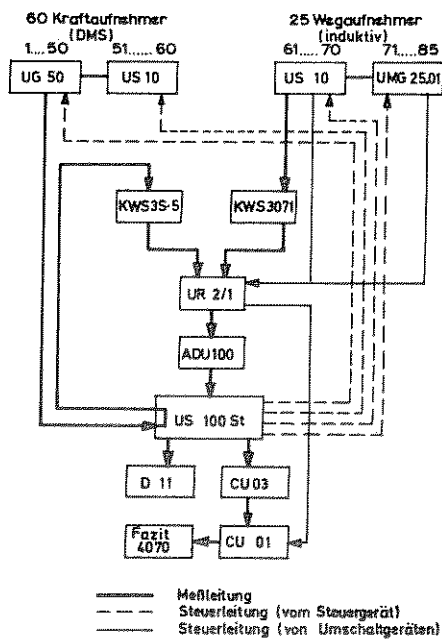
4.4 Registrierung der Meßwerte und Auswertung

Als Meßgrößen treten Kräfte und Wege auf. Um die Meßwerte in den Dimensionen Kp bzw. mm zu erhalten, werden zwei Meßkanäle mit je einem Meßverstärker angeordnet. Die Meßwerte können mit Hilfe der Meßverstärker entsprechend den Dimensionen der Meßgröße kalibriert werden. **B i l d 9** zeigt die Versuchsanlage mit Modellwand und Meßturm. Das Funktionsschema der gesamten Meßanlage ist als Blockschaltbild (**B i l d 9**) aufgezeichnet.

Mit Hilfe dieser Meßanlage werden die 85 Meßstellen am Modell vollautomatisch abgefragt. Die Meßwerte werden sowohl gedruckt als auch auf Lochstreifen gestanzt. Eine Ablesung von Hand ist nicht erforderlich. Pro Versuch fallen ca. 1.600 - 2.000 Meßwerte an. Die weitere Auswertung der Meßwerte erfolgt durch einen Computer, der die Ergebnisse aus-



Versuchsanlage



Blockschaltbild

Bild 9 : Versuchsanlage und Blockschaltbild der Meßeinrichtung

druckt und alle für die Auswertung erforderlichen Diagramme aufzeichnet (siehe Computerzeichnungen im Anhang). Es werden für jeden Aushubschritt, die Erddruckverteilung, die Ankerkräfte, der Gesamterddruck, die Wandbewegung, die Setzung und die Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche, die Wandreibung und die Biegemomente in Abhängigkeit von der Aushubtiefe aufgetragen.

4.5 Versuchsdurchführung

Zu Versuchsbeginn hängt die Modellwand völlig frei im Versuchskasten. In diesem Zustand werden die Nullwerte aller Kraftaufnehmer und die Nullwerte der induktiven Wegaufnehmer zur Messung der Wandbewegung registriert. Dann werden die Gleitfolien zur Verringerung der Seitenreibung an den Seitenwänden eingehängt und mit dem Einfüllen des Sandes begonnen.

Vor und hinter der Wand wird der Sand in gleichmäßigen Lagen von ca. 4 cm Dicke eingefüllt. In den vorgesehenen Höhen werden besandete Ankerplatten eingelegt. Die Ankerdrähte werden durch die Modellwand geführt, aber noch nicht mit ihr verbunden. Nach dem Einfüllen des Sandes werden wieder die Wegaufnehmer für die Wandverformung abgefragt, um zu überprüfen, ob sich die Wand während des Einfüllens verschoben hat. Anschließend werden die Pegel und die induktiven Wegaufnehmer zur Messung der Verformungen der Geländeoberfläche aufgebaut und justiert.

Danach werden alle Meßwerte der Wegaufnehmer, der Erddruckgeber und der Geber für die Wandaufhängung registriert. Letztere ergeben den Ruhedruck nach Größe und Richtung.

Nun beginnt der schrittweise Aushub des Sandes vor der Wand. Bei Erreichen der einzelnen Ankerlagen werden die Ankerdrähte an der Modellwand befestigt und vorgespannt. Nach dem Vorspannen werden jeweils die Meßwerte von allen Meßstellen registriert.

Der Versuchsablauf entspricht damit dem üblichen Aushub einer Baugrube. In der Praxis werden in bestimmten Aushubtiefen die Anker gerammt oder gebohrt und nach Erhärten der Verpresskörper vorgespannt.

Mit zunehmendem Aushub fällt der Erddruck durch die Aktivierung der Scherfestigkeit ab, bis er in einer bestimmten Aushubtiefe ein ausgeprägtes Minimum hat. Danach nimmt er wieder zu. Die Verformungen der Wand und des Bodens nehmen bis zu dieser Aushubstufe nahezu linear zu, dann ist die Zunahme überproportional und es werden jetzt die Gleitfugen an der Geländeoberfläche sichtbar.

Der Bruch des Gesamtsystems Wand- Boden- Anker beginnt in der Aushubtiefe, bei der der Erddruck ein Minimum annimmt und ist gleichzeitig mit der Zunahme der Verformungen verbunden.

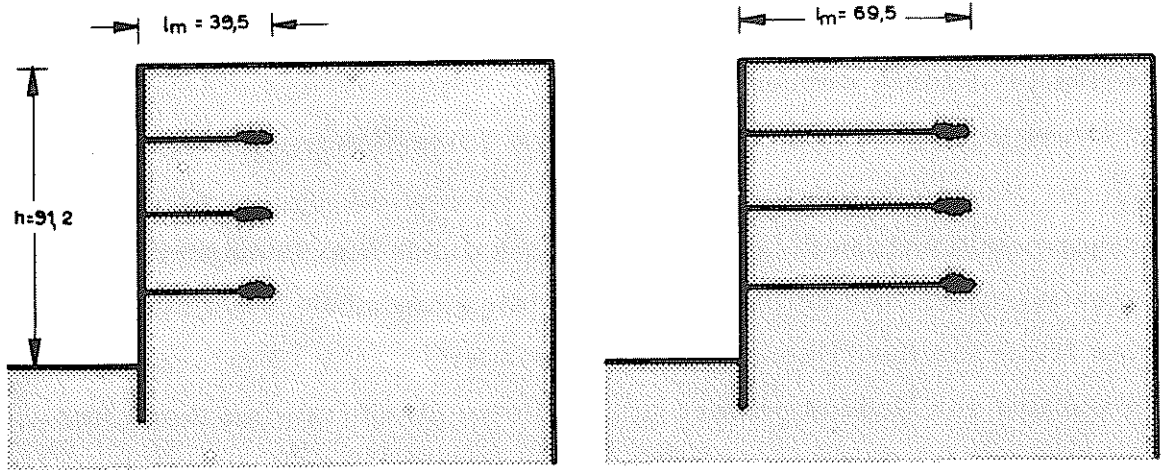
5. Versuchsprogramm

Bild 10 zeigt die untersuchten Ankeranordnungen. In einer ersten Serie werden drei verschiedene Arten der Ankeranordnung untersucht.

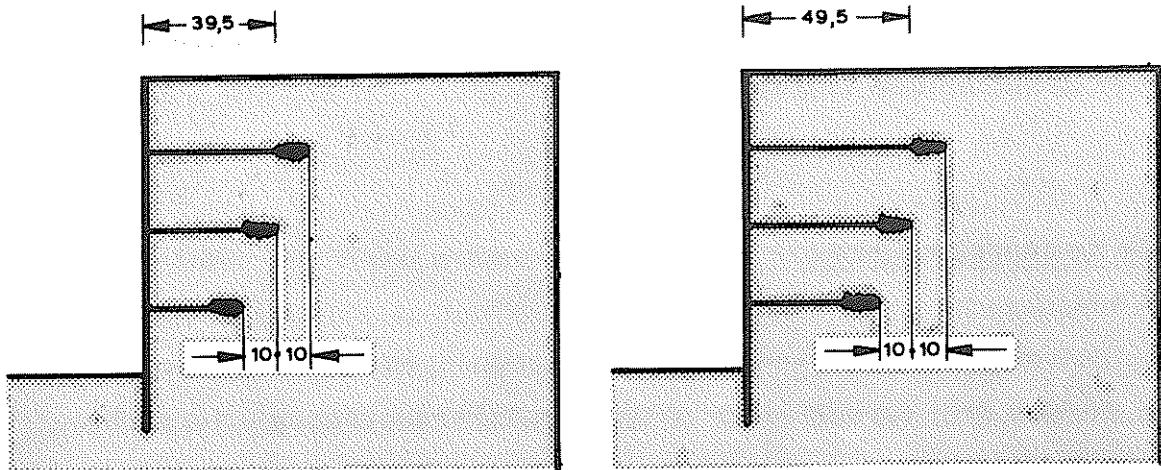
1. Ankeranordnung I: drei gleichlange Anker
2. Ankeranordnung II: Ankerlänge mit der Tiefe abnehmend
3. Ankeranordnung III: Ankerlänge mit der Tiefe zunehmend

Die Verankerungsstrecke l_A ist bei den Versuchen jeweils 10 cm lang. Bei der Ankeranordnung I wird die Ankerlänge l_m von 39,5 cm in Schritten von 10 cm bis auf 69,5 cm variiert. Bei den Ankeranordnungen II und III beträgt die Länge des mittleren Ankers 39,5 cm und 49,5 cm.

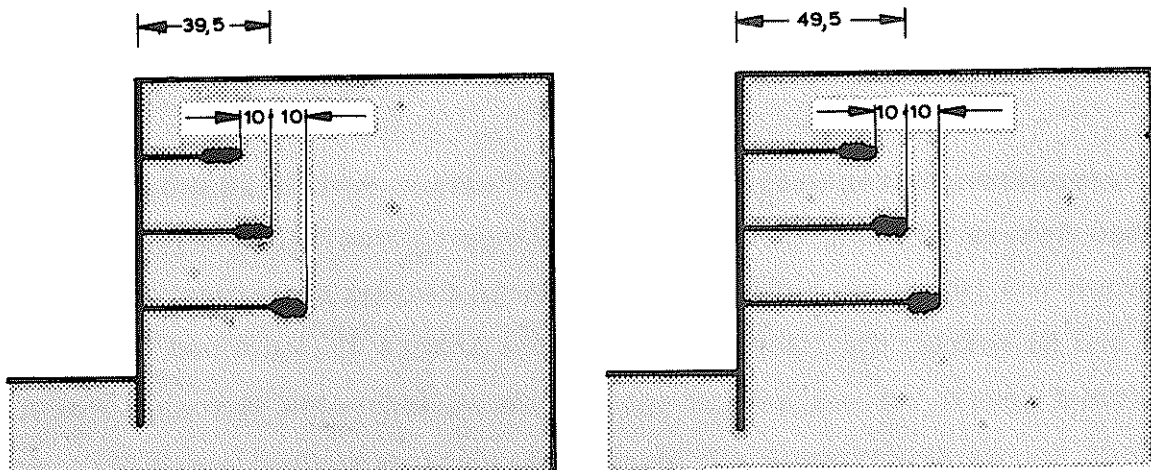
Weiterhin werden zwei verschiedene Aushubvorgänge (Bild 11) simuliert. Bei Aushubvorgang I wird der Boden bis in Höhe der jeweiligen Ankerlage ausgehoben. Dann wird der Anker mit der Wand verbunden und ent-



Ankeranordnung I (Variation der Ankerlänge l_m in Schritten von 10 cm von 39,5 bis 69,5 cm)

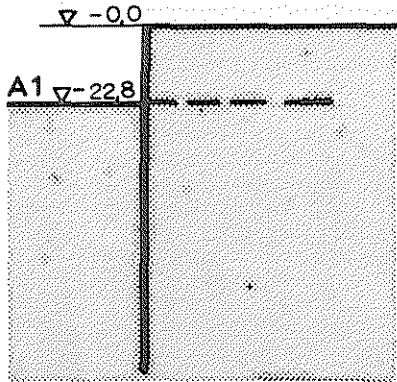


Ankeranordnung II (Ankerlänge mit der Tiefe abnehmend)

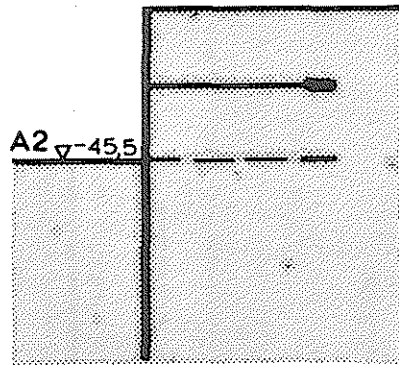


Ankeranordnung III (Ankerlänge mit der Tiefe zunehmend)

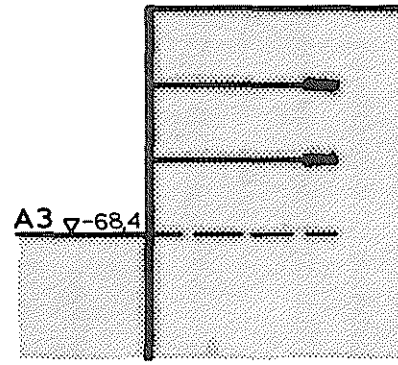
Bild 10: Versuchsprogramm (Maße in cm)



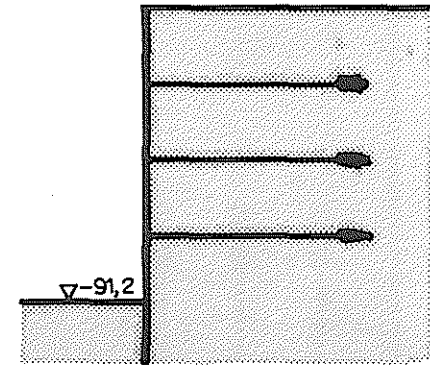
Anspannen von A1



Anspannen von A2

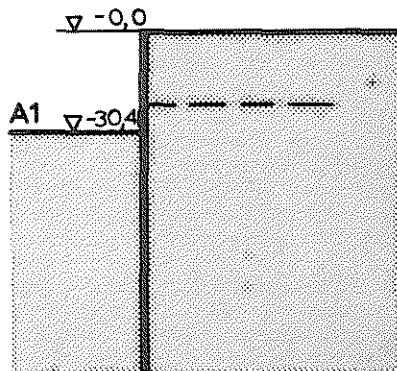


Anspannen von A3

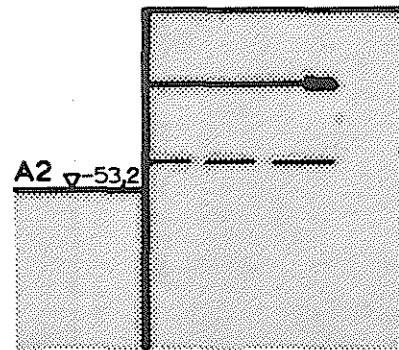


Endaushub

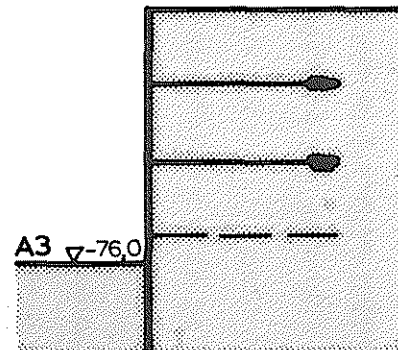
Aushub



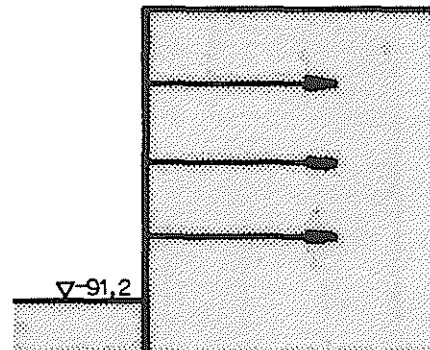
Anspannen von A1



Anspannen von A2



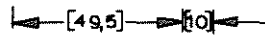
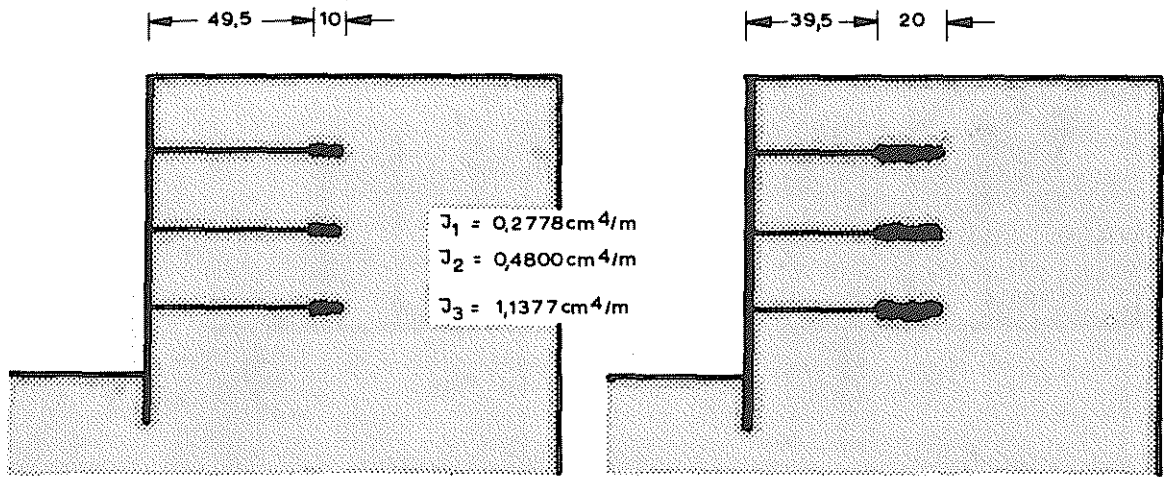
Anspannen von A3



Endaushub

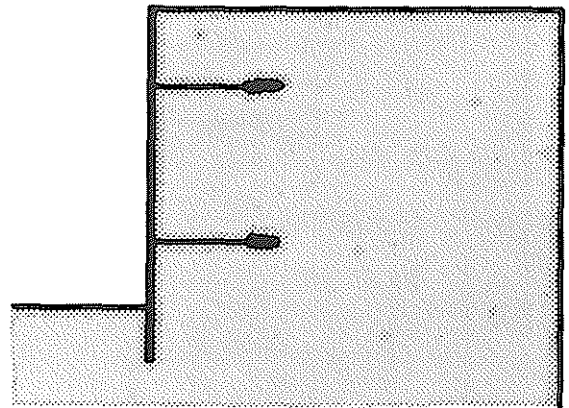
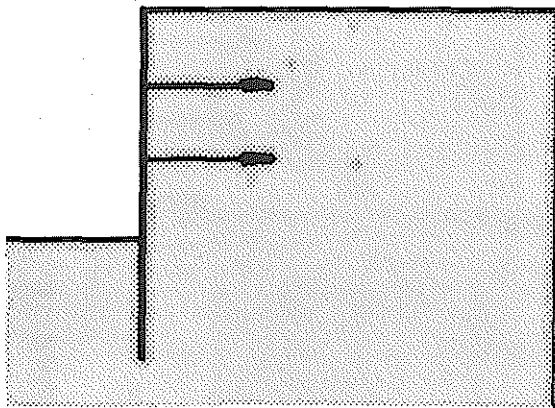
Aushub mit Voreilung

Bild 11: Aushubvorgänge

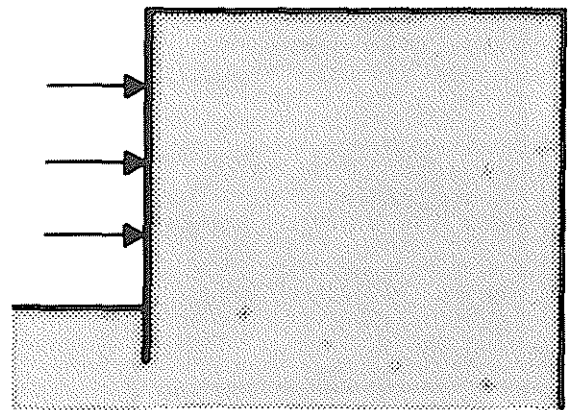
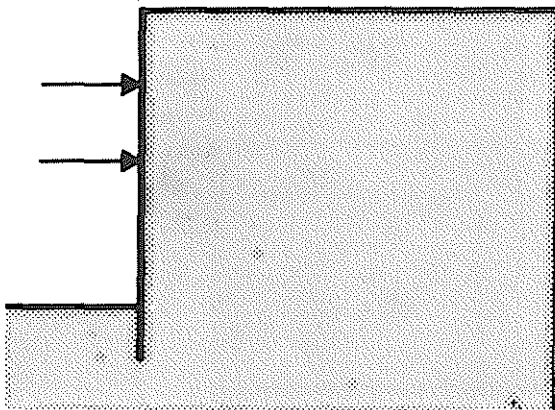


[] Ankerlänge bei Serie 3: Variation der Wandsteifigkeit

Variation der Ankerplattenlänge



Versuche mit 2 Anker mit Variation der Ankerlage



Versuche mit 2 und 3 Steifen

Bild 12: Sonderversuche

sprechend dem gewünschten Vorspannungsgrad vorgespannt. Ein Voreilen des Aushubs von 7,6 cm wird bei dem Aushubvorgang II nachgeahmt. In der Praxis ist es üblich, den Aushub 1 - 2 m voreilen zu lassen.

In einer 2. und 3. Serie wird der Einfluß der Vorspannung und der Biegesteifigkeit untersucht. Außerdem werden einige Sonderversuche gemacht. (Bild 12), in denen der Einfluß der Ankeranordnung und der Verankerungslänge untersucht wird.

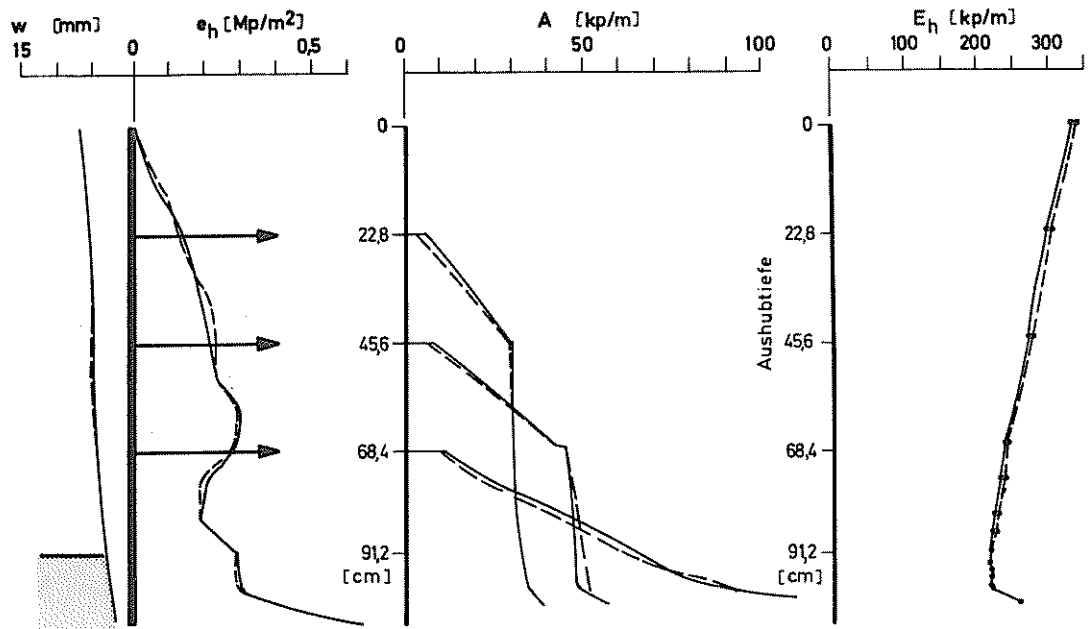
Um den Unterschied zwischen einer ausgesteiften und verankerten Wand zu verdeutlichen, werden vergleichbare Versuche mit einer zwei- bzw. dreifach ausgesteiften Wand durchgeführt. (Bild 12). Die Art der Modellsteifen ist in der Arbeit von W a n o s c h e k (1971) ausführlich beschrieben. Die Höhenlage der einzelnen Anker und Steifen wird bei allen Versuchen beibehalten. Bei den Versuchen mit zwei Ankern ist die Anordnung der Anker die gleiche wie bei den Versuchen mit drei Ankern, nur daß jeweils der zweite bzw. der dritte Anker weggelassen wird.

6. Wiederholungsversuche (Reproduzierbarkeit)

Um die durch die Versuchsdurchführung hervorgerufenen Streuungen in den Ergebnissen abschätzen zu können, wurden systematisch nach den einzelnen Versuchsserien Wiederholungsversuche eingeschaltet. Dabei wurde darauf geachtet, daß zwischen den Wiederholungsversuchen mehrere andere Versuche lagen.

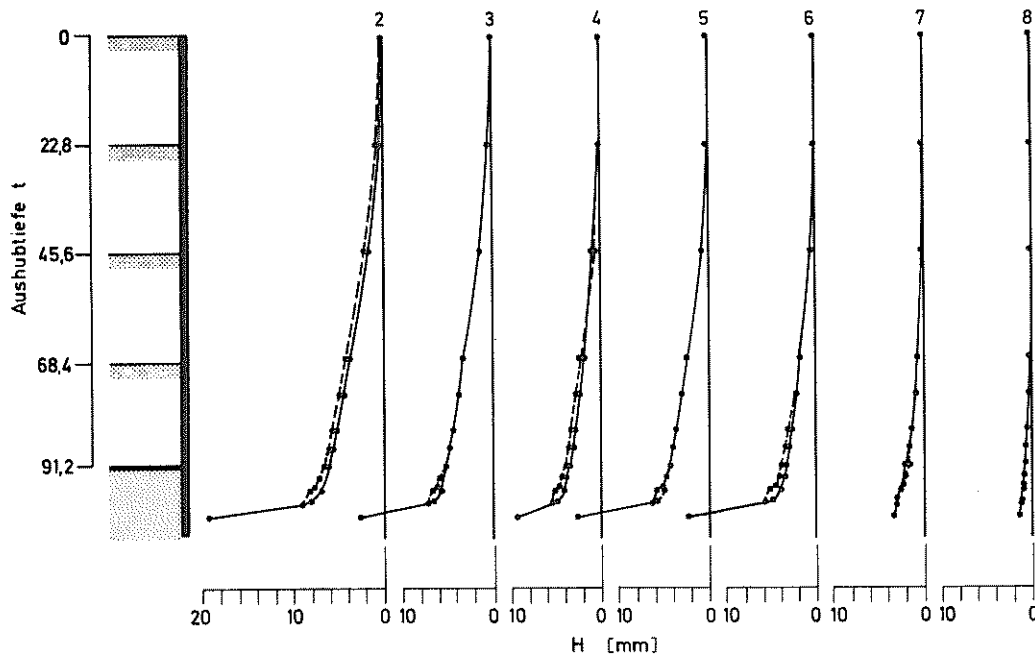
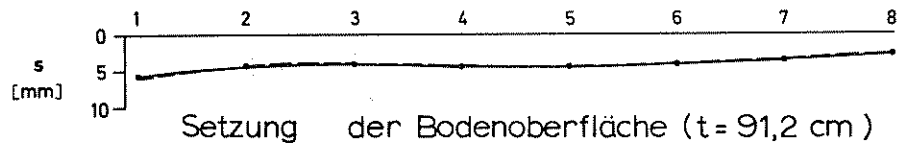
Wiederholungsversuche sind die Versuche Nr. 7, 8, die Versuche Nr. 17, 25, die Versuche Nr. 38, 48, die Versuche Nr. 20, 58 und die Versuche Nr. 27, 28.

Anhand der Versuche Nr. 38 und Nr. 48 mit einer Ankervorspannung von ca. 80 % und die Versuche Nr. 27 und Nr. 28 ohne Vorspannung wurde die Reproduzierbarkeit überprüft.



Wandverformung
Erddruck

Ankerkräfte und Gesamterddruck
während des Aushubs



Horizontalverschiebung der Bodenoberfläche
während des Aushubs

Wiederholungsversuche mit 3 Anker ohne Vorspannung

— — — Versuch Nr. 27
— — — Versuch Nr. 28

Bild 13: Reproduzierbarkeit

(Versuche Nr. 27 und Nr. 28)

Die Auswertung aller Wiederholungsversuche brachte für den Gesamterddruck eine mittlere Abweichung von $\frac{\Delta E_h}{E_h} = 1,6 \%$, für die Ankerkräfte $\frac{\Delta AN}{AN} = 4,3 \%$ und für die Wandverformung $\frac{\Delta W}{W} = 5,4 \%$.

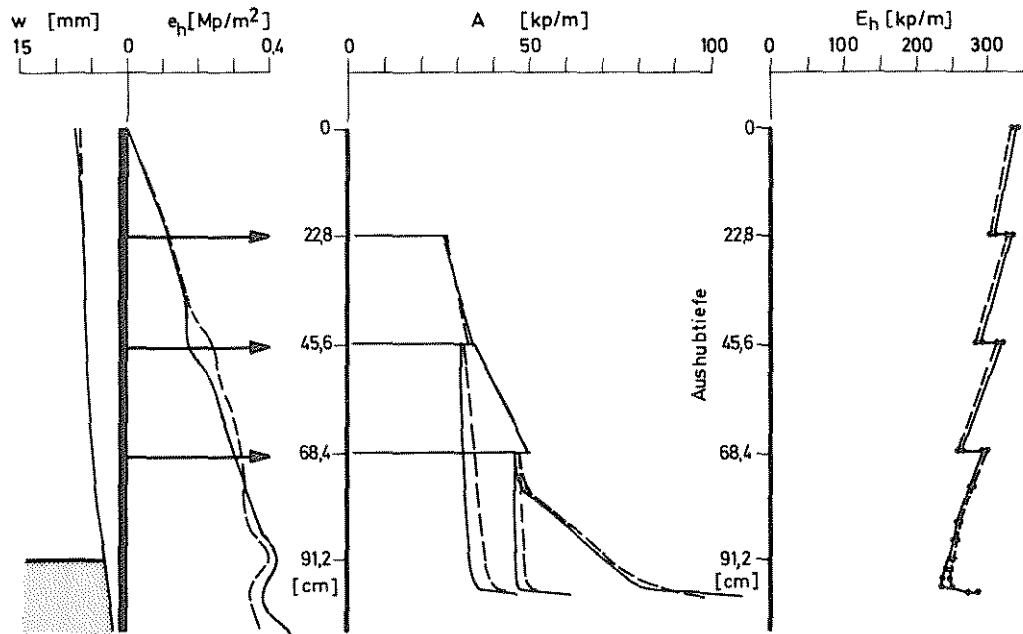
Die Erddruckverteilungen waren bei allen vergleichbaren Aushubschritten nahezu identisch. Auf Bild 13 und 14 ist die Erddruckverteilung für die Aushubstufe $t = 91,2$ cm aufgetragen. Der Gesamterddruck stimmte bei den Versuchen Nr. 27, 28 (220,5 kp/m gegenüber 219,8 kp/m) und Nr. 38, 48 (253,0 kp/m gegenüber 246,6 kp/m) gut überein.

Bei den Versuchen Nr. 27 und Nr. 28 nahm der Erddruck unterhalb des letzten Ankers stärker ab, als bei den Versuchen Nr. 38 und Nr. 48. Dieser Unterschied in der Erddruckverteilung kam daher, daß die Wandsteifigkeit bei den Versuchen Nr. 27 und Nr. 28 wesentlich geringer war als bei den Versuchen Nr. 38 und Nr. 48.

Die Abweichungen bei den Ankerkräften von 5 % (Versuch Nr. 27, 28) und 6 % (Versuch Nr. 38, 48) lag etwas über dem Mittelwert von 4,3 %.

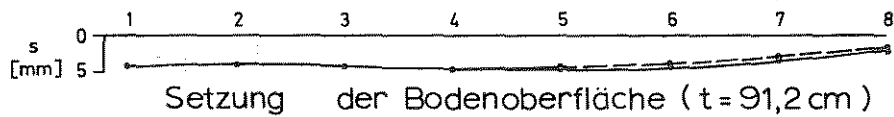
Die Übereinstimmung bei der Wandverformung war mit einer mittleren Abweichung von 5,4 % (bei den Versuchen Nr. 27, 28 mit 3 % und bei Nr. 38, 48 mit 5,4 %) nicht so gut wie beim Erddruck und den Ankerkräften. Dies lag daran, daß sich das System Wand-Boden-Anker ohne Behinderung verformen konnte und diese Verformung allein von der Lagerungsdichte des Sandes beeinflußt wurde.

Bei den Versuchen Nr. 48, 38 betrug die Differenz der Raumgewichte auf der aktiven Seite $\Delta \gamma_A = 1,602 - 1,598 = 0,004 \text{ Mp/m}^3$ und auf der passiven Seite $\Delta \gamma_P = 1,609 - 1,597 = 0,011 \text{ Mp/m}^3$. Dies war eine Abweichung von weniger als 1 % vom mittleren Raumgewicht $\gamma = 1,600 \text{ Mp/m}^3$. Bezogen auf die Lagerungsdichte bedeutete dies

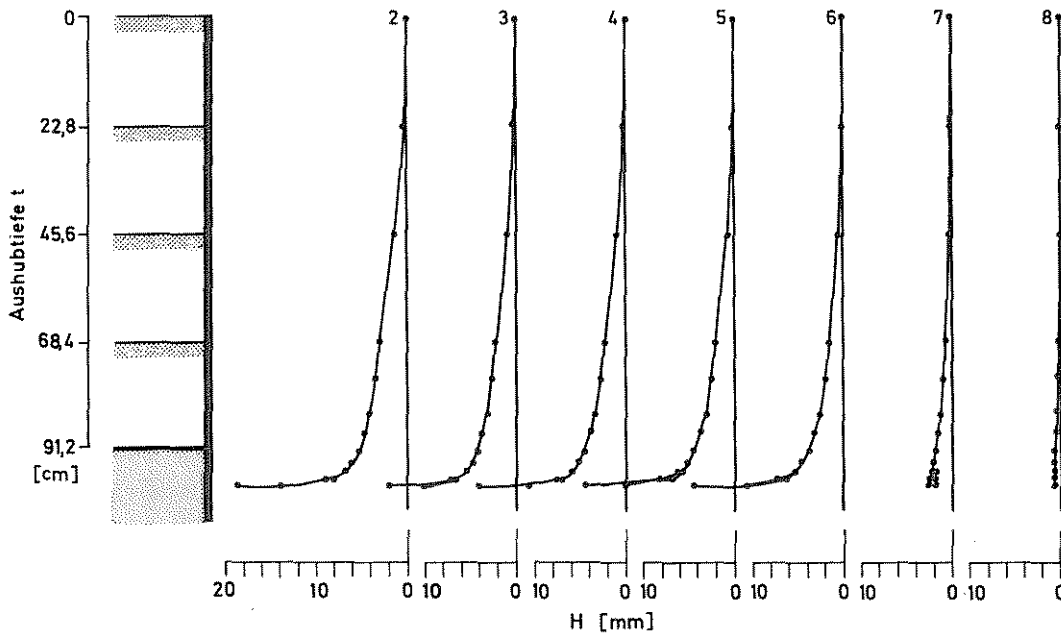


Wandverformung
Erddruck

Ankerkräfte und Gesamterddruck
während des Aushubs



Setzung der Bodenoberfläche ($t = 91,2$ cm)



Horizontalverschiebung der Bodenoberfläche
während des Aushubs

Wiederholungsversuche mit 3 Anker bei einer
Vorspannung von 80 %

--- Versuch Nr. 38
— Versuch Nr. 48

Bild 14: Reproduzierbarkeit
(Versuche Nr. 38 und 48)

für die aktive Seite eine Abweichung $\frac{\Delta D_{va}}{D_v} = 3 \%$ für die passive Seite dagegen von $\frac{\Delta D_{vp}}{D_v} = 13 \%$. Die Wandverformung des Versuches Nr. 48 war größer als die des Versuches Nr. 38 (mittlere Wandverformung $W_{38} = 5,0$ mm gegenüber $W_{48} = 5,24$ mm), da die Lagerungsdichte bei Versuch Nr. 38 kleiner war als bei Versuch Nr. 48.

Bei den Versuchen Nr. 27, 28 war der Unterschied bei der Lagerungsdichte geringer $\frac{\Delta D_{va}}{D_v} = 3 \%$ und $\frac{\Delta D_{vp}}{D_v} = 3,4 \%$.

Daher war hier die Übereinstimmung etwas besser ($\frac{\Delta W}{W} = 3 \%$). (mittlere Wandverformung $W_{27} = 5,44$ mm gegenüber $W_{28} = 5,60$ mm).

Abschließend kann man sagen, daß die Versuche bei der hier gewählten Lagerungsdichte sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht vergleichbar sind. Zumal die Ergebnisse der wichtigsten Versuche durch Wiederholungsversuche gesichert sind.

7. Untersuchung des Systems Wand-Boden-Anker im Bruchzustand

7.1 Bedeutung der Versuche

Bei der Auswertung der Versuche ist zu prüfen, wie die am Modell erhaltenen Ergebnisse auf die Großausführung übertragen werden können.

Dies soll im folgenden geschehen.

Der gesamte Bodenblock bestehend aus Wand-Boden-Anker bewegt sich beim Abgraben des Bodens vor der Wand auf einer Gleitfläche, die vom Wandfuß bis zu der Verankerungsstrecke reicht. Hinter den Ankern bildet sich eine ebene Gleitfläche. Dies bedeutet, daß der am Modell gefundene Einfluß der Ankerlänge, der Ankervorspannung, der Ankeranordnung und der Biegesteifigkeit der Wand auf das Tragverhalten des verankerten Bodenkörpers auch für die in der Praxis vorhandenen Verhältnisse gelten, da im Bruchzustand die Spannungen in den Bruchflächen eindeutig definiert sind.

Inwieweit die bei den Modellversuchen gemessene Größe und Verteilung des Erddrucks auf die mehrfach verankerte Baugrubenwand übertragen werden können, bedarf hingegen noch eingehender Untersuchungen. Der Erddruck auf die Wand ist als innere Kraft des Systems "Wand-Boden-Anker" vom Spannungszustand des Bodens innerhalb des Systems abhängig. Die Feststellung, nach der sich zwischen Wand und Verankerungsstrecke keine Gleitflächen gebildet haben, besagt, daß dort ein elastisch plastischer Zustand herrscht. Die Spannungen in diesem Bodenblock können deshalb nicht aus den Gleichgewichts- und Bruchbedingungen nach der Methode des kritischen Gleichgewichts ermittelt werden. Die Anwendung dieser Methode setzt den Bruch des Bodens hinter der Wand voraus. Besonders die Ankervorspannung beeinflusst den Spannungszustand im Boden hinter der Wand und es bleibt zu prüfen, wie die am Modell gewonnenen Ergebnisse auf eine Baugrubenwand übertragen werden können. Das hierfür notwendige Modellgesetz

kann über die Spannungs-Dehnungsbeziehung des Sandes bei Berücksichtigung sowohl der im Modell aufgetretenen Spannungen als auch der in der Praxis vorhandenen Spannungen gefunden werden. Die Auswertung der Modellversuche in dieser Richtung war nicht Gegenstand dieser Arbeit. Sie ist einer weiteren Arbeit vorbehalten.

7.1.1 Gleitflächenverlauf

Der Verlauf und die Form der Bruchflächen wurde von dünnen biegeweichen Metallstreifen, die in der Mittellinie des Bodenmassivs eingebaut waren, festgehalten. Im Bereich der tiefen Gleitfuge waren die Metallstreifen vertikal angeordnet, hinter den Ankern dagegen horizontal, damit diese von der Gleitfläche mit möglichst stumpfen Winkel geschnitten wurden. Nach Beendigung eines jeden Versuchs wurden beim Ausbau des Sandes die Knickpunkte der einzelnen Metallstreifen eingemessen, um den Gleitflächenverlauf genau rekonstruieren zu können.

In allen Versuchen mit einer zwei- oder dreifach verankerten Wand bildete sich zwischen Wandfußpunkt und Verankerungsstrecke des untersten Ankers eine Gleitfläche. Hinter den Ankern verlief die Gleitfläche vom untersten Anker zur Bodenoberfläche im Mittel unter einem Winkel von 64° , was einem Winkel von $45^\circ + \frac{\rho}{2}$ bei einem Reibungswinkel $\rho = 39^\circ$ entspricht. Diese Gleitfläche verlief bei einer Vorspannung der Anker von über 80 % etwas steiler, da der Boden zwischen Wand und Verankerungsstrecke durch das Anspannen der Anker zusammengedrückt wurde und der Boden hinter den Ankern dadurch aufgelockert wurde. Durch diese Auflockerungszone wurde die Richtung der Gleitfläche vorgegeben.

Um den Verlauf der Gleitflächen zu überprüfen, wurde im Versuch Nr. 26 auch an den Rändern des Modells Metallstreifen eingelegt. Eine größere Abweichung als im Rahmen der Meßgenauigkeit wurde

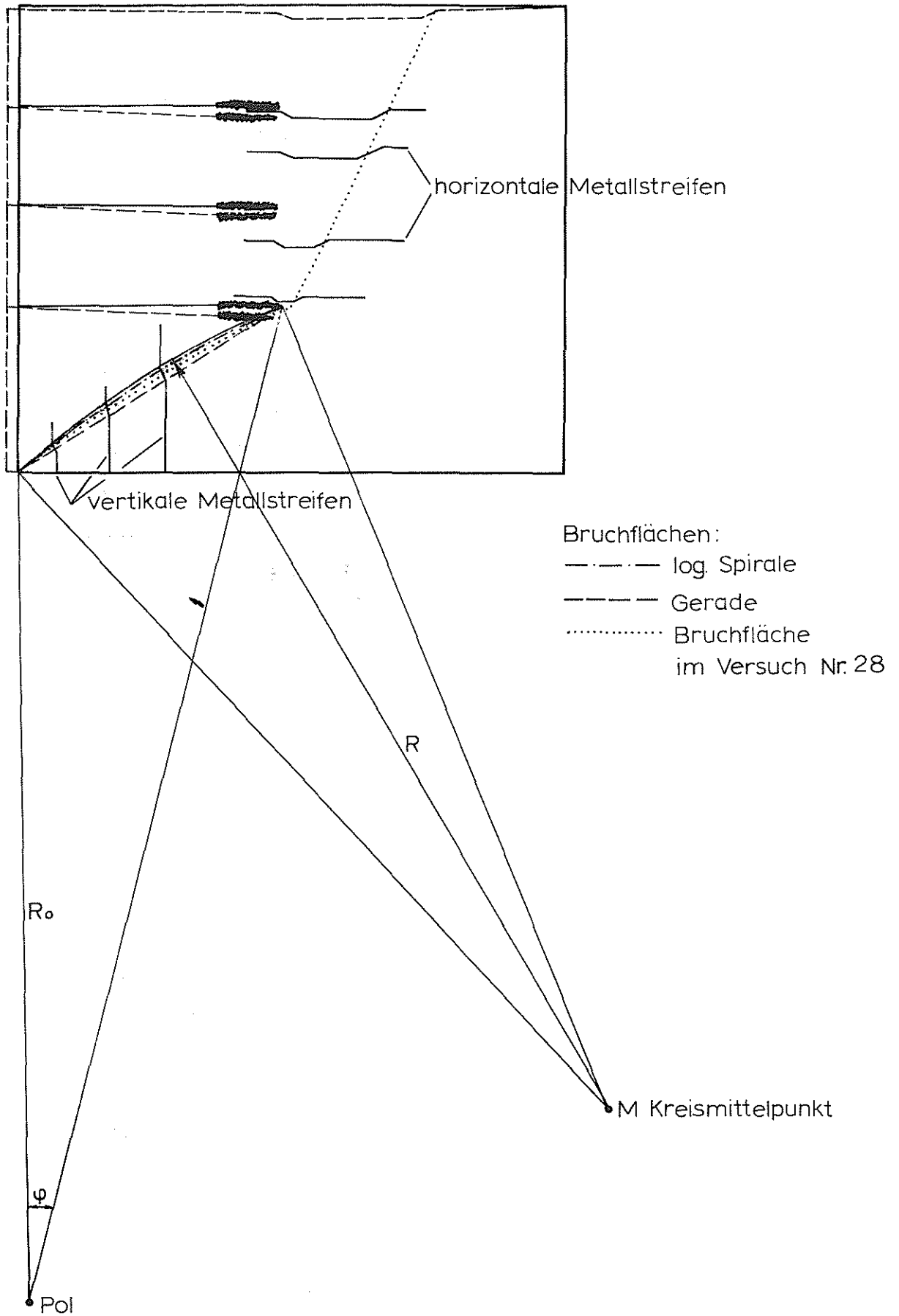


Bild 15: Vergleich zwischen errechneten und gemessenen Gleitflächen.

nicht festgestellt. Die Gleitflächen waren nahezu eben.

Zwischen Wand und Verankerungsstrecke wurden keine Gleitflächen beobachtet. Das System Wand-Boden-Anker hat sich insgesamt parallel verschoben.

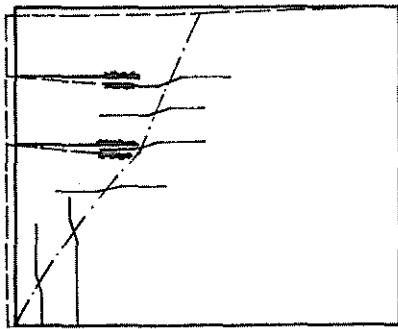
Eine Krümmung der Gleitfläche in der tiefen Fuge nach oben konnte nur im Versuch Nr. 52 mit zwei Ankern deutlich festgestellt werden.

Bei den Versuchen mit drei Ankern ist eine Aussage über die Krümmung schwierig, da die Länge der Gleitfläche durch die tiefere Lage des untersten Ankers wesentlich verkürzt wird. Beim Versuch Nr. 52 beträgt die Länge der "tiefen Gleitfuge" 73 cm, bei den Versuchen mit drei Ankern dagegen nur 60 cm. Außerdem bildet sich bei der im Modell vorhandenen Lagerungsdichte kein scharfer Linienbruch, sondern es entsteht eine ca. 2 bis 3 cm dicke Bruchzone. Eine Krümmung der Gleitfläche nach unten wurde mit Sicherheit nicht festgestellt.

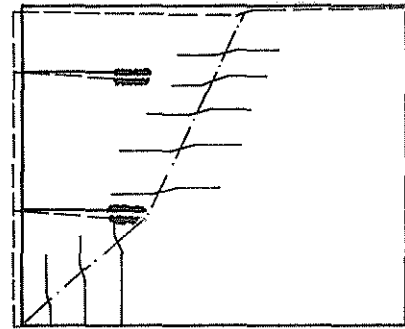
Bei der Nachrechnung der Standsicherheit in Kap. 7.1.2 wird aufgezeigt, daß bei einem Reibungswinkel von $\rho = 39^{\circ}$ eine gekrümmte Gleitfläche (logarithmische Spirale, Kreis) sich nur wenig von einer geraden Gleitfläche unterscheidet (Bild 15).

Die Lage der Gleitfläche wird im wesentlichen durch die Länge des untersten Ankers bestimmt. Je länger der Anker ist, um so flacher verläuft die Gleitfläche (Bild 17: Einfluß der Ankerlänge).

Bei einer mit der Tiefe zunehmenden Ankerlänge ist für das Eintreten des Bruches die Länge des untersten Ankers maßgebend (Bild 17, Versuch Nr. 51). Dagegen entsteht bei einer mit der Tiefe abnehmenden Ankerlänge durch das Nachgeben des untersten kurzen Ankers eine Auflockerungszone hinter der Wand. Von dieser Auflockerungszone aus bildet sich die Gleitfläche entlang der Ankerenden aus. Diese Ver-

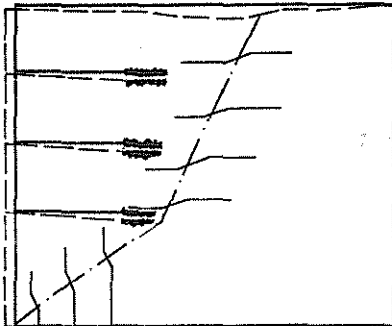


Versuch Nr. 52

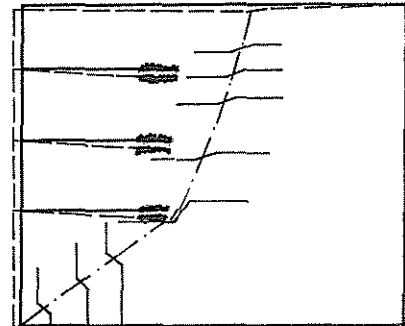


Versuch Nr. 22

Variation der Ankerlage



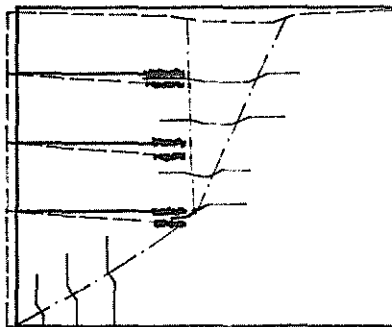
Versuch Nr. 25 (20%)



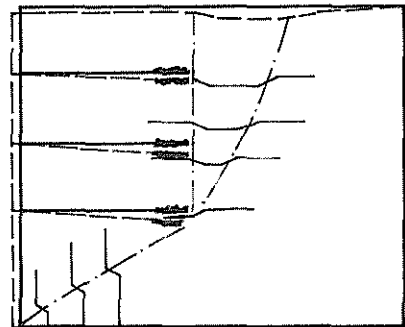
Versuch Nr. 19 (80%)

Einfluss der Ankervorspannung

----- verformter Erdkörper
- - - - - Gleitflächen



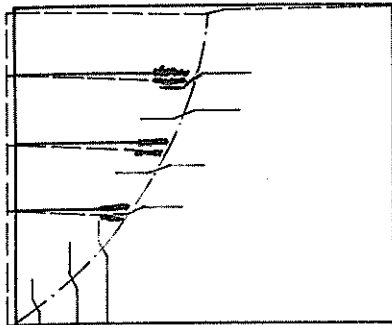
Versuch Nr. 58 ($I=0,142\text{cm}^4/\text{m}$)



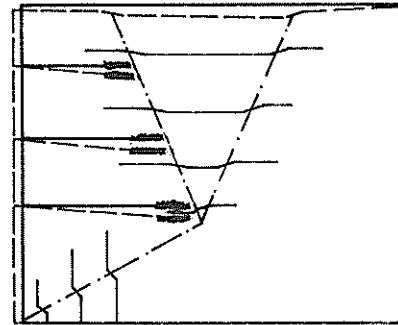
Versuch Nr. 45 ($I=1,138\text{cm}^4/\text{m}$)

Einfluss der Biegesteifigkeit

Bild 16: Lage der Gleitflächen (Einfluß der Ankerlage, Ankervorspannung und der Biegesteifigkeit)

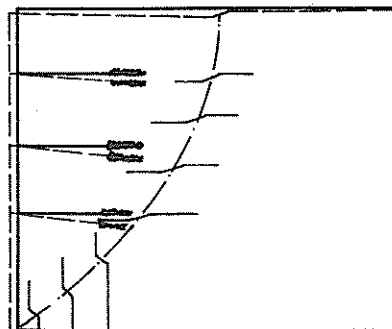


Versuch Nr. 50

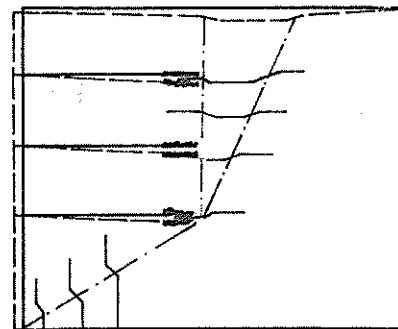


Versuch Nr. 51

Einfluss der Ankeranordnung



Versuch Nr. 60 (Ankerl. 39,5 cm)



Versuch Nr. 47 (Ankerl. 59,5 cm)

Einfluss der Ankerlänge

- — — verformter Erdkörper
- · - · - · - Gleitflächen

Bild 17: Lage der Gleitflächen (Einfluß der Ankeranordnung und der Ankerlänge)

suche eignen sich daher wenig für eine rechnerische Nachprüfung der Standsicherheit.

Die Biegesteifigkeit der Wand beeinflusst die Lage der Gleitflächen nicht, da sich Wand, Boden und Anker insgesamt verschieben (Bild 16).

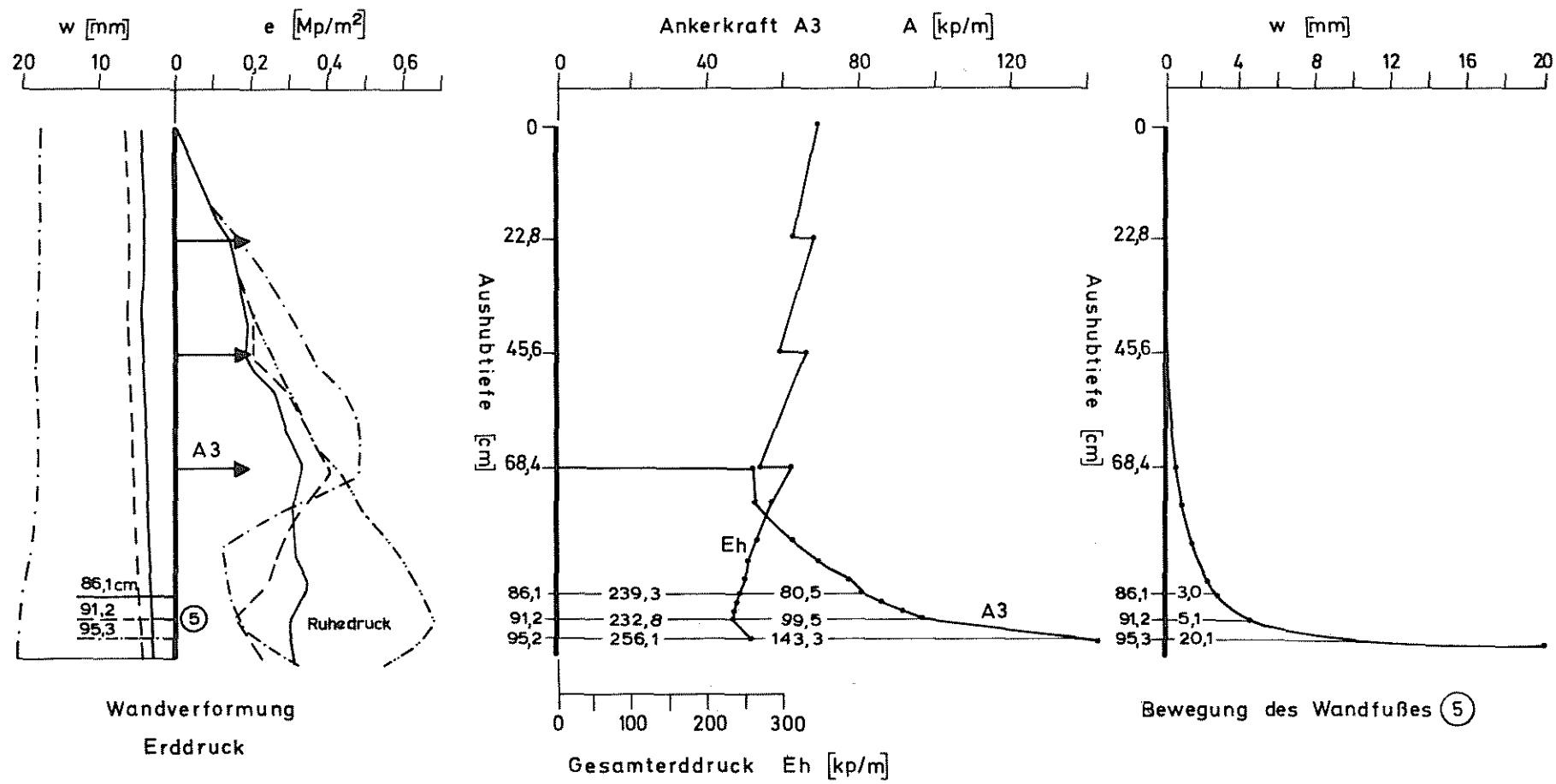
Bei einem größeren Abstand der einzelnen Ankerlagen, wie in Versuch Nr. 22 (Bild 16), kann die Lage der Gleitfläche insofern beeinflusst werden, wenn nach dem Anspannen des 1. Ankers ein so großer Aushub erfolgt, daß die Standsicherheit dieser "einfach verankerten Wand" bereits vor Anspannen des 2. Ankers nicht mehr ausreichend ist.

7.1.2 Untersuchung der Standsicherheit

7.1.2.1 Kräfte im Bruchzustand

Bei jedem Versuch wurden die Größe und die Verteilung des Erddruckes, die Ankerkräfte und die Stützkraft am Wandfuß im Augenblick des Bruches gemessen.

Auf Bild 18 ist für den Versuch Nr. 42 die Entwicklung des Erddruckes und der Ankerkraft im Augenblick des Bruches angegeben. Die Größe des Erddruckes ändert sich während einer Aushubstufe von 6 cm nur um 4 % (7 kp/m). Die Kraft im 3. Anker dagegen steigt von 80 kp/m auf 120 kp/m also um 50 % an. Während dieser Vorgänge nehmen die Verformungen zu, Bruchflächen sind jedoch noch nicht erkennbar. Der Bruch des Systems erfolgt erst beim weiteren Aushub und dann ziemlich rasch. Dies wird durch die sichtbare Zunahme der Wandbewegung und durch die sich an der Bodenoberfläche hinter den Ankern bildende Bruchkante deutlich. Die Bewegung des Systems Wand-Boden-Anker kommt jetzt nur noch durch ein Eingreifen von Außen zum Stillstand.



Versuch Nr. 42 Vorspannungsgrad 80%

Bild 18 : Entwicklung des Erddrucks, der Erddruckverteilung, der Ankerkraft und der Wandverformung im Augenblick des Bruches

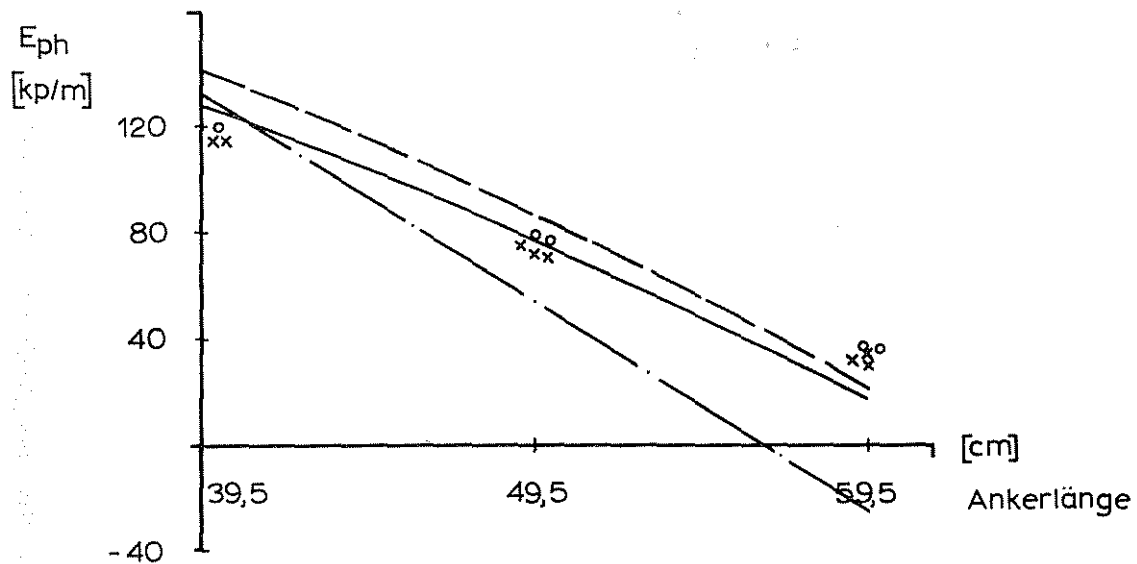
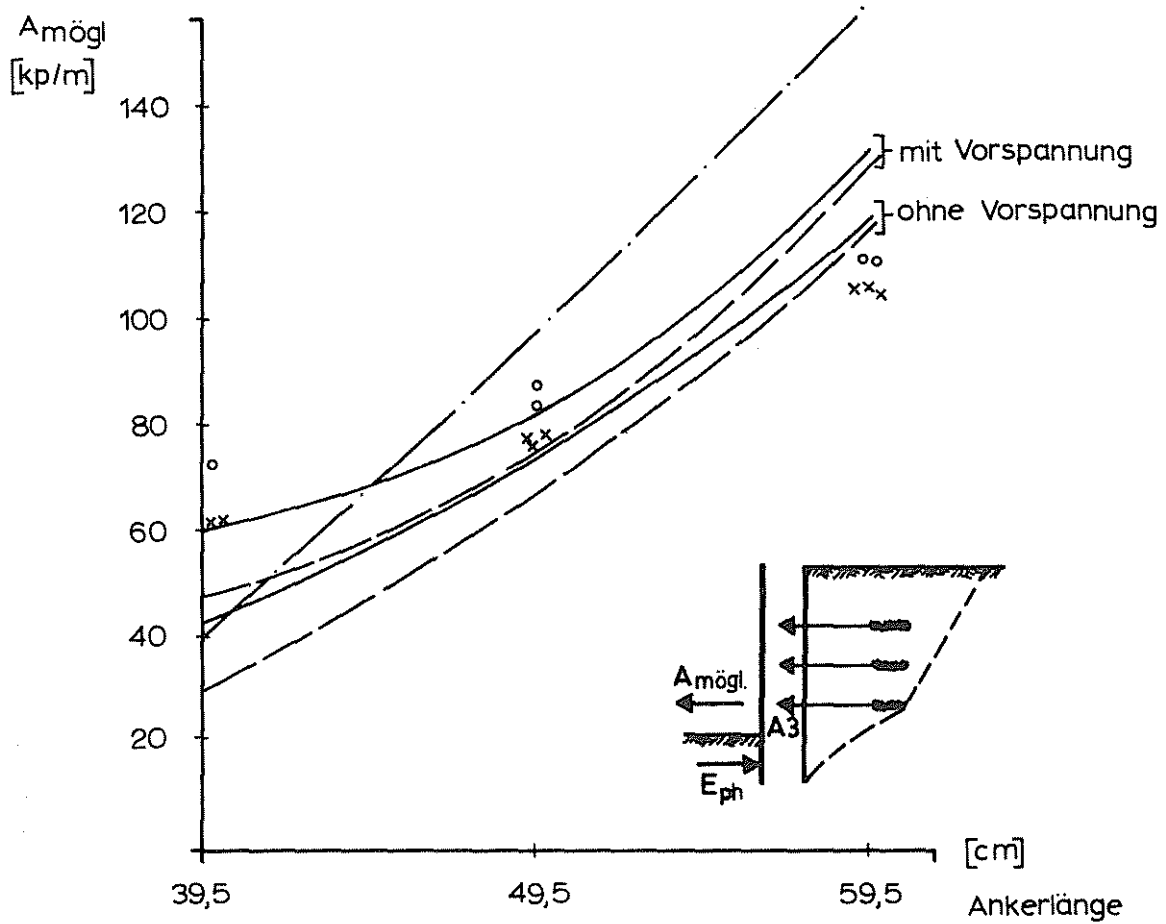
Ebenso ändert sich die Verteilung des Erddruckes. Im Bereich des Wandfußes fällt der Erddruck ab, während er in der Höhe der Anker ansteigt. Der Schwerpunkt der Erddruckfläche wandert also im Augenblick des Bruches nach oben. Die Abnahme des Erddruckes im unteren Wandbereich wird durch die mit der Bewegung des Wandfußes verbundenen vollen Aktivierung der Scherfestigkeit hervorgerufen.

7.1.2.2 Einfluß der Ankerlänge

Wie in Kapitel 7.1.1 schon hingewiesen wurde, ist von entscheidendem Einfluß, sowohl was die Lage der tiefen Gleitfuge als auch was die Größe der Standsicherheit anbetrifft, die Länge des untersten Ankers. Er bestimmt die Breite des Systems Wand-Boden-Anker und damit die Größe der in der Gleitfläche zwischen Wandfuß und Verankerungsstrecke aufnehmbaren Schubspannungen.

Bei drei Versuchen mit jeweils verschiedenen Ankerlängen wurden für den Bruchzustand die erforderliche 3. Ankerkraft A_3 und die erforderliche Stützkraft E_{ph} am Wandfuß sowohl mit geraden als auch mit gekrümmten Gleitflächen ermittelt und den gemessenen Kräften gegenübergestellt (Bild 19). In der Rechnung wurden der gemessene Erddruck der Größe und der Verteilung nach und die Kräfte im 1. und 2. Anker berücksichtigt. Logarithmische Spiralen und nach oben gekrümmte Kreise wurden zwischen Wandfuß und dem Ende der Verankerungsstrecke gelegt (Bild 15). Die Lage des Poles und des Kreismittelpunktes wurden solange variiert, bis die kleinste Anker- und Stützkraft gefunden wurde. Der Reibungswinkel ρ wurde bei diesen Rechnungen zu 39° angenommen.

Aus Bild 19 wird deutlich, daß mit zunehmender Ankerlänge bei den Versuchen $A_{m\ddot{o}gl}$ ansteigt und die erforderliche Stützkraft E_{ph} nahezu linear abnimmt. Dies gilt ebenso für die mit geraden und gekrümmten



- × Versuche ohne Vorspannung
- log. Spirale
- Versuche mit Vorspannung
- - - - - Kreis
- · - · - Gerade

Bild 19: Einfluß der Ankerlänge auf die errechnete Anker- und Stützkraft und Vergleich mit den Versuchswerten.

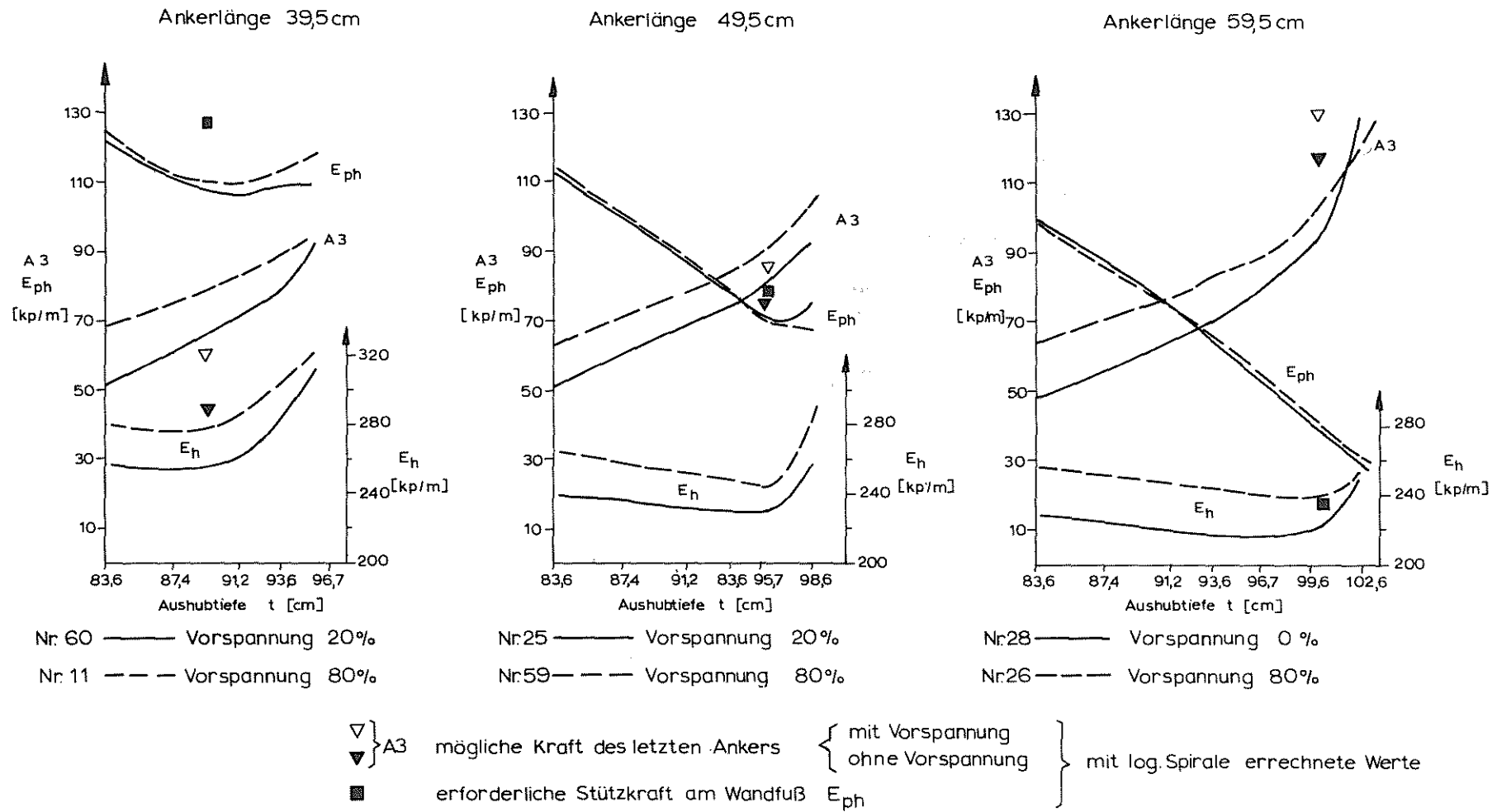


Bild 20: Entwicklung der Ankerkraft A_3 , des Erddrucks E_h und der Stützkraft E_{ph} im Augenblick des Bruches (Einfluß Vorspannung)

Gleitflächen berechneten Werte.

Die gemessene Ankerkraft A 3 ist bei einer Ankerlänge von 39,5 cm 30 % größer als der errechnete Wert.

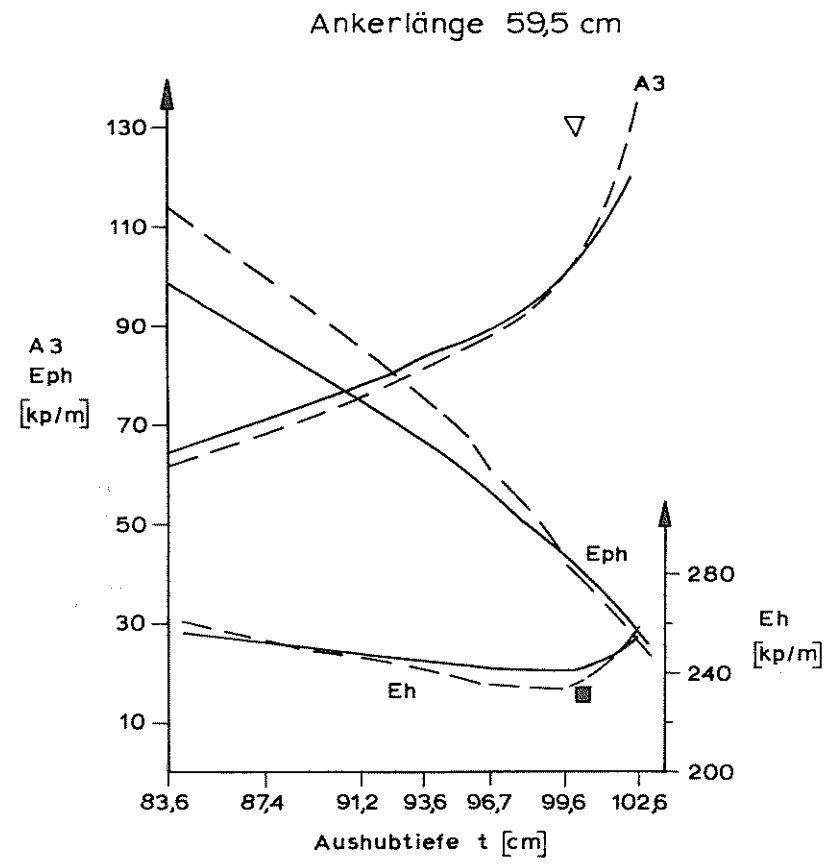
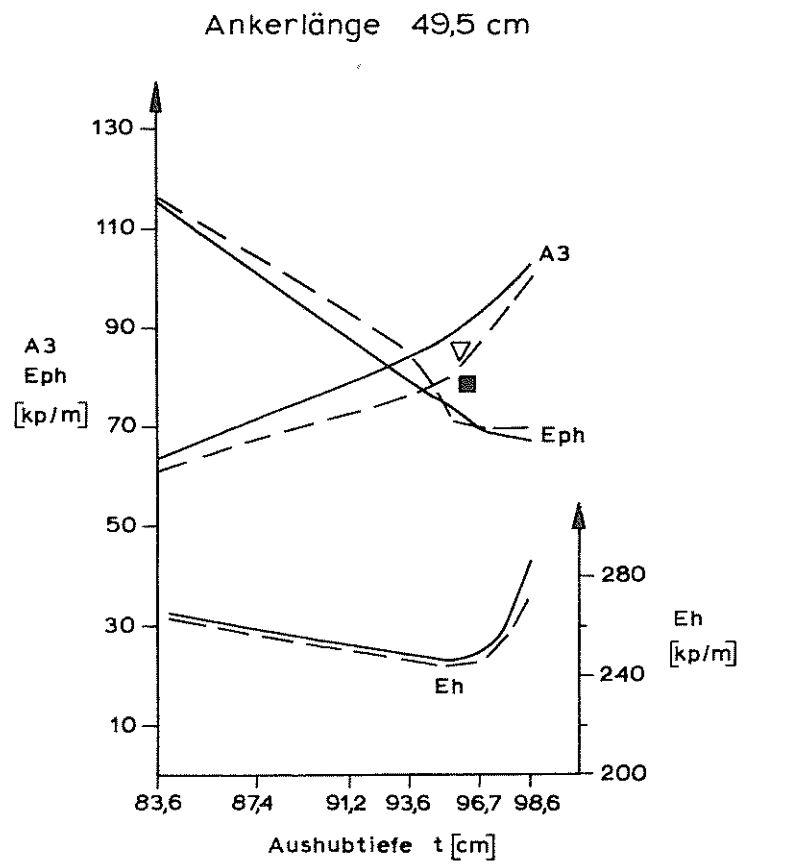
Bei der mittleren Ankerlänge stimmen die gemessene und die errechnete Ankerkraft recht gut überein. Dagegen ist bei einer Ankerlänge von 59,5 cm die rechnerische Ankerkraft 17 % größer als die gemessene Ankerkraft.

Bei dem langen Anker muß man berücksichtigen, daß bei einer Verringerung des Reibungswinkels ρ um $0,5^{\circ}$ die Abweichung zwischen gemessener und errechneter Ankerkraft nur noch 10 % beträgt.

Somit zeigt sich, daß die mit einer geraden Gleitfläche errechneten Ankerkräfte nur bei dem kurzen Anker auf der sicheren Seite liegen. Bei dem mittleren und langen Anker sind die mit einer geraden Gleitfläche errechneten Ankerkräfte gegenüber den mit gekrümmten Gleitflächen ermittelten Werte zu groß und liegen damit auf der unsicheren Seite.

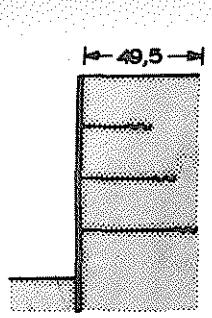
7.1.2.3 Einfluß der Ankervorspannung , der Biegesteifigkeit und der Ankeranordnung

Auf Bild 20 sind die Ankerkraft A 3, die Stützkraft E_{ph} und der Erddruck E_h , bei denen der Bruch des Systems Wand-Boden-Anker eintritt, über die Aushubtiefen aufgetragen. Der Vorspannungsgrad beträgt 20 % und 80 %. Man sieht, daß die Vorspannung bei allen drei untersuchten Ankerlängen zwar die Ankerkraft und den Erddruck vergrößert, die Stützkraft E_{ph} dagegen ist mit und ohne Vorspannung bei der jeweiligen Ankerlänge gleich groß.

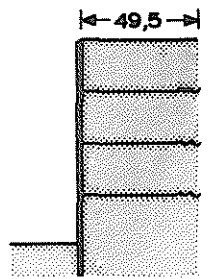


▽ mögliche Kraft des letzten Ankers
 ■ erforderliche Stützkraft am Wandfuss Eph } mit log. Spirale errechnete Werte

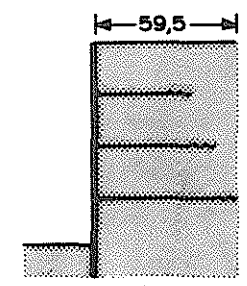
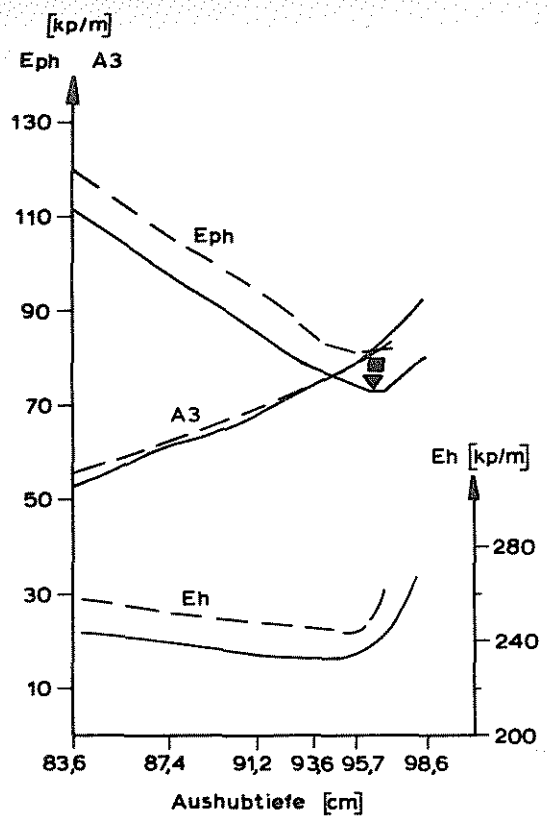
Bild 21: Entwicklung der Ankerkraft A3, des Erddrucks E_h und der Stützkraft E_{ph} im Augenblick des Bruches (Einfluß Biegesteifigkeit)



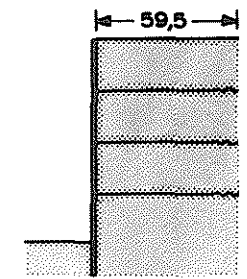
Versuch Nr. 15



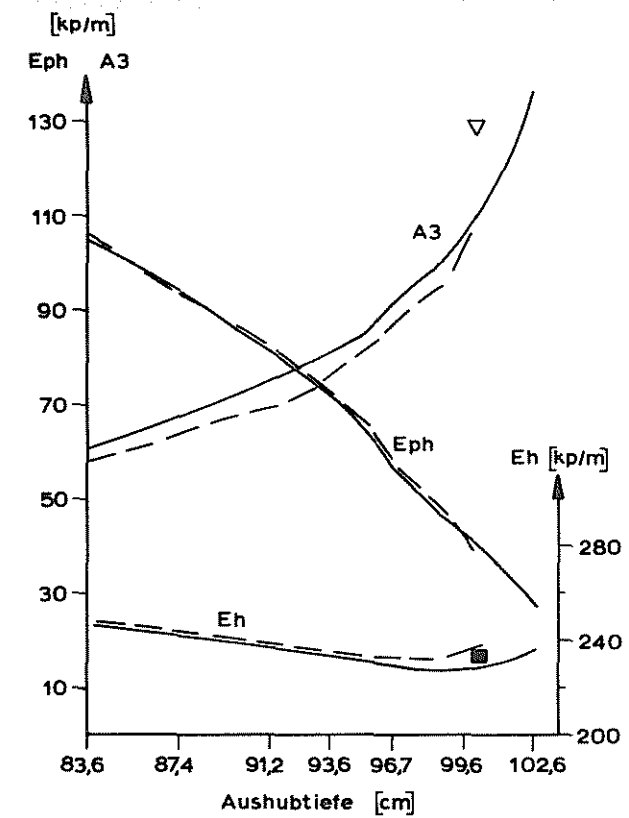
Versuch Nr. 17



Versuch Nr. 51



Versuch Nr. 47



— Nr. 17 } Vorspannung 20%
 - - - Nr. 15 } J₁ = 0,1422 cm⁴/m

— Nr. 47 } Vorspannung 80%
 - - - Nr. 51 } J₃ = 1,1377 cm⁴/m

▽ } A3 mögliche Kraft des letzten Ankers [mit Vorspannung
 ▾ } [ohne Vorspannung] mit log. Spirale errechnete Werte
 ■ } erforderliche Stützkraft am Wandfuss E_{ph}

Bild 22: Entwicklung der Ankerkraft A₃, des Erddrucks E_h und der Stützkraft E_{ph} im Augenblick des Bruches (Einfluß Ankeranordnung)

Ebenso ergibt sich bei einer Variation der Biegesteifigkeit (B i l d 21), daß die Steifigkeit der Wand keinen Einfluß auf E_{ph} und die Ankerkraft A_3 hat.

Der Einfluß der Ankeranordnung macht sich bei den Versuchen mit drei gleich langen Ankern und bei drei mit der Tiefe länger werdenden Ankern nicht bemerkbar, wenn jeweils der unterste Anker gleich lang ist (B i l d 22).

Die Ankerkräfte A_3 und die Stützkräfte E_{ph} sind dann nahezu gleich groß.

7.2 Erddruck, Erddruckverteilung und Ankerkräfte

7.2.1 Übersicht

Die Ergebnisse der wichtigsten Versuche sind im Anhang (Komputerverzeichnungen) für die einzelnen Aushubschritte angegeben. Die Erkenntnisse aus diesen Versuchen gelten auch für die in den folgenden Kapiteln behandelten Versuche.

Nach Beendigung des Einfüllvorgangs wird der Ruhedruck auf die Wand gemessen. Der mittlere Ruhedruck beträgt 343 kp/m bei einer maximalen Abweichung von 4 %. Dieser Wert stimmt mit dem Wert von $E_o = \frac{1}{2} \times \gamma \times h^2 \times \lambda_o = \frac{1}{2} \times 1,605 \times 1,064^2 \times (1 - \sin \rho)$ (bei einem mittleren Reibungswinkel von $\rho = 39^\circ$) $E_o = 337$ kp/m gut überein. Bei dem nachfolgenden Aushub nimmt der Erddruck stetig ab, bis er beim Bruch des Systems Wand-Boden-Anker ein Minimum erreicht (B i l d 25, siehe Gesamterddruck E_h). Während des Bruches steigt der Erddruck wieder an.

Eine Umlagerung des Erddruckes findet im Bereich des Wandfußes statt. Unterhalb des untersten Ankers fällt der Erddruck durch die zunehmende Bewegung des Wandfußes etwas ab.

Der mittlere Wandreibungswinkel nimmt ständig mit dem Aushub zu und beträgt bei der vertikal unnachgiebigen Wand ca. 33° ($2/3\rho = 26^\circ$). Die Wandreibung wird in drei verschiedenen Wandabschnitten gemessen. Obwohl dies eine grobe Einteilung ist, ist die Wandreibung über die Wandhöhe nicht konstant. Der Größtwert in einem einzelnen Wandabschnitt beträgt $35^\circ - 40^\circ$. Im Augenblick des Bruches ist der Wandreibungswinkel für die drei Wandabschnitte nahezu gleich groß.

Die Zunahme der Ankerkräfte über die Aushubtiefe ist bei fast allen Versuchen wenig unterschiedlich, wenn man vom Einfluß der Vorspannung absieht.

Die Kraft im 1. Anker nimmt mit dem Aushub solange zu, bis der zweite Anker eingebaut ist. Danach bleibt die Kraft im 1. Anker nahezu konstant. Ebenso verhält sich die Kraft im 2. Anker. Nach Einbau des 3. und letzten Ankers nimmt die Kraft im 1. und 2. Anker nicht mehr zu. Die Kraft des untersten Ankers nimmt jedoch bis zum Augenblick des Bruches ständig weiter zu.

7. 2. 2 Einfluß der Ankervorspannung

Um den Einfluß der Ankervorspannung auf die Größe und die Verteilung des Erddruckes zu untersuchen, wurden Versuche mit und ohne Vorspannung gemacht. Hierbei wurde der Grad und die Verteilung der Vorspannung variiert. Im allgemeinen wurden die Anker auf 80 % der Kraft, die vorher in einem Versuch ohne Vorspannung ermittelt worden war, vorgespannt. Dies entspricht auch 80 % des jeweils anteiligen Erddruckes für einen Anker. Weiterhin wurden Sonderversuche mit einer Vorspannung von 140 % gemacht.

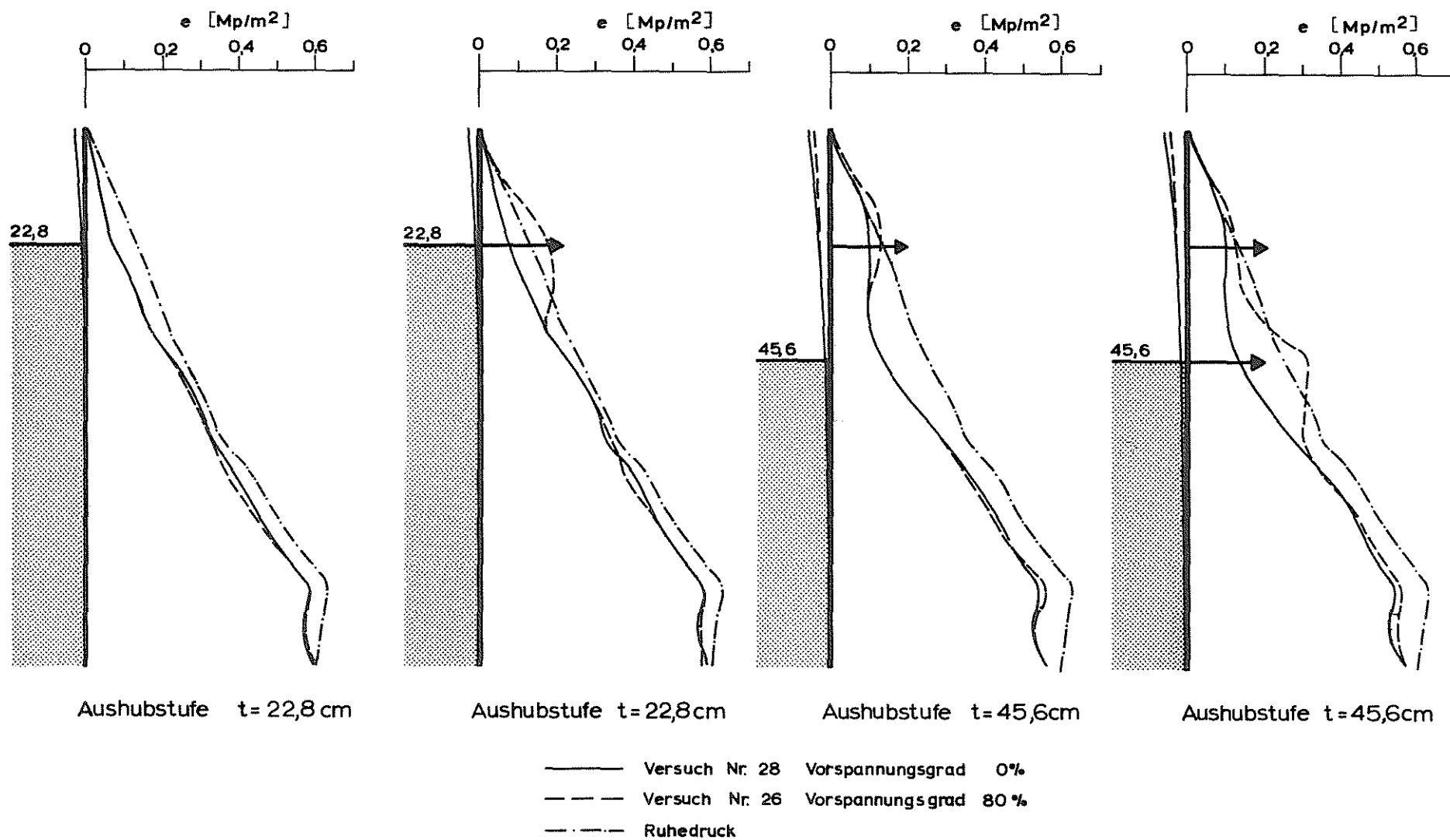
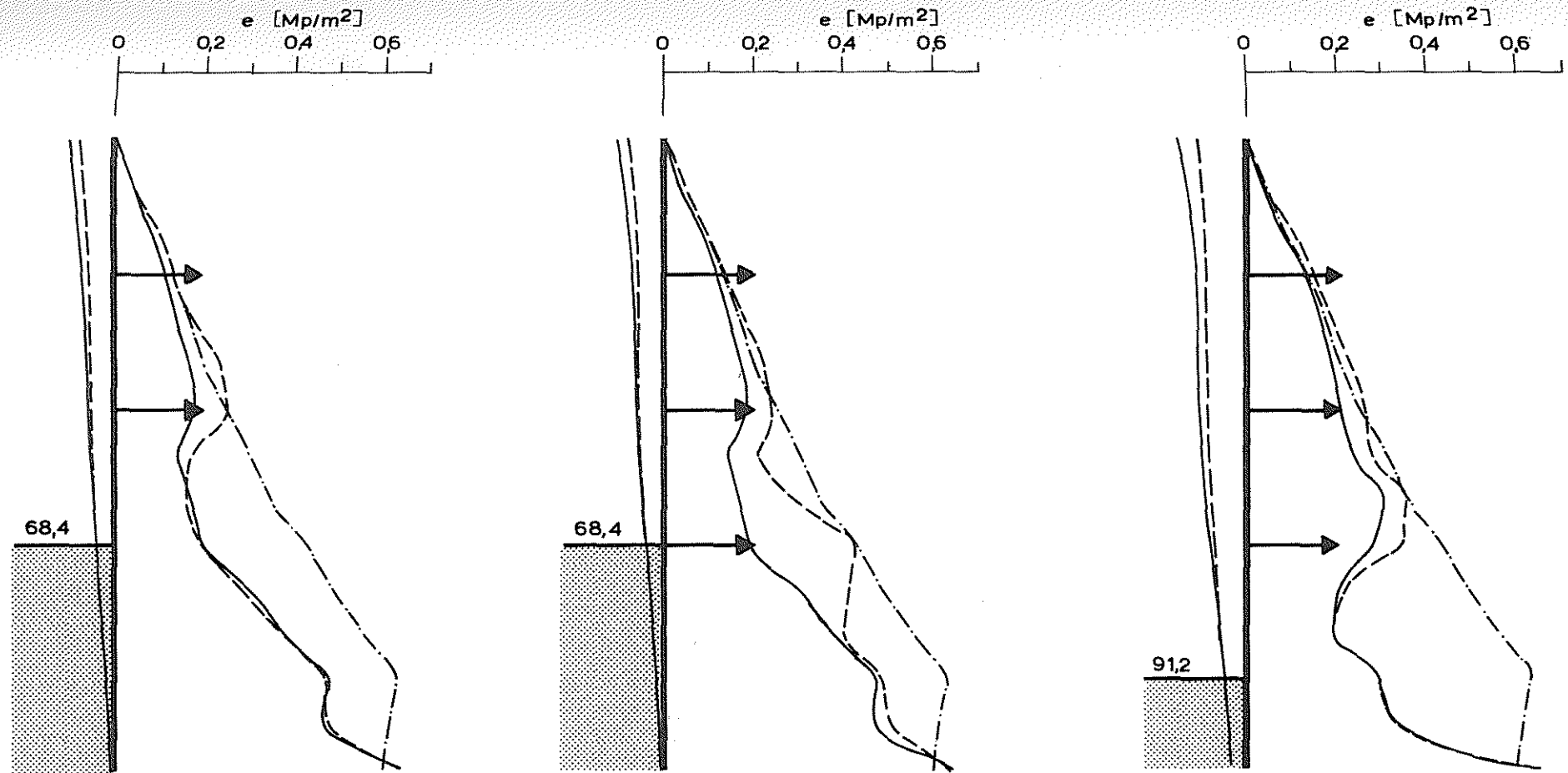


Bild 23: Einfluß der Ankervorspannung auf die Erddruckverteilung bei einer Aushubtiefe von $t = 22,8$ cm und $t = 45,6$ cm



Aushubtiefe $t = 68,4 \text{ cm}$

Aushubtiefe $t = 68,4 \text{ cm}$

Aushubstufe $t = 91,2 \text{ cm}$

- Versuch Nr. 28 Vorspannungsgrad 0%
- - - Versuch Nr. 26 Vorspannungsgrad 80%
- · - · - Ruhedruck

Bild 24: Einfluß der Ankervorspannung auf die Erddruckverteilung bei einer Aushubtiefe von $t = 68,4 \text{ cm}$ und $t = 91,2 \text{ cm}$

Erddruckverteilung

Auf Bild 23 und 24 ist die Entwicklung der Erddruckverteilung in den einzelnen Aushubzuständen angegeben. Nach dem Anspannen eines Ankers ist die Erddruckordinate in Höhe desselben größer als der Ruhedruck. Erst beim nachfolgenden Aushub geht der Erddruck auf den Ruhedruck zurück. Bei den weiteren Aushubschritten bleibt die Erddruckverteilung und die Größe der einzelnen Erddruckordinaten oberhalb des letzten Ankers erhalten. Die Größe des Erddruckes im Bereich der Anker entspricht dem Ruhedruck. Bei den Versuchen ohne Vorspannung stellt sich im Endzustand bei drei Ankern eine nahezu dreieckförmige Erddruckverteilung ein (Bild 25). Werden nun die Anker entsprechend dieser Erddruckverteilung auf 80 % oder 140 % (Bild 25) vorgespannt, so ist die Erddruckverteilung ebenfalls wieder dreieckförmig, da die Ankerkräfte bei den Versuchen ohne Vorspannung mit der Tiefe zunehmen. Der Erddruck ist jeweils um die schraffierten Dreiecke größer geworden. Werden dagegen alle Anker gleichmäßig vorgespannt, so wird die Erddruckfläche um das in Bild 25 schraffierte Trapez vergrößert. Die Erddruckverteilung ist somit in Grenzen durch die Art der Vorspannung steuerbar. Dies wird auch an der Lage des Schwerpunktes der Erddruckfläche deutlich. Bei gleicher Vorspannung der Anker liegt der Schwerpunkt höher als bei einer mit der Tiefe zunehmenden Ankerkraft.

Größe des Erddrucks

Die Größe des Erddrucks ist abhängig vom Grad der Vorspannung (Bild 26). Bei einer Vorspannung von 80 % erhöht sich der Erddruck auf die Wand im Endzustand um rund 10 % . Die Verteilung der Vorspannung hatte auf die Erddruckgröße keinen Einfluß.

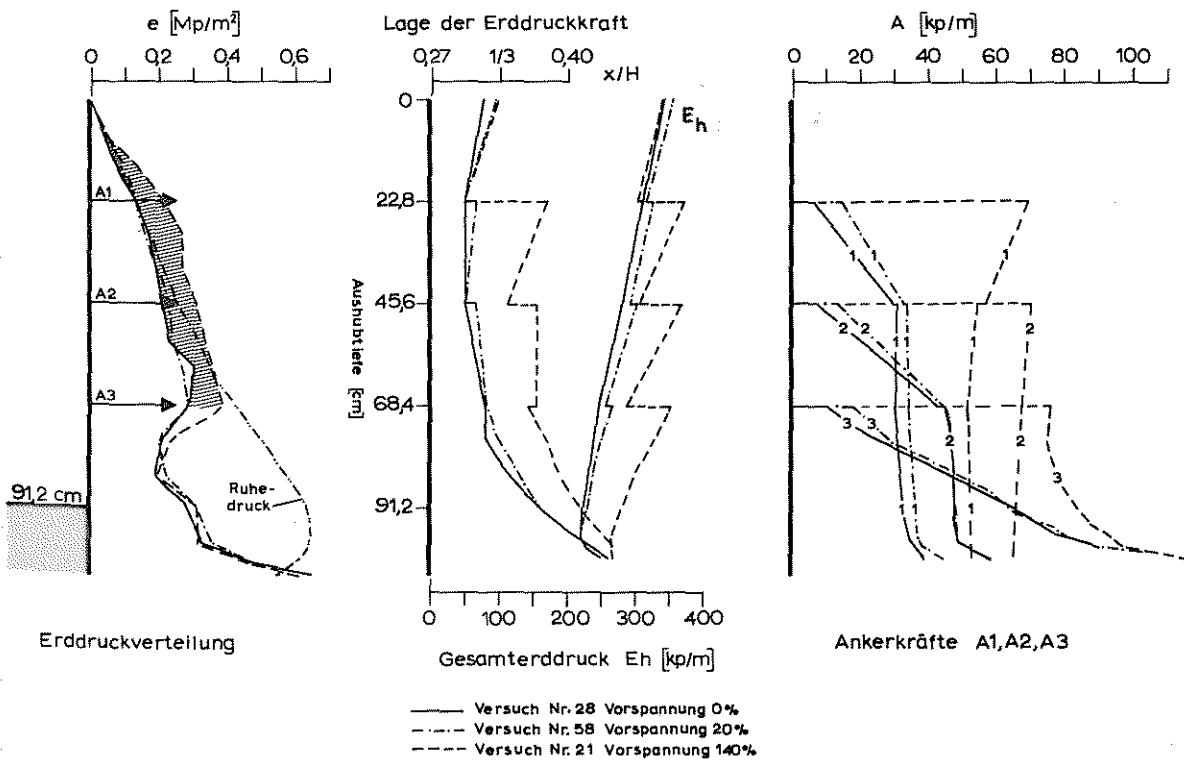
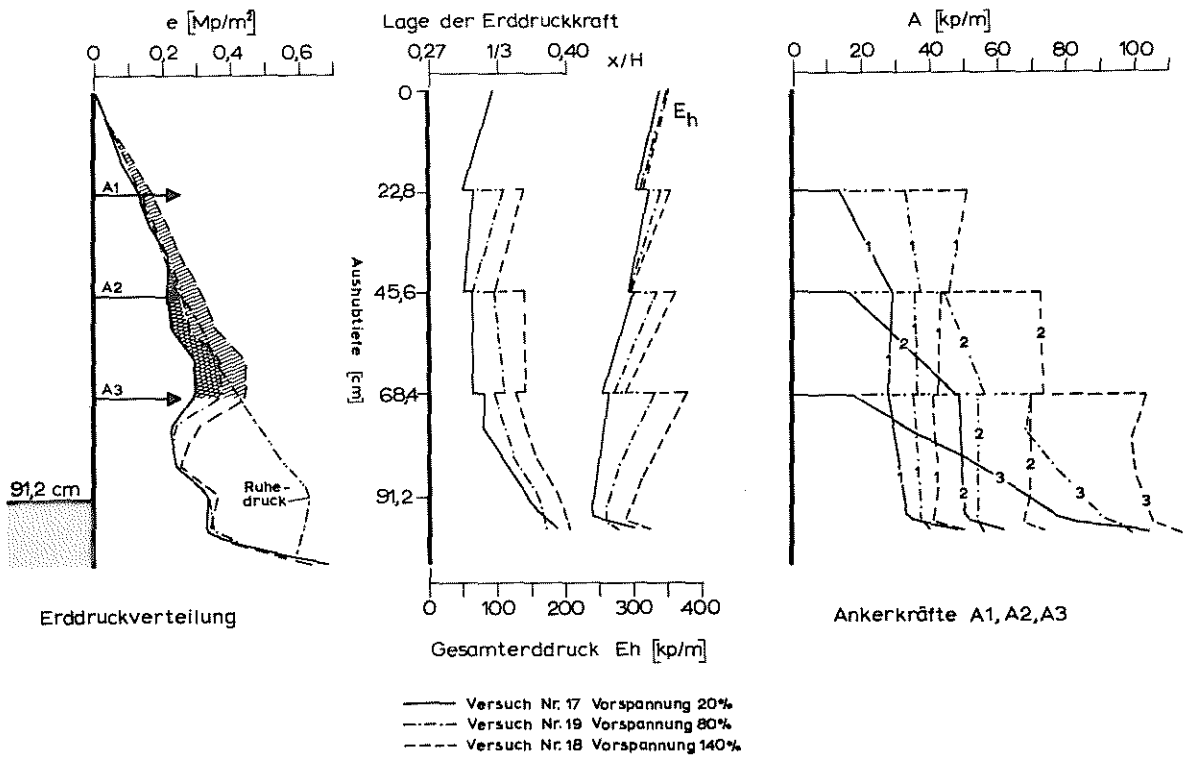


Bild 25: Einfluß der Ankervorspannung auf den Erddruck

Ankerkräfte

Bei den vorgespannten Ankern nimmt die Ankerkraft beim folgenden Aushub weniger stark zu als bei den nicht vorgespannten Ankern. Nach Einbau eines Ankers bleibt die Ankerkraft des darüberliegenden Ankers bis zum Augenblick des Bruches nahezu konstant. Die Kraft im untersten Anker nimmt dagegen bis zum Bruch ständig zu. Erst im Augenblick des Bruches steigen dann die anderen Ankerkräfte auch an.

Weiterhin beeinflussen sich die Anker gegenseitig beim Vorspannen. Durch das Vorspannen eines Ankers fällt die Vorspannkraft des in nächster Nähe befindlichen Ankers etwas ab.

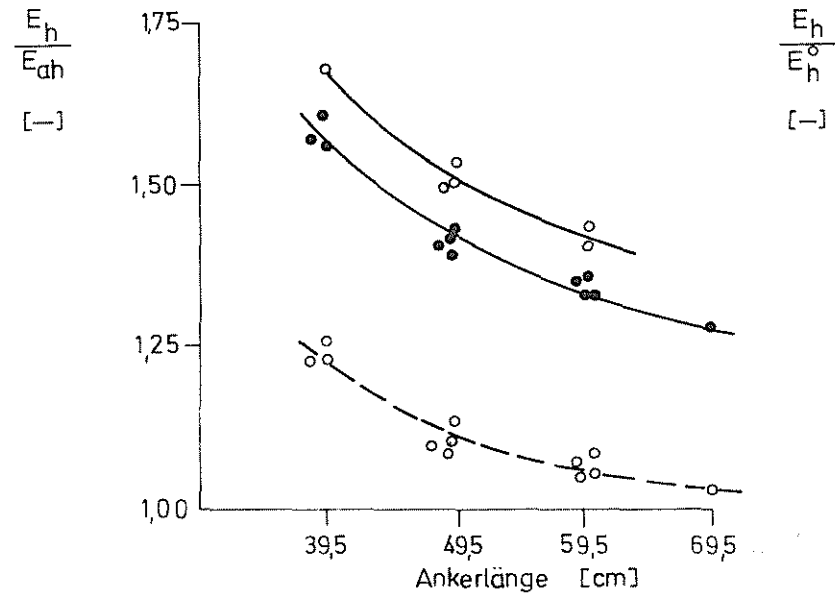
Insgesamt gesehen sind die Ankerkräfte bei einer Vorspannung von 80 % und 140 % größer als bei keiner Vorspannung. Im wesentlichen bleibt die einmal aufgebrachte Vorspannkraft erhalten.

7. 2. 3 Einfluß der Ankerlänge

Der Einfluß der Ankerlänge wurde anhand von vier verschiedenen Ankerlängen ermittelt (B i l d 27). Die größte mögliche Ankerlänge, bei der das System Wand-Boden-Anker noch zu Bruch ging, war 59,5 cm. Bei Versuch Nr. 24 (Ankerlänge 69,5 cm) konnte durch den Aushub kein Bruch herbeigeführt werden. Die Anker wurden bei allen vier Versuchen gleichmäßig um ca. 20 % vorgespannt.

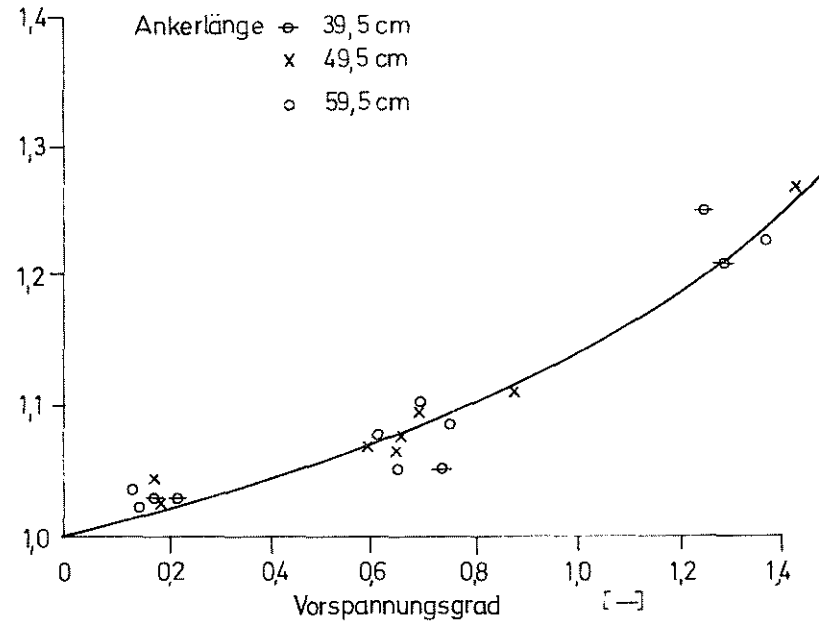
Die Erddruckverteilung wird durch die Ankerlänge nur insofern beeinflusst, daß unterhalb des untersten Ankers der Erddruck mit zunehmender Ankerlänge etwas kleiner wird. Dieser Abfall des Erddruckes läßt sich damit erklären, daß mit zunehmender Ankerlänge die Bewegung der Verankerungspunkte geringer und damit die Abstützung der Wand steifer wird. Je steifer die Abstützung der Wand ist, um so stärker lagert sich

Abnahme des Erddrucks mit der Ankerlänge



- Meßwerte bei 80 % Vorspannung
- Meßwerte ohne Vorspannung
- Horizontalkomponente E_h des gemessenen Erddrucks bezogen auf die Horizontalkomponente E_{ah} des Erddrucks nach Coulomb für $\rho = 39^\circ$, $\gamma = 1,61 \text{ Mp/m}^3$, $\delta = 30^\circ$
- - - Horizontalkomponente E_h des gemessenen Erddrucks bezogen auf die Horizontalkomponente E_h^0 des Erddrucks nach Coulomb für $\rho = 39^\circ$, $\gamma = 1,61 \text{ Mp/m}^3$, $\delta = 0$

Zunahme des Erddrucks mit der Vorspannung



- Ankerlänge 39,5 cm
- x 49,5 cm
- 59,5 cm
- E_h — Horizontalkomponente des mit Vorspannung gemessenen Erddrucks
- E_h^0 — Horizontalkomponente des ohne Vorspannung gemessenen Erddrucks

Bild 26: Erddruck in Abhängigkeit von der Vorspannung und der Ankerlänge

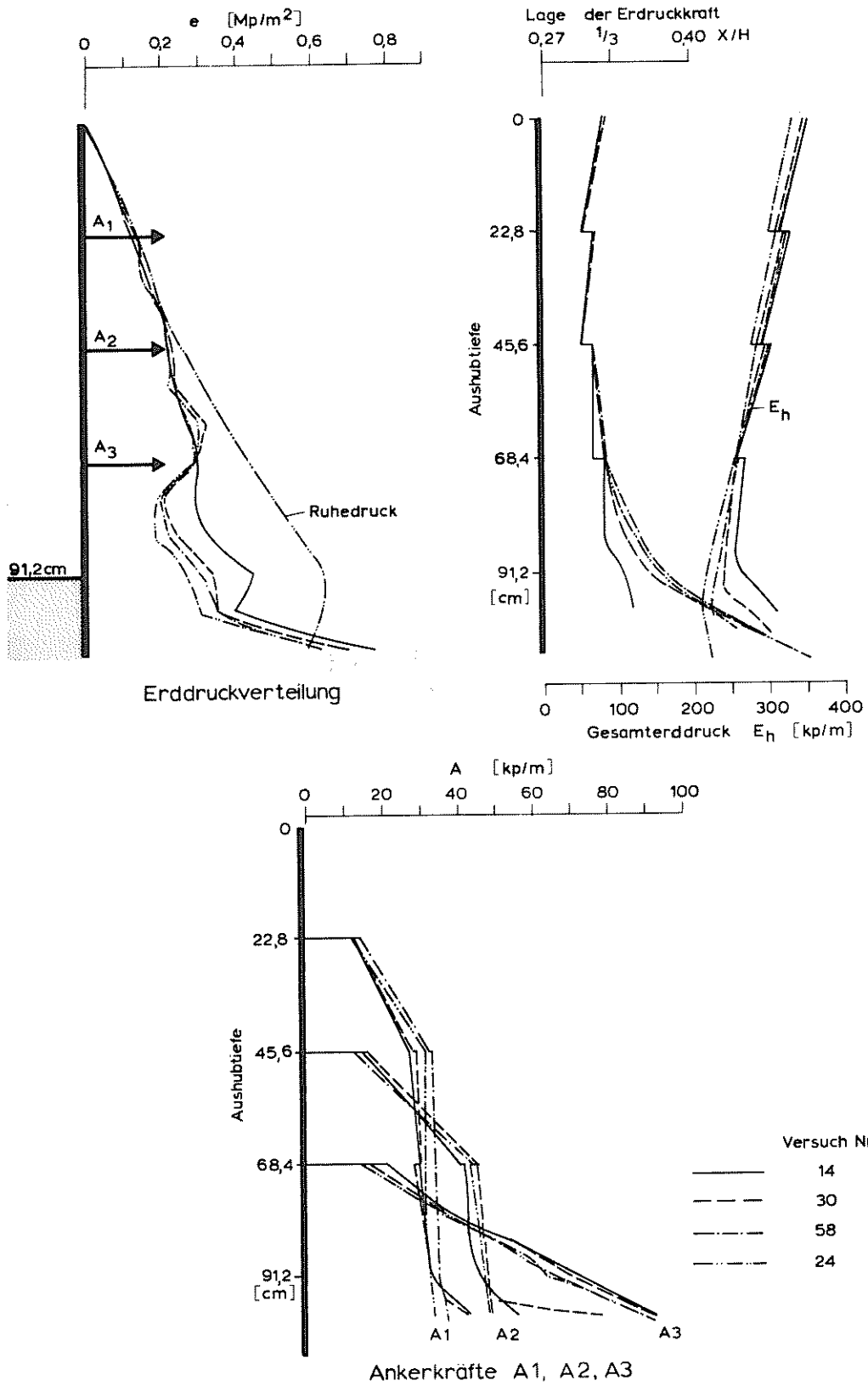


Bild 27: Einfluß der Ankerlänge auf den Erddruck

der Erddruck um. Dies wird besonders an dem Beispiel der aussteiften Wand (siehe Kapitel 10) deutlich. In Höhe der Steifen konzentriert sich der Erddruck. Unterhalb der untersten Steife fällt der Erddruck dagegen ab. Oberhalb der untersten Steife bzw. des untersten Ankers nimmt der Erddruck nahezu linear mit der Tiefe zu.

Die Größe des Erddrucks wird ebenfalls mit zunehmender Ankerlänge geringer (Bild 26). Dies kommt daher, daß bei kurzen Ankern sich der Boden zwischen der Wand und der Verankerungstrecke abstützt. Dies bedeutet, daß die Schubspannungen, die von den Ankerplatten in den Boden zwischen Wand und Verankerungstrecke eingeleitet werden, den Erddruck vergrößern. G. P. Schmitt (1974) hat ebenfalls anhand einer einfach verankerten Wand nachgewiesen, daß sich der Boden zwischen Wand und Verankerungstrecke verspannt. Bei einer größeren Ankerlänge ist dieser Einfluß entsprechend geringer. Der in den Versuchen gemessene minimale Erddruck E_h wurde mit dem für ebene Gleitflächen nach Coulomb ermittelten aktiven Erddruck E_{ah} verglichen. Hierbei wurde das Raumgewicht zu $1,61 \text{ Mp/m}^3$, der mittlere Wandreibungswinkel $\delta = 30^\circ$ und der Reibungswinkel ρ zu 39° angenommen. Der Gesamterddruck E_h ist im Mittel 35 % größer als der aktive Erddruck E_{ah} (Bild 26).

Die Größe und der Verlauf der Ankerkräfte sind von der Ankerlänge nahezu unabhängig.

7.2.4 Einfluß der Wandsteifigkeit

Es wurde der Einfluß von drei verschiedenen Wandsteifigkeiten untersucht.

$$J_1 = 0,1422 \text{ cm}^4/\text{m} \text{ (Versuch Nr. 26)}$$

$$J_2 = 0,4800 \text{ cm}^4/\text{m} \text{ (Versuch Nr. 57)}$$

$$J_3 = 1,1377 \text{ cm}^4/\text{m} \text{ (Versuch Nr. 42)}$$

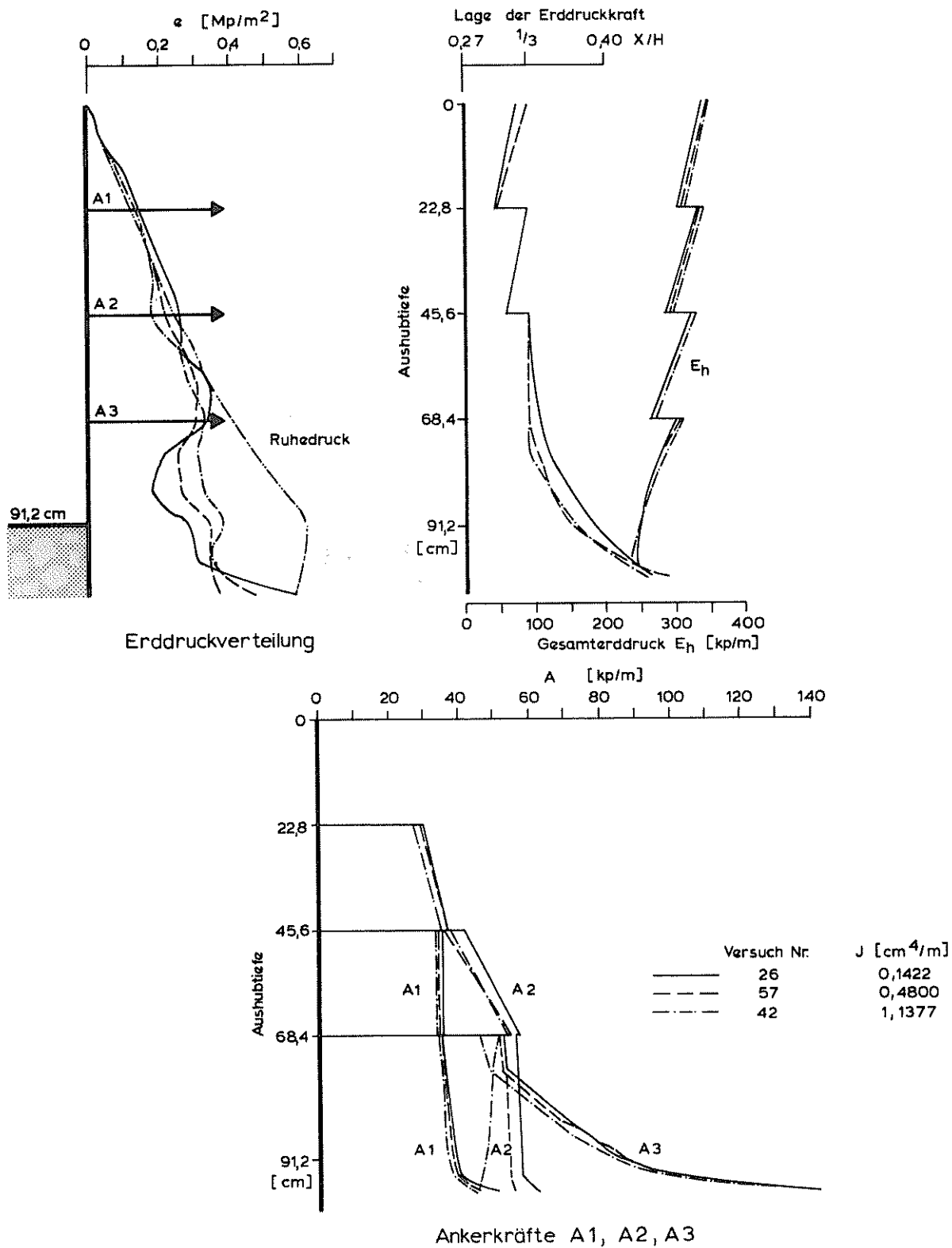


Bild 28: Einfluß der Wandsteifigkeit auf den Erddruck

Die Steifigkeiten verhalten sich wie $J_1 : J_2 : J_3 = 1 : 3,4 : 8$.

J_2 entspricht in der Natur $J_N = 24.300 \text{ cm}^4/\text{m}$ (Umrechnungsmaßstab $\lambda_L = 1 : 15$) also annähernd dem Profil Larssen III Neu mit einem Trägheitsmoment von $J_{\text{Larssen}} = 23.200 \text{ cm}^4/\text{m}$. Die Vorspannung betrug bei allen drei Versuchen 80 %. Die Anker waren 59,5 cm lang.

Die Erddruckverteilung (Bild 28) wird durch die Biegesteifigkeit nur im Bereich des Wandfußes beeinflusst. Je geringer die Biegesteifigkeit ist, um so stärker fällt der Erddruck unterhalb des letzten Ankers ab. Die Erddruckordinate der steifen Wand (J_3) im Bereich des Wandfußes ist 83 % größer als die der weichen Wand (J_1). Oberhalb des letzten Ankers ist der Erddruck dreieckförmig verteilt.

Bei der steifen Wand ist der Erddruck bis zum Wandfuß dreieckförmig verteilt.

Die Größe des Erddrucks ist bei allen drei Versuchen gleich groß.

Der Unterschied beträgt $\frac{\Delta Eh}{Eh} = 1,1 \%$ und liegt damit in derselben Größenordnung wie bei den Wiederholungsversuchen.

Der Verlauf der Ankerkräfte wird durch die Biegesteifigkeit wenig beeinflusst. Nur der 2. Anker weicht hier etwas ab, dies liegt jedoch daran, daß durch das Vorspannen des 3. Ankers die Ankerkraft bei der steifsten Wand (Versuch Nr. 42) durch die größere gegenseitige Beeinflussung stärker abfällt. Weiterhin ist der 2. Anker bei Versuch Nr. 26 etwas stärker vorgespannt worden als bei den beiden anderen Versuchen.

7.2.5 Einfluß des Aushubvorganges

Es wurde der Aushubvorgang mit und ohne Voreilung untersucht (Bild 29).

Bei dem Aushubvorgang ohne Voreilung wurde bis zur nächsten Ankerlage

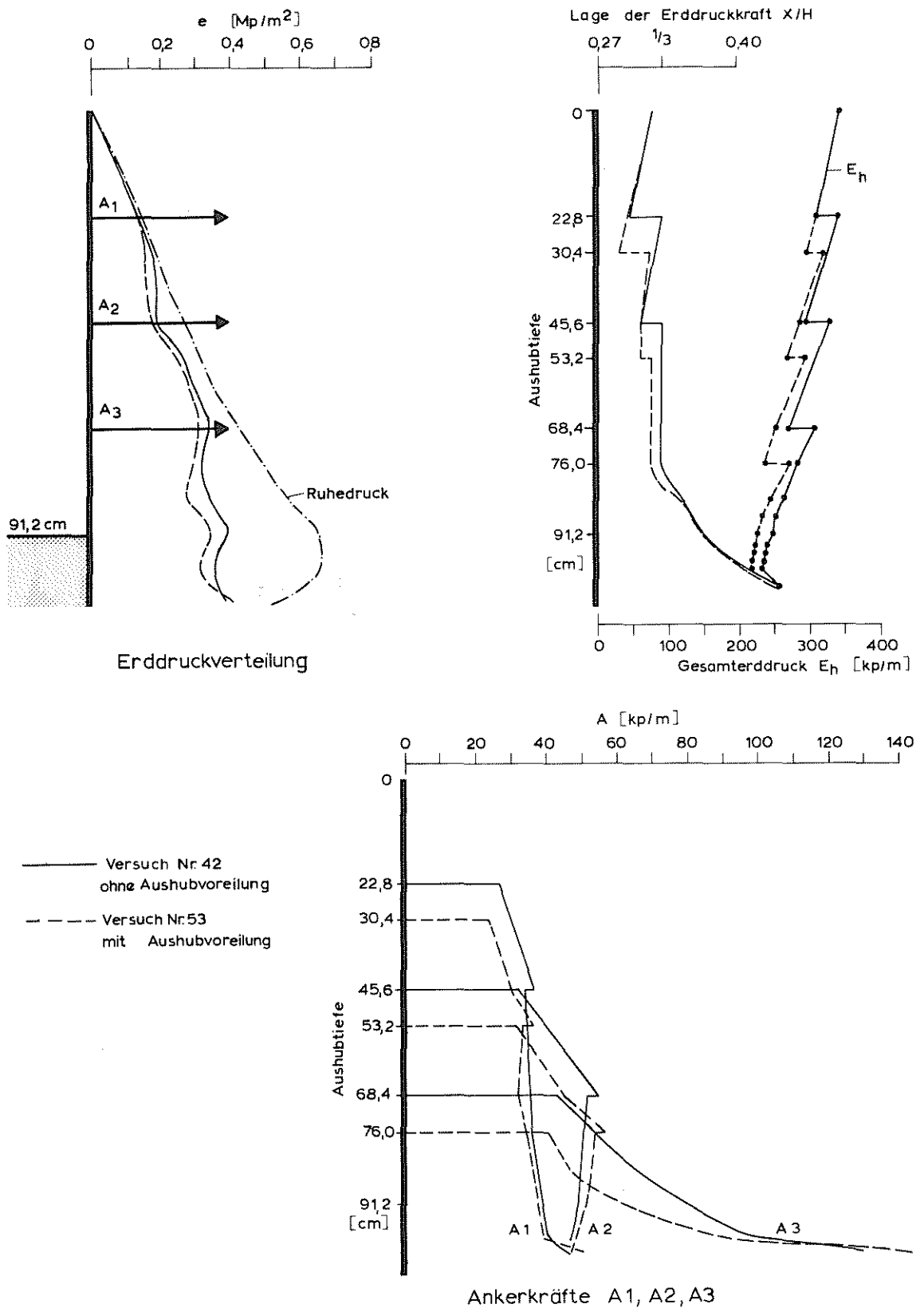


Bild 29: Einfluß des Aushubvorganges

ausgehoben und dann der Anker angespannt. Beim Voreilen des Aushubs wurde dagegen der Boden bis eine Lamelle unter die nächste Ankerlage ausgehoben und dann der Anker vorgespannt.

Das Voreilen des Aushubs hat auf die Erddruckverteilung während der einzelnen Aushubzustände und beim Endaushub keinen Einfluß. Nur die Größe des Erddrucks ist bei der Aushubvoreilung (219,8 kp/m) Versuch Nr. 53 geringer als bei dem Versuch Nr. 42 (239,9 kp/m), da durch das spätere Anspannen des Ankers die Wandbewegung im Bereich der Ankerlage zunimmt und sich damit der Boden stärker entspannen kann. Dies ist deutlich am Verlauf der Kurve für den Gesamterddruck zu erkennen. Der Erddruck von Versuch Nr. 42 nimmt bei jedem Aushubschritt mehr ab als bei Versuch Nr. 53. Der Verlauf der Ankerkräfte ist qualitativ wenig unterschiedlich. Die Ankerkräfte bei Versuch Nr. 42 sind etwas größer als die von Versuch Nr. 53.

7. 2. 6 Einfluß der Ankeranordnung und der Ankeranzahl

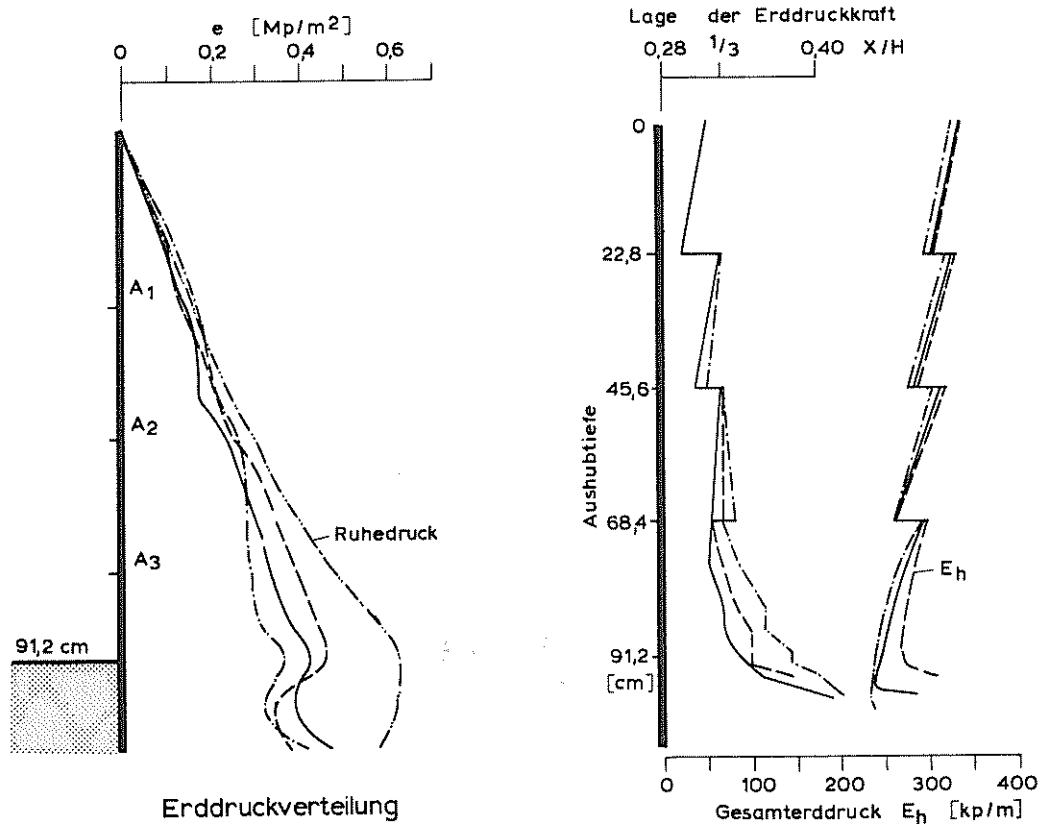
Ankeranordnung

Es wurden drei Ankeranordnungen mit jeweils drei Ankerlagen untersucht.

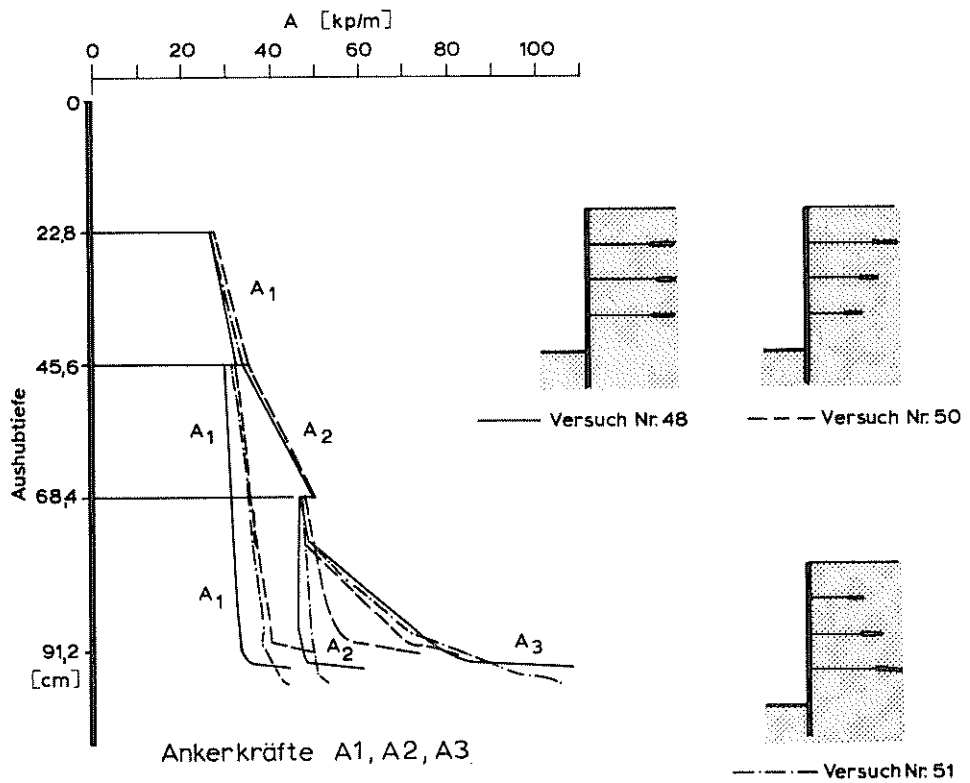
1. Gleichlange Anker (Versuch Nr. 48),
2. Mit der Tiefe zunehmende Ankerlänge (Versuch Nr. 51)
3. Mit der Tiefe abnehmende Ankerlänge (Versuch Nr. 50)

Die Gesamtlänge der Anker war bei jedem Versuch gleich groß und betrug $L = l_1 + l_2 + l_3 = 150 \text{ cm}$.

Der Erddruck ist bei allen drei Versuchen (Bild 30) nahezu dreieckförmig verteilt, jedoch verstärkt sich mit zunehmender Länge des letzten Ankers die Erddruckumlagerung im Bereich des Wandfußes. Je länger der 3. Anker ist, um so kleiner ist der Erddruck im Bereich des Wandfußes.



Erddruckverteilung



Ankerkräfte A1, A2, A3

Bild 30: Einfluß der Ankeranordnung

Die Größe des Erddrucks ist bis zur Aushubstufe $t = 68,4$ cm bei allen drei Versuchen gleich groß. Bei den nachfolgenden Aushubschritten macht sich jetzt die Wirkung des letzten Ankers insofern bemerkbar, daß mit zunehmender Ankerlänge der Erddruck kleiner wird.

Wesentliche Unterschiede in der Größe und dem Verlauf der Ankerkräfte sind bei den einzelnen Versuchen nicht aufgetreten.

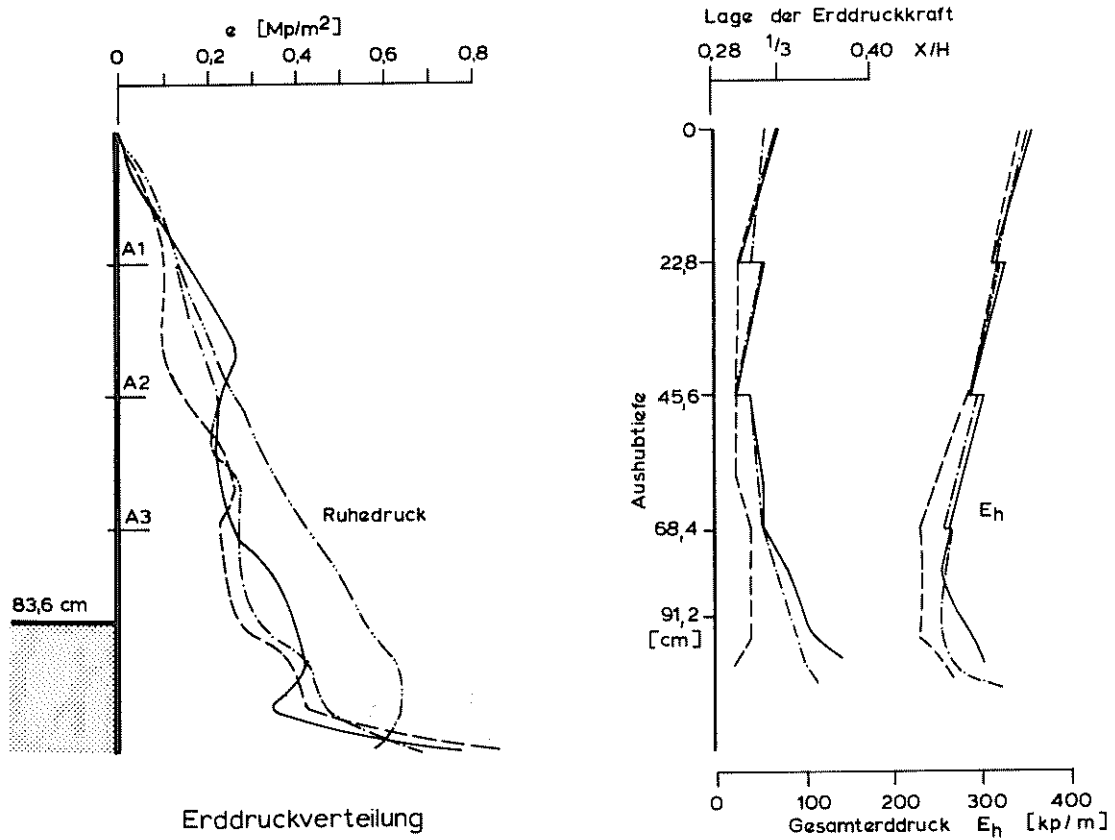
Ankeranzahl

Es wurden Versuche mit zwei Ankern (Versuch Nr. 8 und Nr. 22) und ein Versuch mit drei Ankern (Versuch Nr. 60) durchgeführt. Die Anker waren jeweils 39,5 cm lang. Die Ankervorspannung betrug 20 %.

Bei Versuch Nr. 22 wurde der Abstand zwischen 1. und 2. Anker verdoppelt. Der 2. Anker wurde also in Höhe des sonst 3. Ankers eingebaut.

Dies hat auf die Erddruckverteilung erheblichen Einfluß (Bild 31). Bei Versuch Nr. 60 (3 Anker) ist der Erddruck dreieckförmig verteilt. Fällt nun wie bei Versuch Nr. 8 der unterste Anker weg, so konzentriert sich der Erddruck in Höhe der beiden oberen Anker. Unterhalb der beiden Anker verläuft der Erddruck wie bei Versuch Nr. 60. Im Bereich des Wandfußes sind die Ordinaten wie im Bereich der oberen zwei Anker rund 30 % größer als bei Versuch Nr. 60.

Wird der Abstand der beiden Anker verdoppelt, so fällt der Erddruck unterhalb des 1. Ankers stark ab. Die Ordinaten sind hier 30 % kleiner als bei drei Ankern. Unterhalb des 2. und damit untersten Ankers nimmt der Erddruck wieder zu und verläuft wie bei Versuch Nr. 60. Der Unterschied zwischen den Erddruckordinaten von Nr. 22 und Nr. 60 beträgt 20 %.



Erddruckverteilung

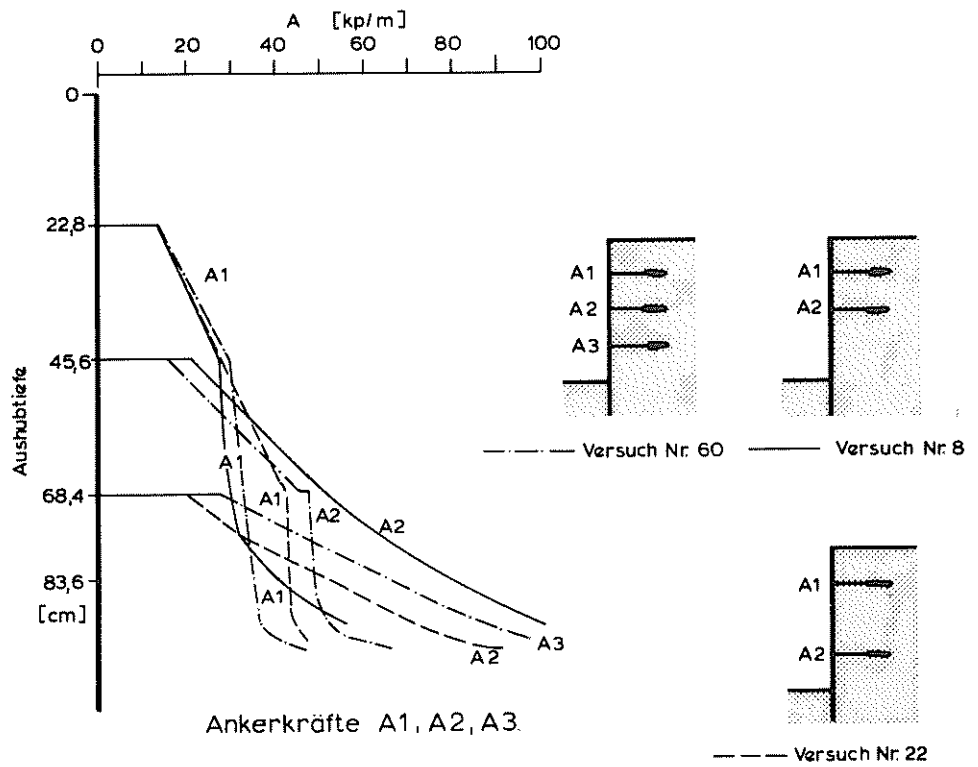


Bild 31: Einfluß der Ankeranzahl

An dem Versuch Nr. 22 und Nr. 8 sieht man deutlich, daß sich der Erddruck in Höhe eines Ankers (Versuch Nr. 22) oder in Höhe der zwei Anker (Versuch Nr. 8) bei nachfolgend großem Aushub konzentriert unterhalb der Anker dagegen abfällt. Diese Umlagerungen des Erddrucks treten bei Versuch Nr. 60, bei dem in gleichen Abständen die Anker angeordnet sind, und der Aushub gleichmäßig erfolgt, nicht auf.

Die Größe des Erddruckes ist bei Versuch Nr. 8 und Nr. 60 nahezu gleich. Nur bei Versuch Nr. 22 ist der Erddruck rund 11 % kleiner als bei den beiden anderen Versuchen. Dies kommt daher, daß durch den großen Aushub nach Einbau des 1. Ankers die Wand sich stark verformt und sich der Boden hinter der Wand entspannt.

Der Erddruck ist bis zur Aushubtiefe $t = 45,6$ cm bei allen drei Versuchen gleich groß. Danach fällt er stärker ab als bei Versuch Nr. 8 und Nr. 60, da bei diesen beiden Versuchen jetzt durch den 2. Anker eine Entspannung des Bodens verhindert wird.

Der Verlauf der Ankerkräfte ist bei allen drei Versuchen qualitativ gleich: die Kraft im Anker steigt solange mit zunehmendem Aushub an, bis der nächste Anker eingebaut ist. Weiterhin nimmt die Kraft im letzten Anker bis zum Bruch weiter zu. Die Kraft im 1. Anker bei Versuch Nr. 22 nimmt bis zum Einbau des 2. Ankers zu und ist 40 % größer als bei Versuch Nr. 8 und Nr. 60.

Die Größe des 2. Ankers bei Versuch Nr. 60 und Nr. 8 ist bis zum Einbau des 3. Ankers von Versuch Nr. 60 (bei Aushubtiefe $t = 68,4$ cm) nahezu gleich groß. Nach dieser Aushubtiefe bleibt die Kraft des 2. Ankers von Versuch Nr. 60 konstant, während die des 2. Ankers von Versuch Nr. 8 bis zum Bruch ständig zunimmt.

Bei Versuch Nr. 22 ist die Kraft des 2. Ankers für den Endaushub

($t = 83,6 \text{ cm}$) 30 % kleiner als die Kraft des 3. Ankers von Versuch Nr. 60. Dies liegt an der unterschiedlichen Größe des Erddrucks von Versuch Nr. 22 und Versuch Nr. 60.

7.2.7 Einfluß der Verankerungsstrecke

Um den Einfluß der Länge der Verankerungsstrecke (in der Praxis die Länge der Verpreßstrecke) zu ermitteln, wurden Versuche mit 10 cm (Versuch Nr. 47) und 20 cm (Versuch Nr. 42) langen Verankerungsplatten gemacht. Die Gesamtlänge der Anker war bei beiden Versuchen mit 59,5 cm gleich groß. Die Erddruckverteilung und der Verlauf der Ankerkräfte sind nahezu gleich.

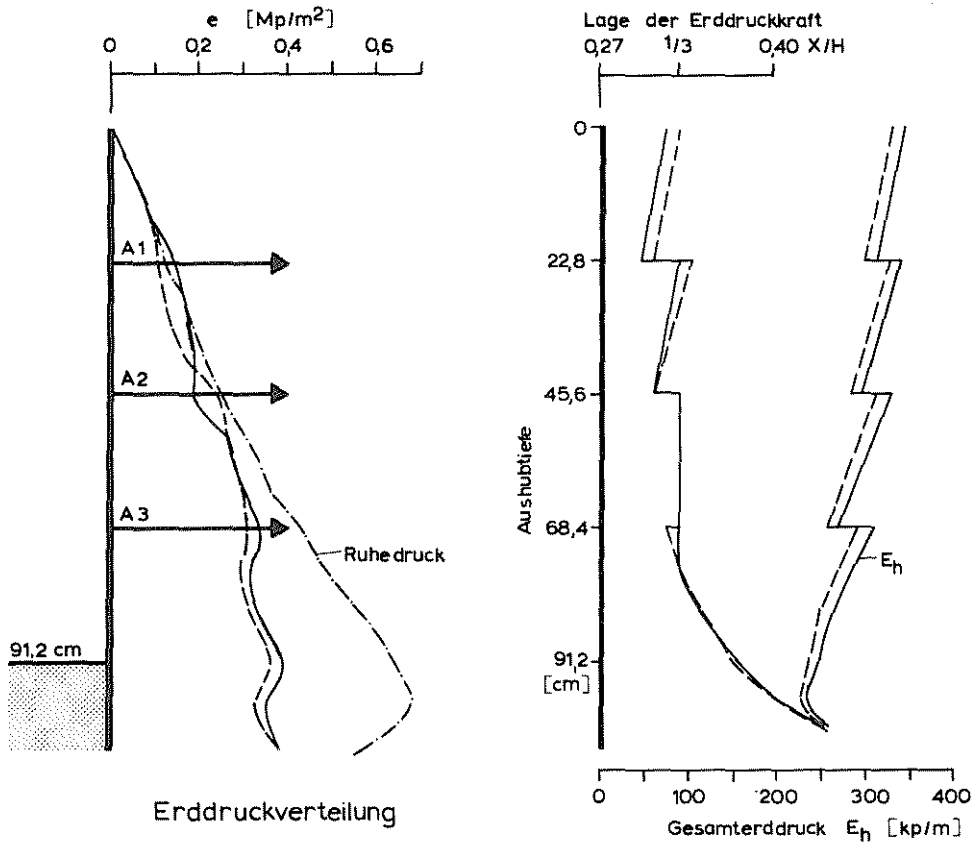
Die Abweichungen bei der Größe des Erddrucks erklären sich durch den unterschiedlichen Ruhedruck vor Beginn des Aushubs. Der Unterschied von $\frac{\Delta E_h}{E_h} = 4 \%$ ist jedoch nicht bedeutend. Entscheidend für die Größe des Erddrucks ist bei diesen Versuchen die Gesamtankerlänge.

Der geringe Unterschied zwischen diesen beiden Versuchen läßt sich damit erklären, daß die Tragfähigkeit des Einzelankers mit kurzer Verankerungsstrecke aufgrund des großen Reibungswinkels noch nicht erschöpft war. Erst bei einem Vorspannungsgrad von 140 % war die maximale Tragfähigkeit des Einzelankers bei einer Verankerungsstrecke von 10 cm erreicht.

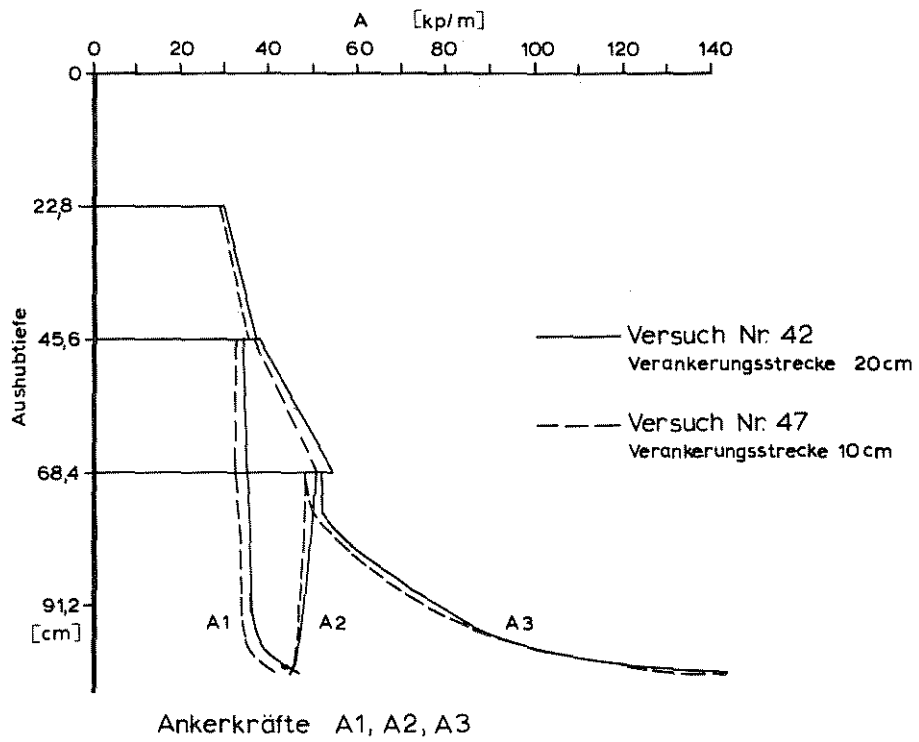
7.3 Biegemomente

7.3.1 Fehlerbetrachtung

Die Biegemomente in der Modellwand sind durch Betrachtung des Gleichgewichts leicht zu ermitteln, da alle auf die Wand wirkenden Kräfte ge-



Erddruckverteilung



Ankerkräfte A1, A2, A3

Bild 32: Einfluß der Verankerungsstrecke

messen werden. Aufgrund der unvermeidbaren Meßungenauigkeit sind jedoch die Einzelkräfte an der Wand nicht genau im Gleichgewicht. Dies trifft weniger für die Querkräfte zu, da eine Querkraft am Wandfuß (siehe Kapitel 4.3.1 $\Sigma H = 0$) von nur 0,6 % des Gesamterddrucks Eh übrigbleibt. Dagegen täuschen schon kleine Fehler bei den gemessenen Ankerkräften und im oberen Bereich der Erddruckfläche wegen der großen Abstände vom Wandfuß der Rechnung nach ein großes Restmoment vor. Dadurch wird der Momentenverlauf natürlich verfälscht.

Durch eine geringfügige Korrektur der Anker und der Erddruckfläche ist es möglich, die Randbedingungen (Moment und Querkraft am Wandfuß müssen sich zu Null ergeben) zu erfüllen. Die Form der Erddruckfläche wird durch diese Korrektur nicht beeinflusst, da die Änderung der einzelnen Erddruckkoordinaten weniger als 1 Promille beträgt.

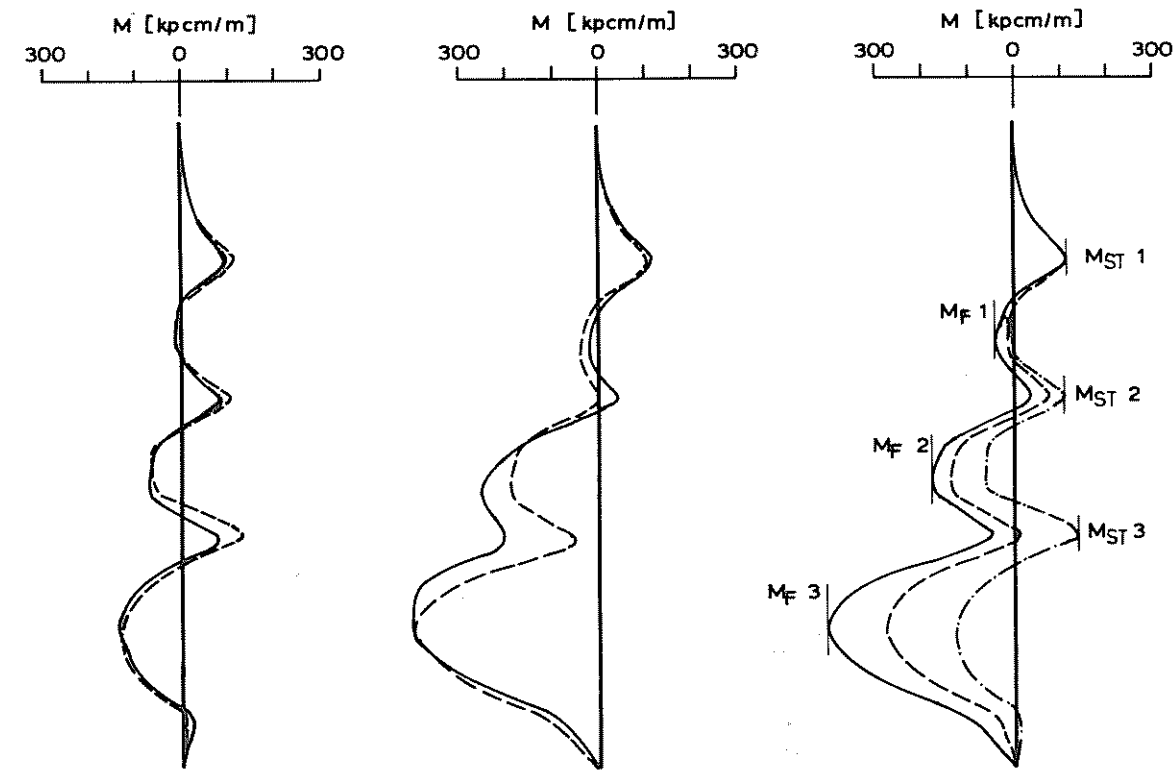
W a n o s c h e k (1971) hat in seiner Arbeit gezeigt, daß die Erfüllung der statischen Randbedingungen zur Ermittlung der Momentenfläche völlig ausreichend ist und daß die Formänderungsbedingungen an der elastischen Wand nicht berücksichtigt zu werden brauchen.

7.3.2 Einfluß der Ankervorspannung, Biegesteifigkeit und des Aushubvorganges (B i l d 33)

Die Vorspannung der Anker erhöht praktisch nur die Momente im Bereich der Anker. Die Feldmomente dagegen haben sich kaum geändert.

Das Voreilen des Aushubs wirkt sich in einer Erhöhung der Stütz- und Feldmomente aus. Das Stützmoment in Höhe des 3. Ankers hat sich durch das Voreilen des Aushubs um das Vierfache vergrößert. Ebenso hat die Wandverformung und der Krümmungsradius stark zugenommen (B i l d 41).

Der Einfluß der Biegesteifigkeit ist auf die Stützmomente M_{ST}^2 , M_{ST}^3



Einfluß Ankervorspannung

- Vorspannungsgrad 80% Vers.Nr. 26
- Vorspannungsgrad 0% Vers.Nr. 28
- - - Wiederholungsversuch Nr. 27
- Vorspannungsgrad 0%

Einfluß Aushubvorgang

- ohne Aushubvoreilung Vers.Nr. 42
- mit Aushubvoreilung Vers.Nr. 53

Einfluß Biegesteifigkeit

J [cm ⁴ /m]	Versuch Nr.
0,1422	26
0,4800	57
1,1577	42

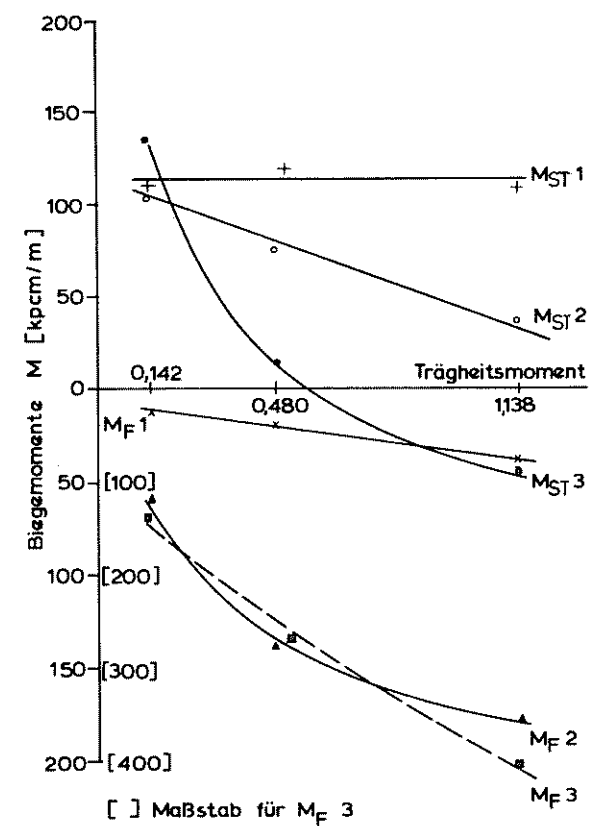


Bild 33: Einfluß der Vorspannung, des Aushubvorganges und der Biegesteifigkeit auf die Momente (Aushubtiefe $t=91,2$ cm)

und die Feldmomente M_{F2} , M_{F3} besonders groß. Bei einem Verhältnis der Steifigkeiten von 1 : 8 verhalten sich die Stützmomente wie 1 : 2 und die Feldmomente wie 1 : 3. Nur das Kragmoment M_{ST1} ist erwartungsgemäß unabhängig von der Biegesteifigkeit. Weiterhin ist bei der weichen Wand (-.-.-.-Linie) noch eine Einspannung des Wandfußes vorhanden.

7.3.3 Einfluß der Ankerlänge, der Ankeranordnung und der Ankeranzahl (Bild 34)

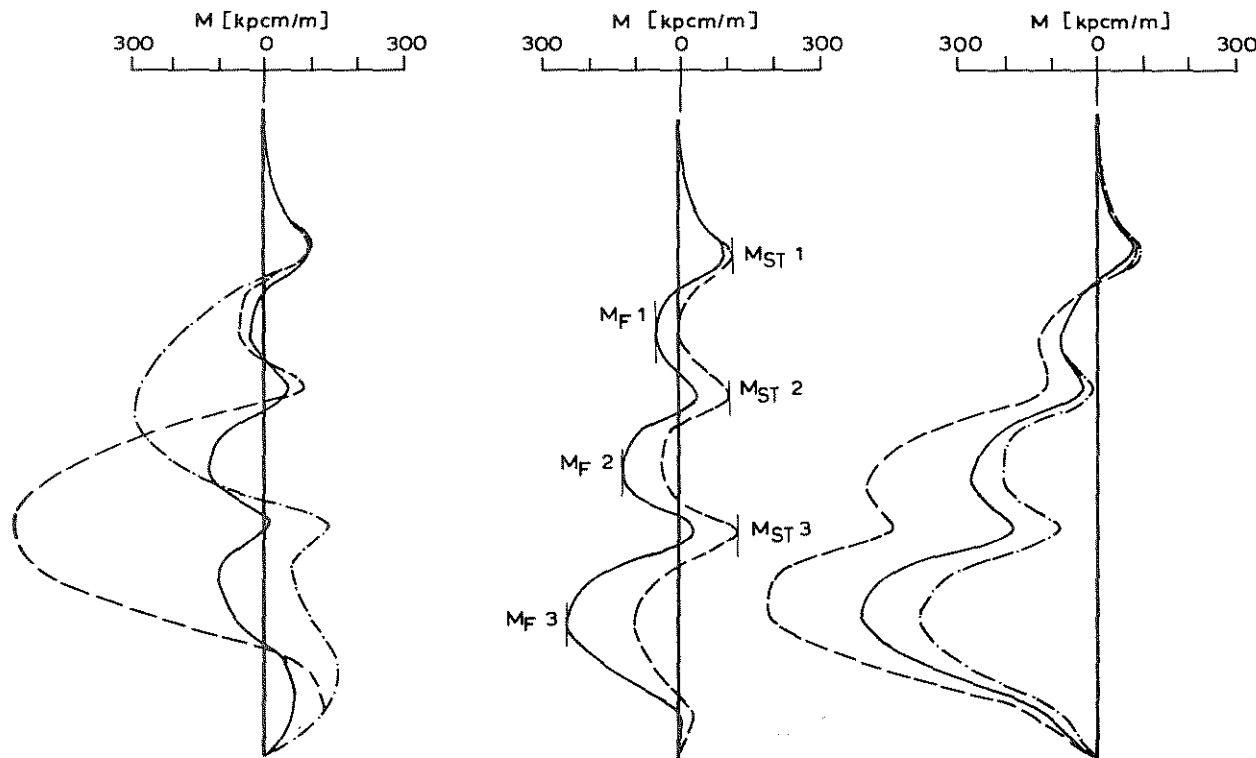
Eine Zunahme der Ankerlänge um 76 % bewirkt eine Erhöhung der Stützmomente M_{ST2} und M_{ST3} um das Zwei- bis Dreifache, die Feldmomente M_{F2} und M_{F3} werden dagegen um 75 % bzw. 60 % verringert.

Die Anordnung der Anker spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Eine mit der Tiefe abnehmende Ankerlänge erhöht die Stütz- bzw. Feldmomente im Bereich des kurzen Ankers gegenüber einer Anordnung von drei gleichlangen Ankern um das 2,5-fache bzw. um das 2-fache.

Eine Zunahme der Ankerlänge mit der Tiefe wirkt sich dagegen durch eine Verringerung des Stütz- und Feldmomentes im Bereich des unteren langen Ankers günstig aus.

Die Zahl der Anker und ihre Lage wird durch den Vergleich der Versuche Nr. 8 (2 Anker oben), Nr. 22 (1 Anker oben und 1 Anker unten) und Nr. 60 (3 gleichlange Anker) aufgezeigt. Bei einer Anordnung von drei Ankern in gleichmäßigen Abständen treten die kleinsten Feld- und Stützmomente auf. Feld- und Stützmomente sind außerdem fast gleich groß. Läßt man jetzt den mittleren Anker wie bei Versuch Nr. 22 weg, steigt das Feldmoment um über das Doppelte an.

Wenn man den 3. Anker wegläßt, wie bei Versuch Nr. 8, nimmt das Feldmoment um das Fünffache zu.



Einfluß Ankeranzahl ($t = 83,6\text{cm}$)

- 2 Anker Versuch Nr. 8
- 3 Anker Versuch Nr. 60
- { 1 Anker oben } Versuch Nr. 22
- { 1 Anker unten }

Einfluß Ankerlänge

- Ankerlänge 69,5cm Versuch Nr. 24
- Ankerlänge 39,5cm Versuch Nr. 60

Einfluß Ankeranordnung

- | Versuch Nr. | Ankerlänge [cm] |
|-------------|-----------------|
| 50 | --- { 49,5 |
| | --- { 39,5 |
| 48 | — { 29,5 |
| | — { 49,5 |
| 51 | --- { 29,5 |
| | --- { 39,5 |
| | --- { 49,5 |

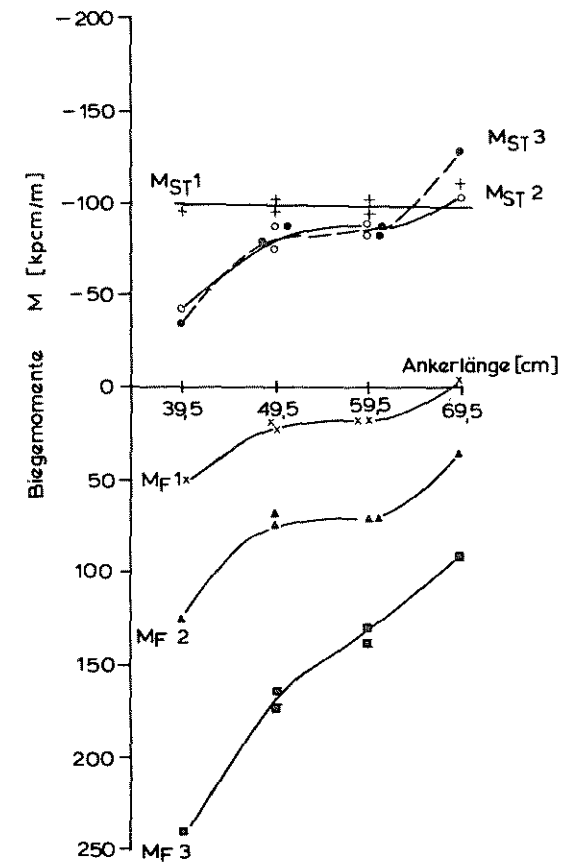


Bild 34: Einfluß der Ankeranzahl, der Ankerlänge und der Ankeranordnung auf die Momente.
(Aushubtiefe $t = 91,2\text{cm}$)

7.4 Zusammenfassung

Standsicherheit

Entscheidend für die Standsicherheit des Systems Wand-Boden-Anker ist die Länge des untersten Ankers. Dies wird sowohl bei drei gleichlangen als auch bei einer mit der Tiefe zunehmenden Ankerlänge deutlich. Von der Länge des untersten Ankers ist die Größe der erforderlichen Stützkraft im Bruchzustand abhängig. Obwohl das System Wand-Boden-Anker bei diesen Versuchen nahezu dreieckförmig und nicht, wie bei drei gleichlangen Ankern, rechteckförmig ausgebildet ist, sind die Stützkraften gleich groß.

Weiterhin ist wichtig, daß die mit geraden Gleitflächen errechneten Anker- und Stützkraften mit zunehmender Ankerlänge viel zu hohe Ankerkräfte bzw. viel zu niedrige Stützkraften liefern und damit auf der unsicheren Seite liegen. Während die mit gekrümmten Gleitflächen ermittelten Kräfte wesentlich besser mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

Die Vorspannung der Anker erhöht die Anker- und Erddruckkräfte. Sie beeinflußt also nur die inneren Kräfte des Systems Wand-Boden-Anker und hat auf die äußere Stützkraft E_{ph} keinen Einfluß. Ebenso hat die Biegesteifigkeit keinen Einfluß auf die Standsicherheit.

Die Versuche mit einer über die Tiefe abnehmenden Ankerlänge eignen sich weniger für eine theoretische Untersuchung, da hier von einer Auflockerungszone aus im Bereich des unteren kurzen Ankers eine Gleitfläche entlang der Ankerenden entsteht. Dies wird daran deutlich, daß bei diesen Versuchen der Bruch nicht plötzlich sondern erst allmählich nach größeren Bewegungen auftrat, im Gegensatz zu den anderen Versuchen, bei denen das Bodenmassiv plötzlich zu Bruch ging.

Erddruck

Der Erddruck ist bei einer biegsamen dreifach verankerten Wand von der Bodenoberfläche bis zum letzten Anker dreieckförmig verteilt. Unterhalb des letzten Ankers fällt der Erddruck etwas ab. Dieser Abfall ist sowohl von der Ankerlänge als auch von der Biegesteifigkeit abhängig.

Durch den Grad und die Verteilung der Ankervorspannung ist die Form der Erddruckfläche und die Größe des Erddrucks beeinflussbar.

Entscheidend jedoch ist, daß die Erddruckkraft und die Ankerkräfte innere Kräfte des Systems Wand-Boden-Anker sind und sich gegenseitig beeinflussen, was an dem Einfluß der Ankervorspannung und der Ankerlänge ersichtlich ist.

Biegemomente

Die Anordnung der Anker und die Biegesteifigkeit haben großen Einfluß auf die Größe der Feld- und Stützmomente in der Wand.

Ebenso beeinflussen die Ankervorspannung und der Aushubvorgang die Größe der Momente.

Weiterhin kann durch mehrere in engem Abstand angeordnete Anker die Beanspruchung der Wand klein gehalten werden.

8. Verformung der Wand und des Bodens

8.1 Übersicht

Die Verformung der Wand, die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche werden bei jedem Aushubschritt gemessen. Bis zum Augenblick des Bruches nehmen die Verformungen nahezu linear mit dem Aushub zu. Der Bruch kündigt sich durch eine überproportionale Zunahme der Verformungen an.

Die Modellwand hat sich beim Endaushub nahezu parallel verschoben. Nur der Wandfuß bleibt etwas zurück.

Die Geländeoberfläche setzt sich fast gleichmäßig. Die Setzungsmulde reicht weit über die Ankerenden hinaus. Erst bei Beginn des Bruches treten ungleichmäßige Setzungen auf.

Der Verlauf der Horizontalverschiebung der Bodenoberfläche macht deutlich, daß das System Wand-Boden-Anker in sich kaum Zerrungen erleidet. Dagegen treten im Bereich hinter den Ankern beachtliche Dehnungen der Geländeoberfläche auf, die zu einer Auflockerung des Bodens führen.

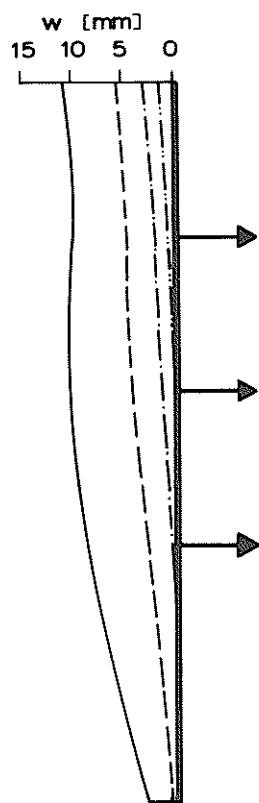
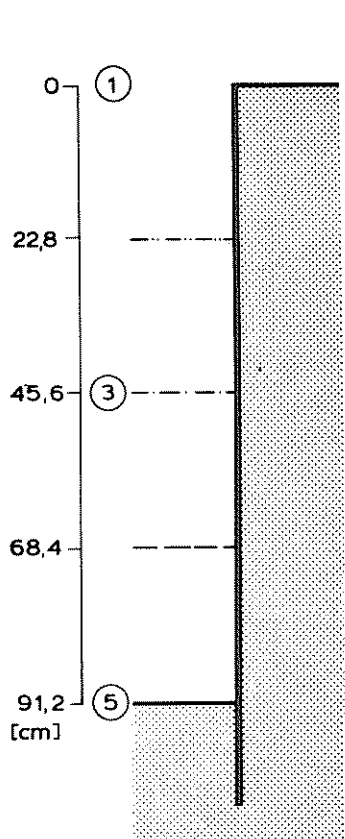
In den Kapiteln 8.2 bis 8.4 werden die wichtigsten Einflüsse, wie Ankerlänge, Ankeranordnung und Aushubvorgang untersucht. In Kapitel 8.5 sind die Einflüsse der Vorspannung, Wandsteifigkeit und Verankerungstrecke zusammengefaßt.

8.2 Einfluß der Ankerlänge

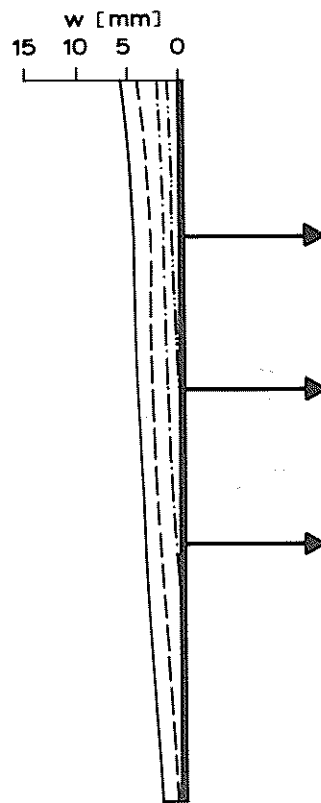
Anhand der Versuche Nr. 60 (3 kurze Anker) und Nr. 24 (3 lange Anker) wird der Einfluß der Ankerlänge aufgezeigt. Der Vorspannungsgrad der Anker betrug bei diesen beiden Versuchen 20 %.

Den größten Einfluß auf die Verformung der Wand und des Bodens hat die Ankerlänge (Bild 35). Eine Vergrößerung der Ankerlänge von 39,5 cm (Versuch Nr. 60) um 30 cm auf 69,5 cm (Versuch Nr. 24), also um $\frac{\Delta l}{l} = \frac{30}{39,5} \cong 76\%$ bewirkt eine Abnahme der Verformungen von $\frac{\Delta w}{w} = \frac{6\text{mm}}{10\text{mm}} \cong 60\%$. Eine Verlängerung der Anker von 39,5 cm in Schritten von jeweils 10 cm wirkt sich durch eine nahezu lineare Abnahme der Wandbewegung aus (Bild 36). Die Wand verschiebt sich sowohl bei den kurzen Ankern als auch bei den langen Ankern parallel. Dies wird durch die gleiche Zunahme der Verschiebung des Wandkopfes, der Wandmitte und des Wandfußes in Abhängigkeit von der Aushubtiefe deutlich. Nach dem Einbau eines Ankers macht sich beim folgenden Aushubschritt sofort die Länge des vorher eingebauten Ankers in einer Abnahme oder einer Zunahme der Verformung bemerkbar.

In Bild 36 sind die Punkte 2, 4 und 7 die Horizontalverschiebungen und die Setzungen in Abhängigkeit von der Ankerlänge aufgetragen. Die Abnahme der Horizontalbewegungen der Punkte 2 und 4 stimmt mit der Abnahme der Wandbewegungen gut überein. Dagegen ist die Verschiebung des Punktes 7 praktisch von der Ankerlänge unabhängig. Die Punkte 2 und 4 sind Punkte des Bodenblocks Wand-Boden-Anker und des hinter den Ankern mit zunehmendem Aushub entstehenden dreieckförmigen Gleitkörpers (Bild 17), während Punkt 7 sich in dem Bereich der Geländeoberfläche befindet, der im Bruchzustand in Ruhe bleibt. Der Einfluß der Setzungen reicht sowohl bei den kurzen als auch bei den langen Ankern weit über die Ankerlänge hinaus. Die beim Versuch Nr. 60 aufgetretenen starken Setzungsunterschiede kommen daher, daß bei dieser Aushubtiefe schon der plastische Grenzzustand erreicht ist.

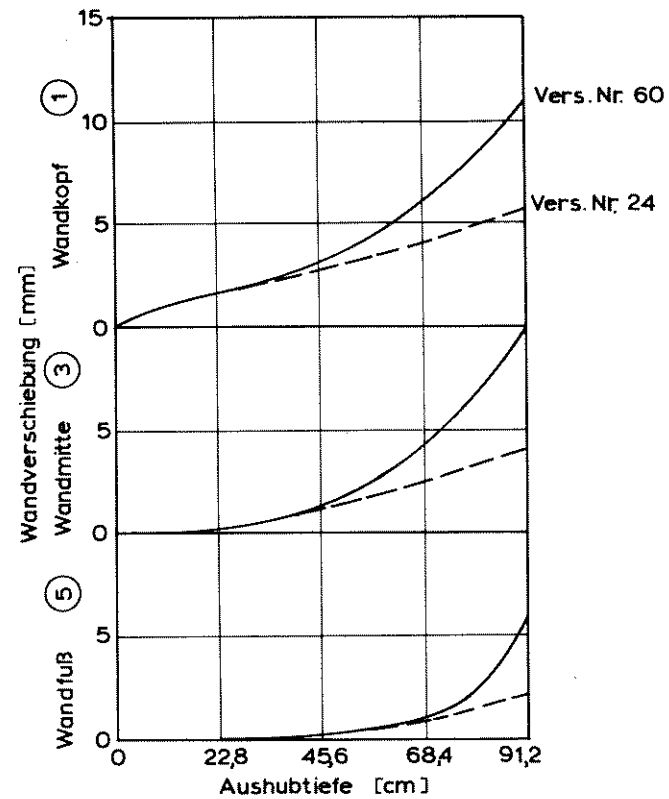


Versuch Nr. 60
Ankerlänge 39,5cm



Versuch Nr. 24
Ankerlänge 69,5cm

Wandverschiebung



Wandverschiebung während
des Aushubs

Bild 35: Einfluß der Ankerlänge auf die Wandverschiebung

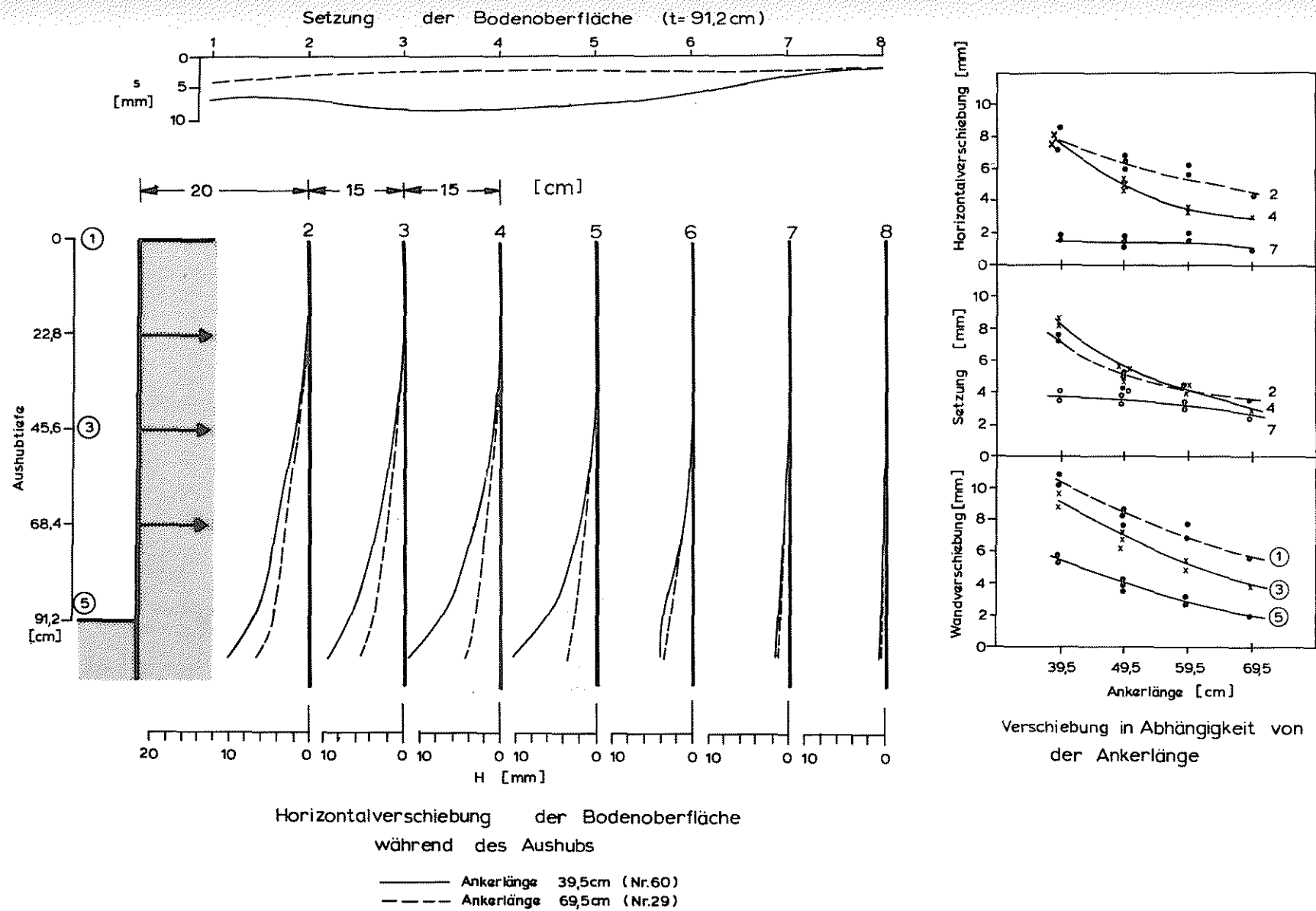


Bild 36: Einfluß der Ankerlänge auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche

8.3. Einfluß der Ankeranordnung

8.3.1 Summe der Ankerlängen ist konstant

Bei den Versuchen Nr. 48, 50 und Nr. 51 wird geprüft, welchen Einfluß die Anordnung der Anker bei jeweils gleicher Gesamtankerlänge auf die Verformungen hat. Bei Versuch Nr. 48 sind alle drei Anker gleichlang. Bei den Versuchen Nr. 50 und Nr. 51 hat nur der mittlere Anker die gleiche Länge wie bei Versuch Nr. 48. Dagegen wird der unterste Anker jeweils um 10 cm verkürzt bzw. verlängert. Die Vorspannung der Anker beträgt bei allen drei Versuchen 80 %.

Im Vergleich zu der Parallelverschiebung der Wand bei Versuch Nr. 48 und Nr. 47 hat die Wandverschiebung bei einer mit der Tiefe abnehmenden Ankerlänge (Versuch Nr. 50) im unteren Wandbereich um 60 % zugenommen, während die Verschiebung des Wandkopfes gegenüber Versuch Nr. 48 um rund 12 % abgenommen hat. Bei einer mit der Tiefe zunehmenden Ankerlänge (Versuch Nr. 51) ist die Verschiebung des Wandkopfes 12 % größer als bei Versuch Nr. 48, während die Verschiebung des Wandfußes nur geringfügig kleiner geworden ist.

Die Setzung der Geländeoberfläche ist bei dem Versuch Nr. 48 mit 3 gleichlangen Ankern und dem Versuch Nr. 51 mit Ankern, deren Länge mit der Tiefe zunehmen, fast gleichgroß. Der Einfluß der mit der Tiefe abnehmenden Ankerlänge macht sich durch eine im Mittel 20 % größere Setzung bemerkbar.

Die Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche hat, wie zu erwarten war, bei dem Versuch Nr. 51 aufgrund des oberen kurzen Ankers während des Aushubs am stärksten zugenommen. Dagegen ist beim Endaushub die Horizontalverschiebung bei einer mit der Tiefe abnehmenden Ankerlänge größer als bei einer mit der Tiefe zunehmenden Ankerlänge.

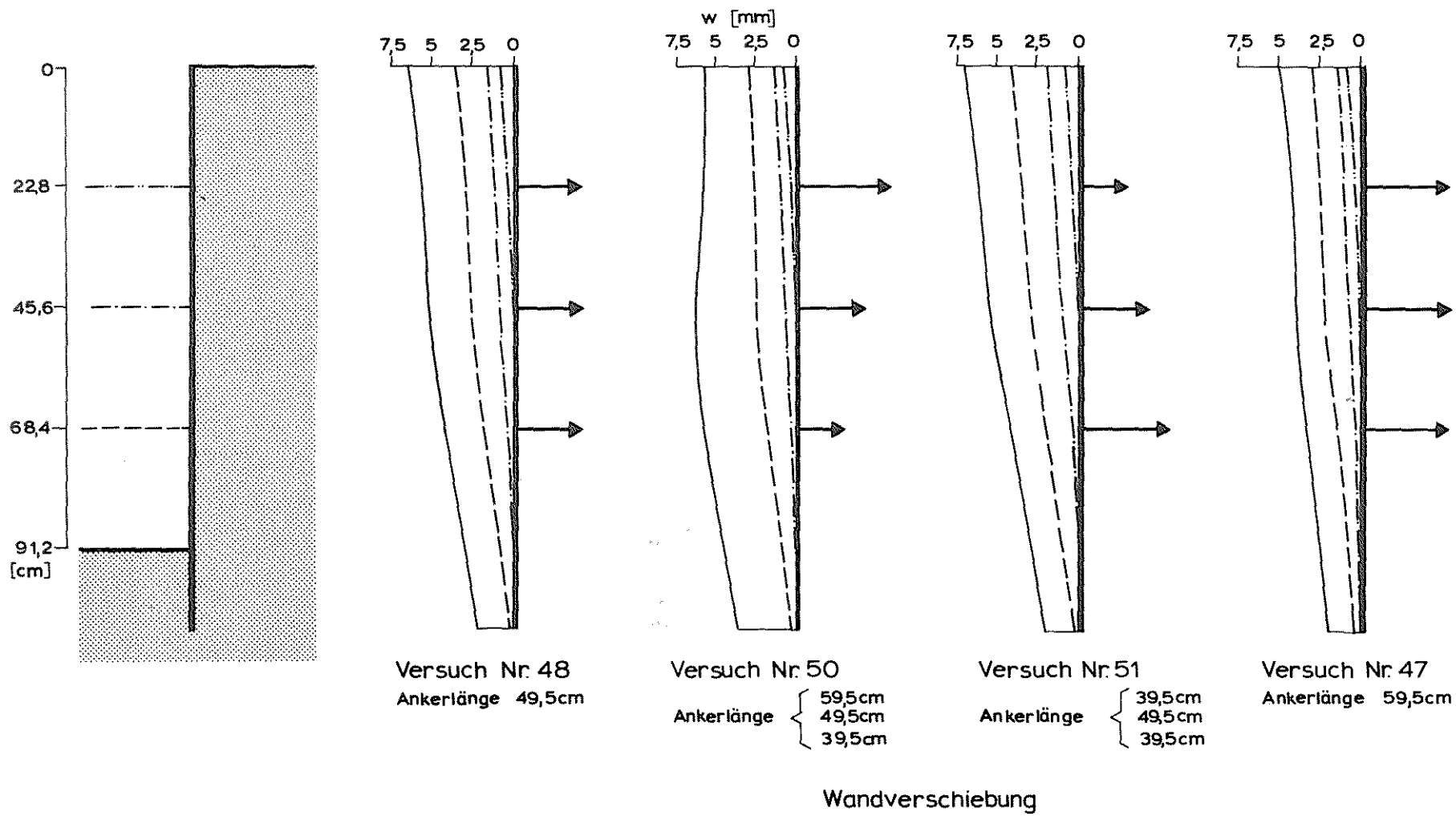


Bild 37: Einfluß der Ankeranordnung auf die Wandverschiebung
(Gesamtankerlänge = konst.)

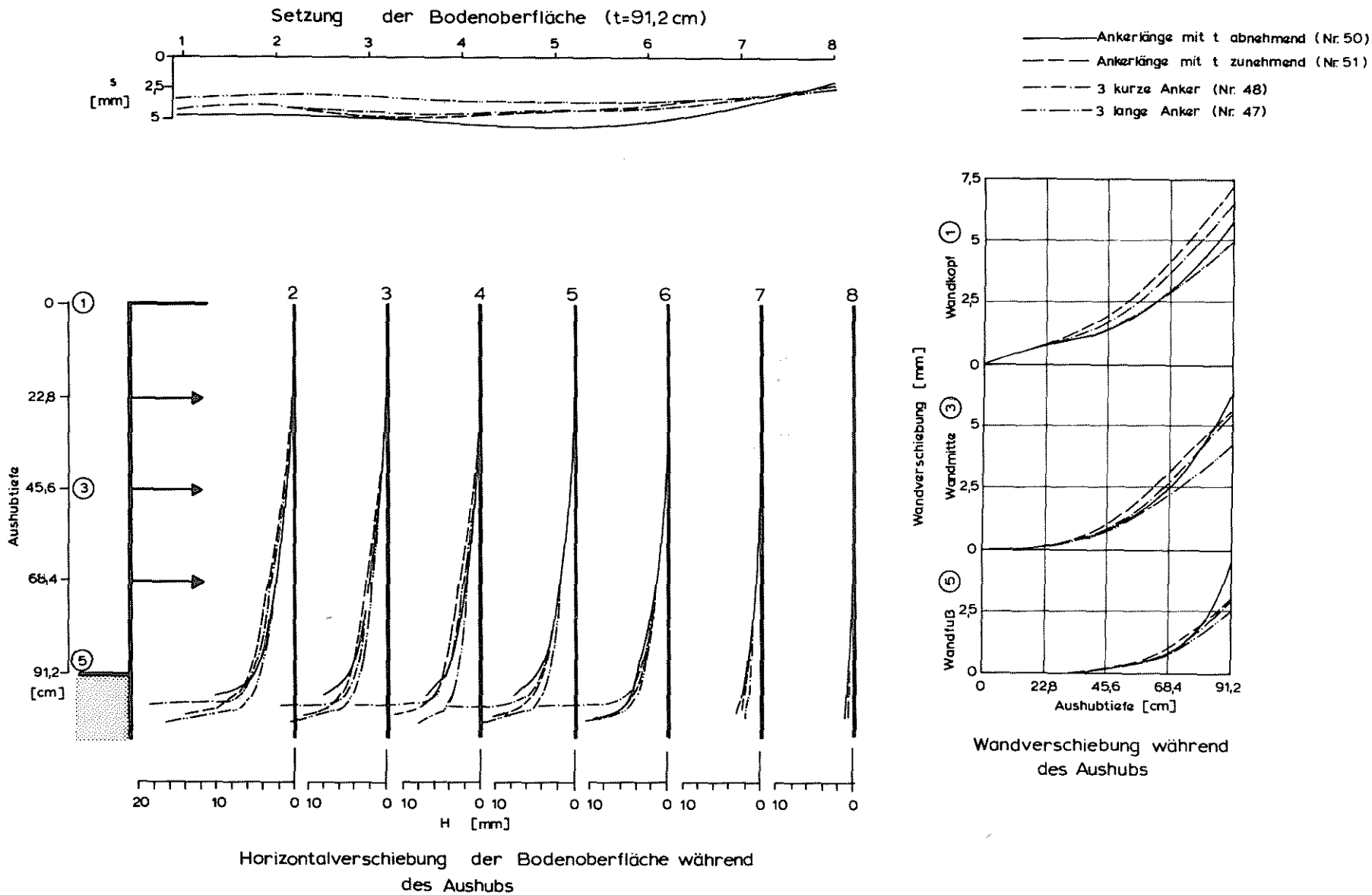


Bild 38: Einfluß der Ankeranordnung auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche (Gesamtankerlänge = konst.)

8.3.2 Summe der Ankerlängen ist nicht konstant

Durch den Vergleich der Versuche Nr. 50 und Nr. 51 mit dem Versuch Nr. 47 wird gezeigt, inwieweit sich eine Verlängerung des mittleren und des untersten Ankers (Versuch Nr. 50) bzw. des mittleren und des obersten Ankers (Versuch Nr. 51) auf die Verformungen auswirkt (Bild 37 und 38).

Die Verschiebungen des Wandkopfes sind bei Versuch Nr. 50 und Nr. 47 nahezu gleich groß, da die oberen Anker gleich lang sind. Dagegen sind die Verschiebungen der Wandmitte und des Wandfußes bei Versuch Nr. 47 um 40 % kleiner geworden.

Gegenüber Versuch Nr. 51, bei dem der oberste und der mittlere Anker verkürzt worden sind, sind die Verformungen im Bereich des Wandkopfes und der Wandmitte um rund 45 % zurückgegangen.

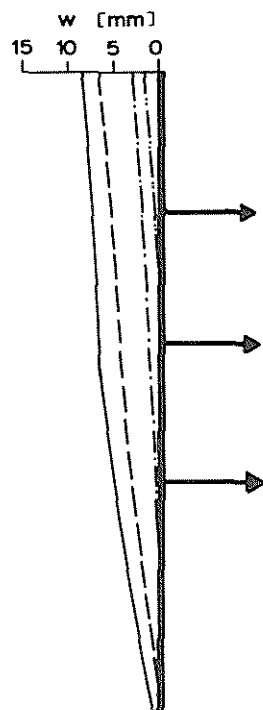
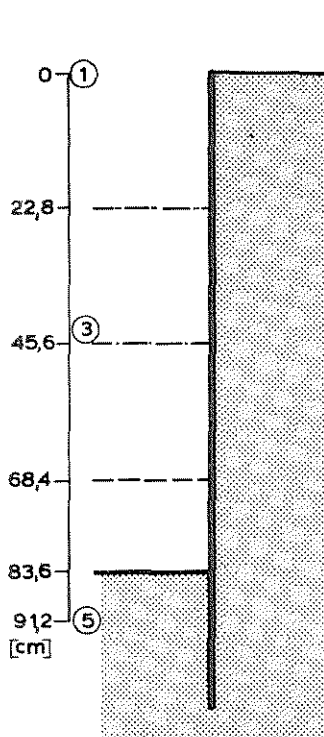
Die Setzung der Bodenoberfläche ist im Vergleich zu den Versuchen Nr. 50 und Nr. 51 um ca. 20 % kleiner geworden.

Die Horizontalverschiebung der Bodenoberfläche ist nur bei Versuch Nr. 51 etwas größer als bei den Versuchen Nr. 50 und Nr. 47, da der oberste Anker kürzer ist.

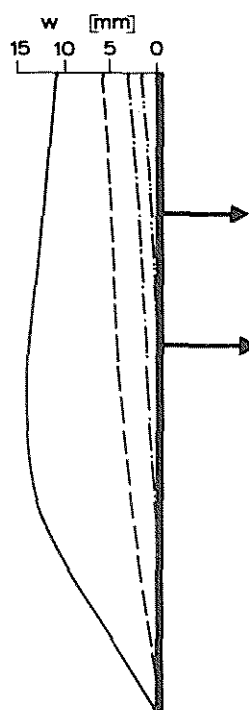
8.3.3 Einfluß der Ankeranzahl und der Ankeranordnung

Durch die Versuche Nr. 60 (3 Anker), Nr. 8 (2 Anker oben) und Nr. 22 (1 Anker oben und 1 Anker unten) wird der Einfluß der Ankeranzahl und der Ankeranordnung ermittelt.

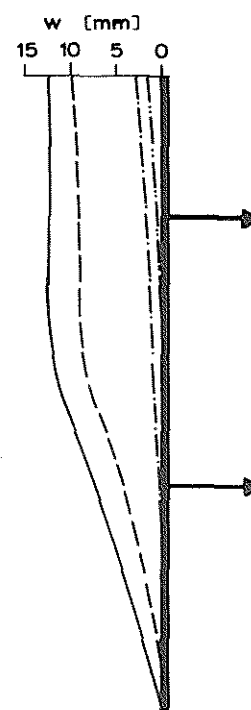
Die Wandbewegung ist bei einer Anordnung von drei Ankern (Bild 39) am kleinsten. Die Parallelverschiebung der Wand tritt bei allen drei Versuchen auf, nur bleibt wegen der teilweisen Einspannung der Wandfuß deutlich zurück.



Versuch Nr. 60
Ankerlänge 39,5cm

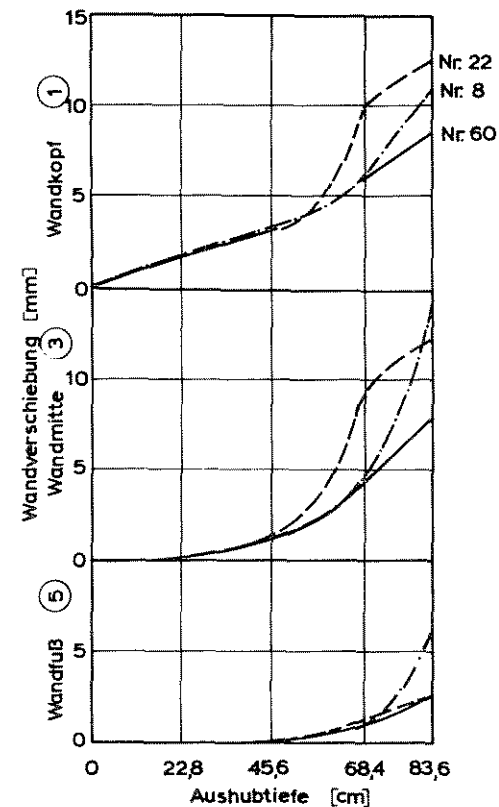


Versuch Nr. 8
Ankerlänge 39,5cm



Versuch Nr. 22
Ankerlänge 39,5cm

Wandverschiebung



Wandverschiebung während
des Aushubs

Bild 39: Einfluß der Ankeranzahl auf die Wandverschiebung

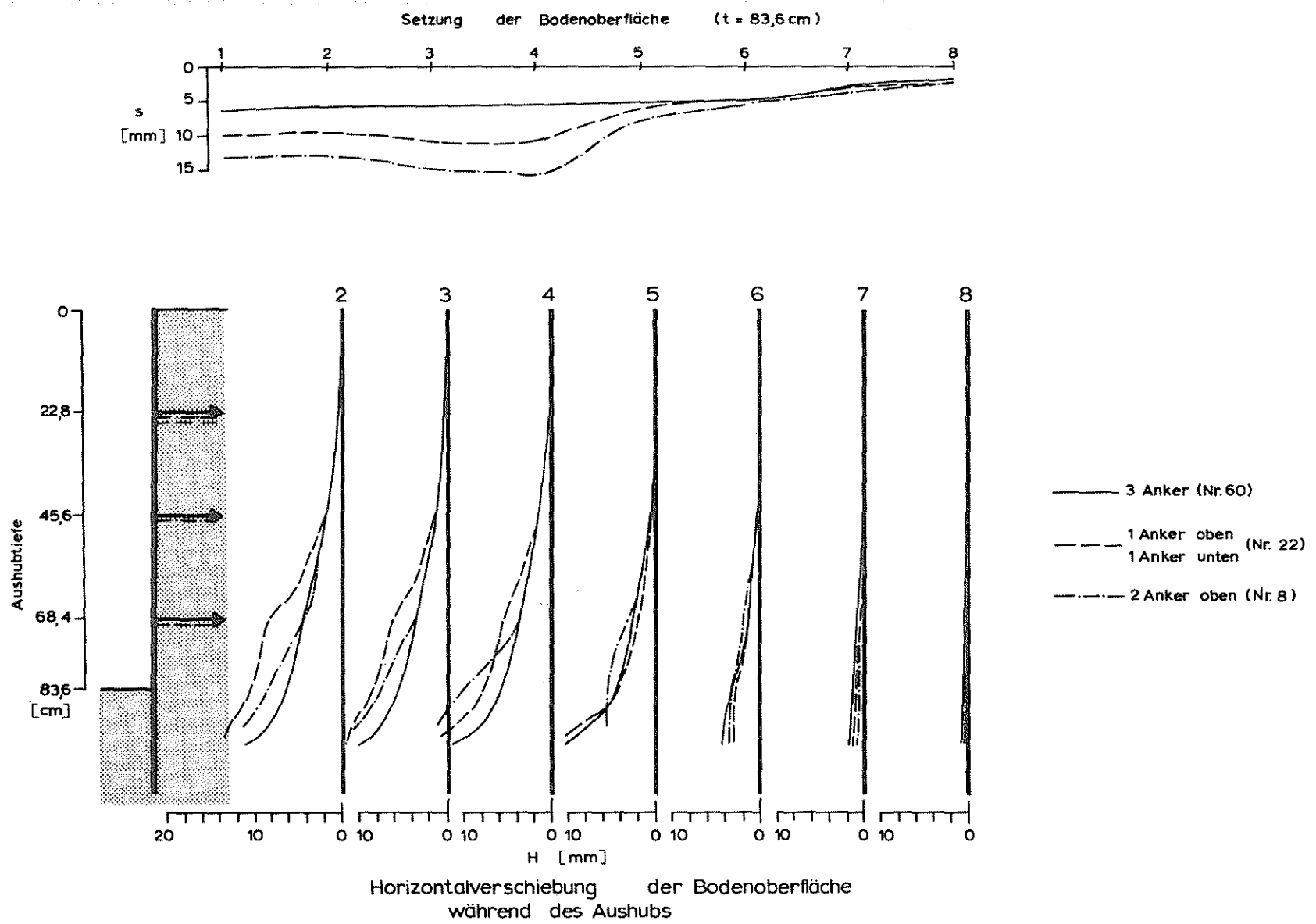


Bild 40: Einfluß der Ankeranzahl auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche.

Die Bewegung des Wandkopfes, der Wandmitte und des Wandfußes ist bei allen drei Versuchen bis zur Aushubstufe $t = 45,6$ cm nahezu gleich groß. Beim weiteren Aushub nimmt die Wandbewegung bei Versuch Nr. 22 ständig bis zum Bruch zu, da bei der Aushubstufe $t = 45,6$ cm im Gegensatz zu den Versuchen Nr. 8 und Nr. 60 kein Anker eingebaut wurde.

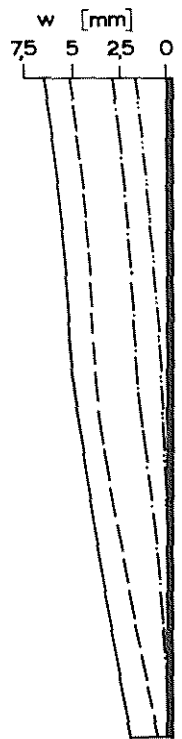
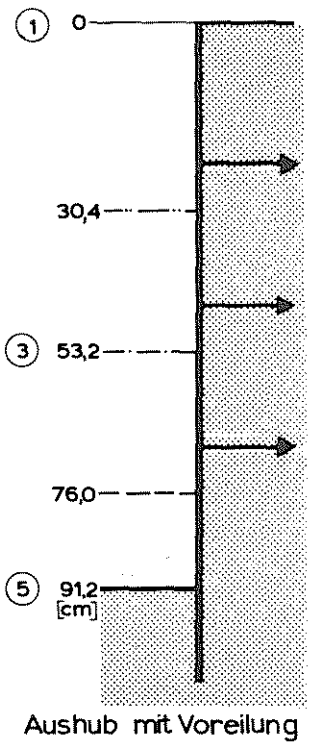
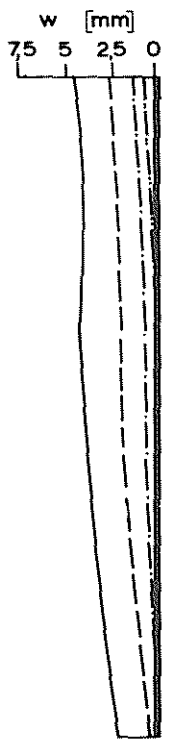
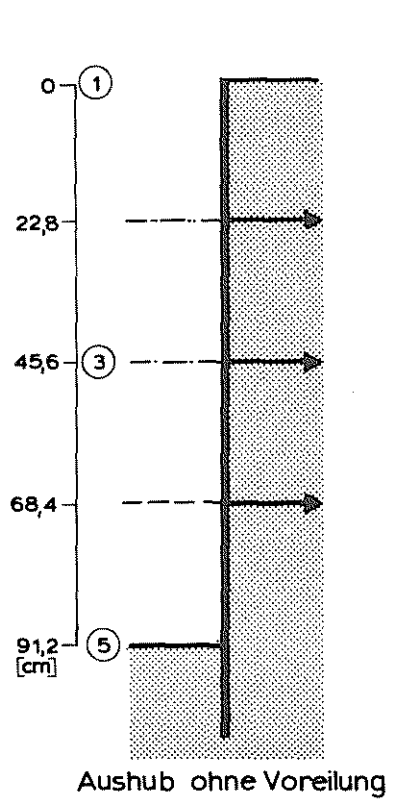
Bis zur Aushubstufe $t = 68,4$ cm stimmt die Wandverformung von Versuch Nr. 60 mit der von Versuch Nr. 8 noch überein. Danach nimmt die Wandbewegung von Versuch Nr. 8 beträchtlich zu. Die Wandbewegung bei Versuch Nr. 22 nimmt nun wieder in dem Maße wie bei Versuch Nr. 60 zu, da bei der Aushubstufe $t = 68,4$ cm bei beiden Versuchen ein Anker eingebaut wurde. Der Verlauf der Wandbewegung ist jetzt bei den Versuchen Nr. 22 und Nr. 60 gleich.

Der Verlauf der Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche über die Aushubtiefe (Bild 40) ist qualitativ ähnlich wie bei der Wandverschiebung.

Die Setzung der Bodenoberfläche für die Aushubtiefe $t = 83,6$ cm ist bei den einzelnen Versuchen sehr verschieden. Bei Versuch Nr. 8 hat nach Einbau des 2. Ankers und bei Versuch Nr. 22 nach Einbau des 1. Ankers die Setzung stark zugenommen, und es ist eine Setzungsmulde entstanden, während bei einer Anordnung von drei Ankern die Bodenoberfläche sich gleichmäßig gesetzt hat.

8.4 Einfluß des Aushubvorganges

Der Einfluß des Aushubvorganges wird durch die Versuche Nr. 42 und Nr. 53 ermittelt. Ein Voreilen des Aushubs bewirkt eine starke Zunahme der Wandbewegung im oberen Wandbereich, und zwar am Wandkopf von 65 % und in der Wandmitte von 28 % (Bild 41). Die Bewegung des Wandkopfes ist besonders groß, da hier die Verlängerung



Wandverschiebung

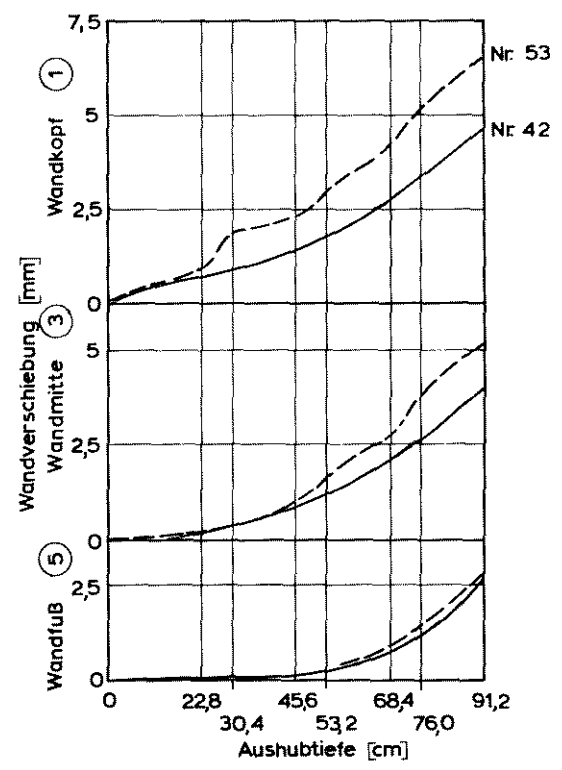


Bild 41: Einfluß der Aushubvoreilung auf die Wandverschiebung

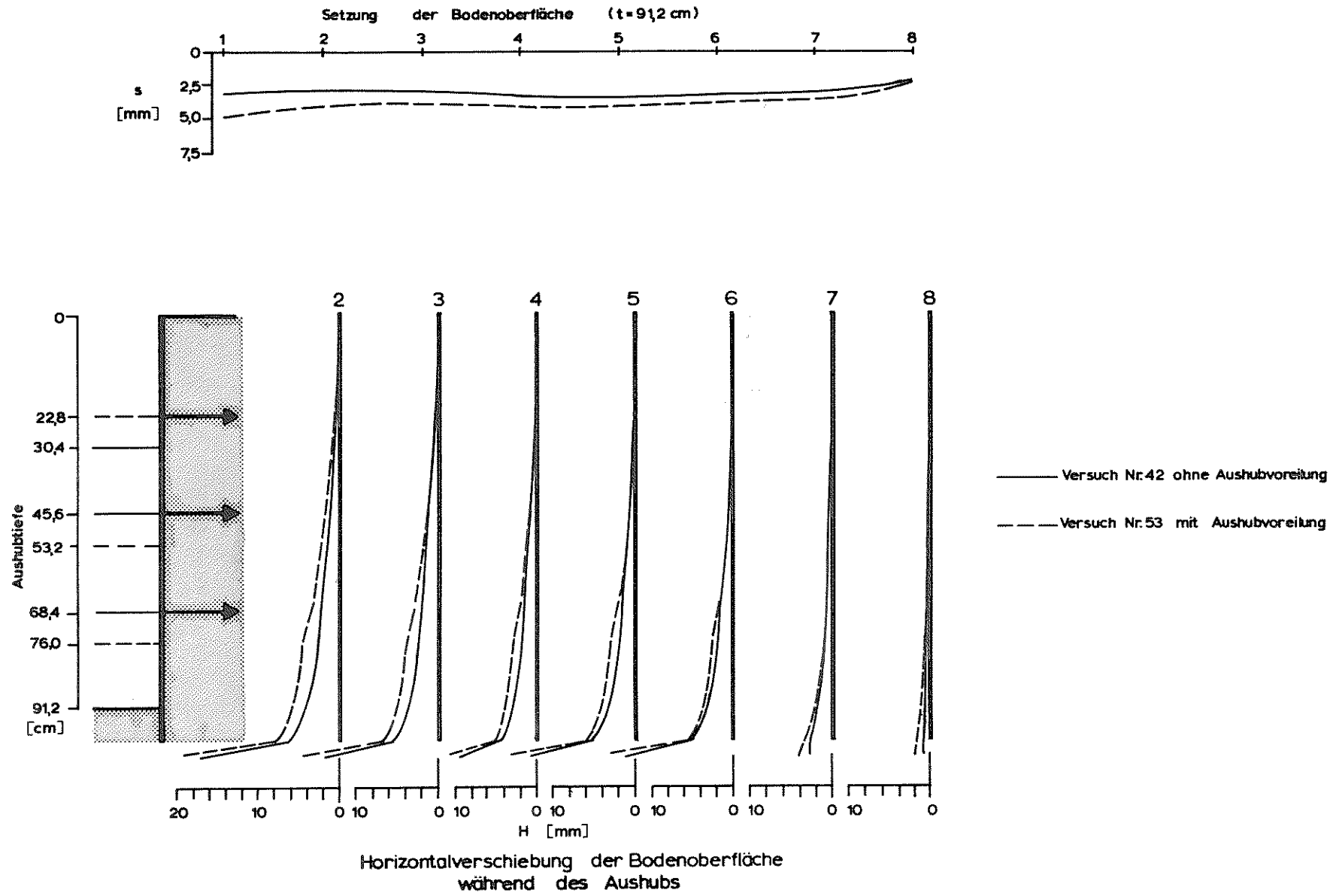


Bild 42: Einfluß der Aushubvorbereitung auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche

des Kragarmes maßgebend ist. Die Verschiebung des Wandfußes ist jedoch fast gleich groß.

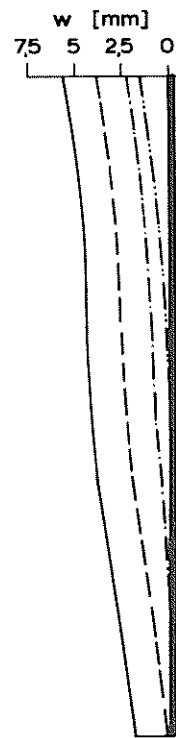
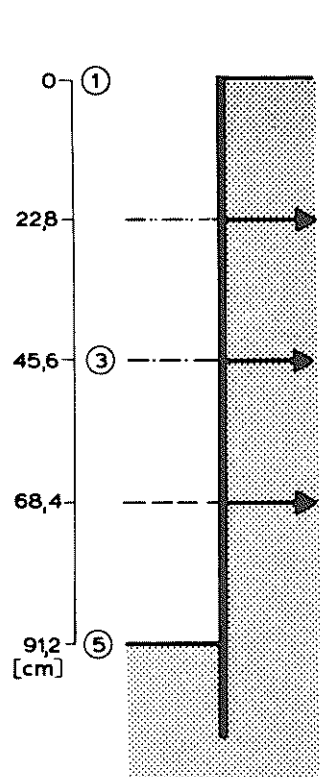
Die Zunahme der Wandverformung bei dem Versuch mit Voreilen des Aushubs ist jeweils nach Einbau des Ankers genauso groß wie bei dem Versuch ohne Voreilen des Aushubs. Es kommt zu der Wandbewegung, die auch ohne Voreilen des Aushubs auftritt, noch die Bewegung hinzu, die allein durch das Voreilen des Aushubs hervorgerufen wird.

Die Setzung und Horizontalverschiebung des Bodens haben im Bereich hinter der Wand stärker zugenommen als im Bereich der Verankerungsstrecke. Der Anteil der Verformungen des Bodens infolge der Aushubvoreilung beeinflußt am stärksten die wandnahen Bereiche des Bodens. Mit zunehmendem Aushub werden auch die weiter von der Wand entfernten Bodenbereiche erfaßt.

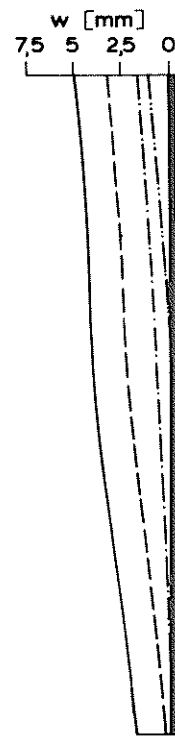
8.5 Einfluß der Wandsteifigkeit , der Verankerungsstrecke und der Ankervorspannung

Wandsteifigkeit (Versuch Nr. 26, 57, 42)

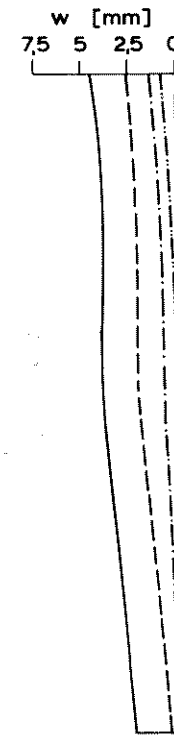
Die Wandsteifigkeit wirkt sich nur auf die Bewegung des Wandkopfes aus. Die Zunahme der Steifigkeit verringert die Verformung des Kragarms (B i l d 43). Am horizontalen Verlauf der Kurven für die Wandbewegung , für die Setzung und für die Horizontalverschiebung der Bodenoberfläche in Abhängigkeit von der Wandsteifigkeit (B i l d 44) sieht man deutlich, daß die Steifigkeit der Wand keinen Einfluß auf die Verformung der Wand und des Bodens hat. Auf B i l d 44 ist die Setzung des Pegels 1 auf der Bodenoberfläche in Abhängigkeit vom Trägheitsmoment aufgetragen. Die leichte Abnahme der Verformung mit zunehmendem Trägheitsmoment kommt nur durch den Einfluß des Kragarms. Dies wird auch an dem Verlauf der Setzung für die Aushubstufe $t = 91,2$ cm deutlich.



Versuch Nr. 26



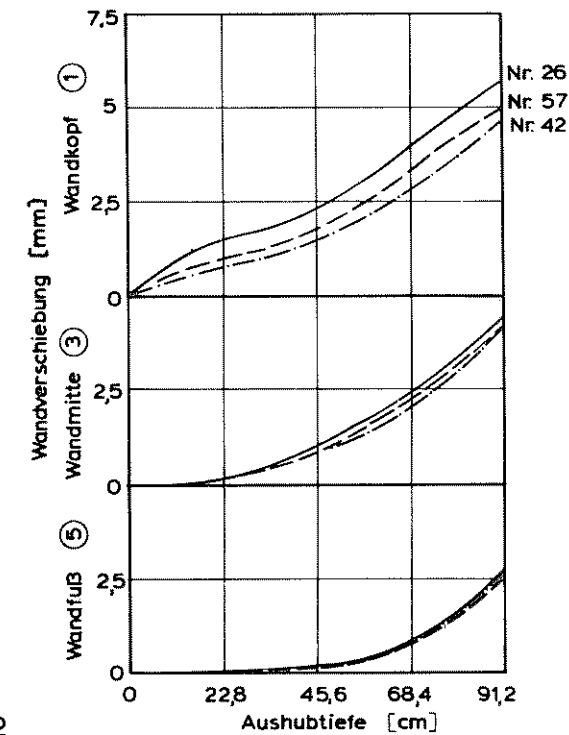
Versuch Nr. 57



Versuch Nr. 42

Wandverschiebung

	β [cm ⁴ /m]	Ankerlänge [cm]
Versuch Nr. 26	0,1422	59,5
Versuch Nr. 57	0,4700	59,5
Versuch Nr. 42	1,1377	59,5



Wandverschiebung während des Aushubs

Bild 43: Einfluß der Wandsteifigkeit auf die Wandverschiebung

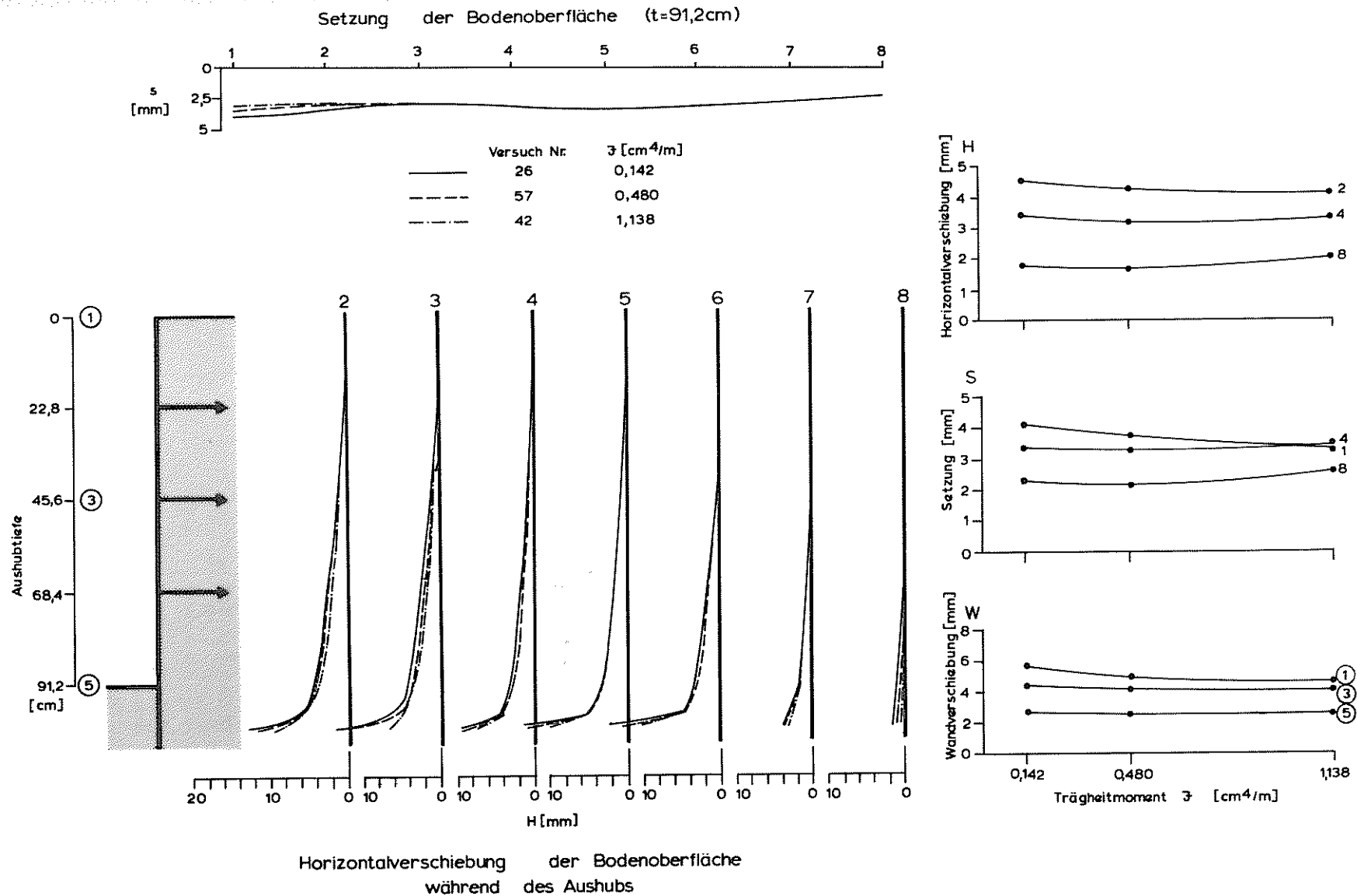


Bild 44: Einfluß der Wandsteifigkeit auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche

Verankerungsstrecke (Versuch Nr. 42 und Nr. 47)

Bei Versuch Nr. 42 war die Verankerungsstrecke doppelt so groß wie bei Versuch Nr. 47. Die Ankerlänge war jedoch bei beiden Versuchen gleich.

Eine Verlängerung der Verankerungsstrecke wirkt sich nur in einer geringen Verminderung der Wandverschiebung (Bild 45), der Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche (Bild 47) aus. Auf die Verformung des Systems Wand-Boden-Anker hat die bei diesen Versuchen verwendete Verankerungslänge keinen Einfluß. Entscheidend ist nur die Gesamtlänge der Anker.

Ankervorspannung (Versuch Nr. 17, 18 und Nr. 19)

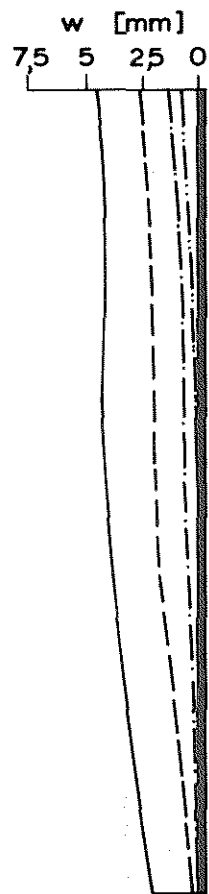
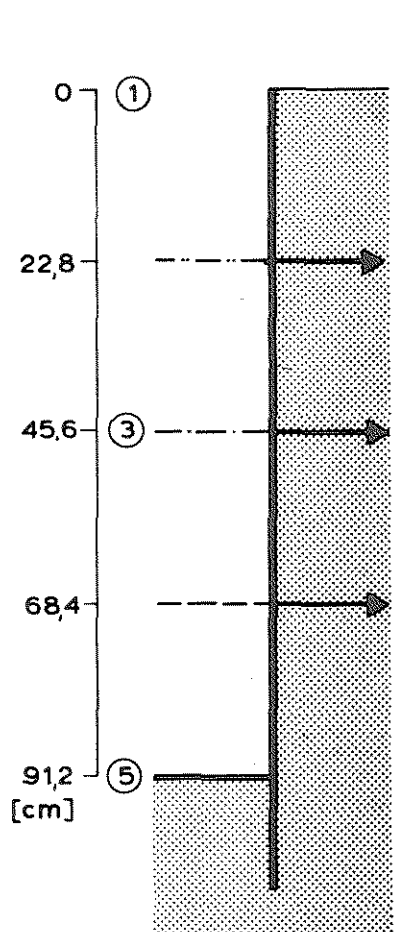
Die Größe der Vorspannung wirkt sich nur im oberen Wandbereich bei einem Vorspannungsgrad von 80 % bzw. 140 % durch eine Abnahme der Bewegung des Wandkopfes um 17 % bzw. 33 % aus. In der Wandmitte und am Wandfuß ist der Einfluß weniger groß.

Durch die Vorspannung werden die Reibungskräfte am Verankerungskörper vorzeitig geweckt und es steht damit der Wand die volle Stützkraft zur Verfügung. Die Setzung und Horizontalverschiebung sind nur im Bereich hinter der Wand geringer geworden (Bild 47). Im Bereich der Anker sind die Verformungen fast gleich groß.

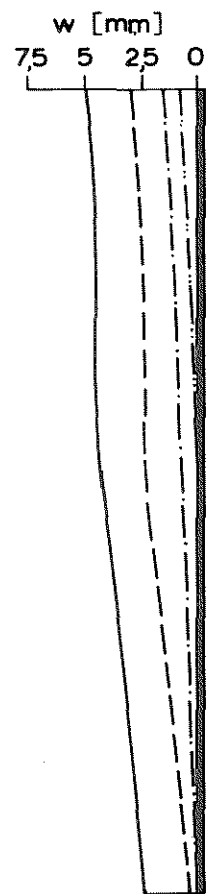
8.6 Zusammenfassung

Die Verformung der Wand und des Bodens wird im wesentlichen von der Ankerlänge beeinflusst.

Die Anordnung von gleichlangen Ankern ist im Vergleich zu der Anordnung von Ankern, deren Länge mit der Tiefe abnimmt, zweckmäßiger,

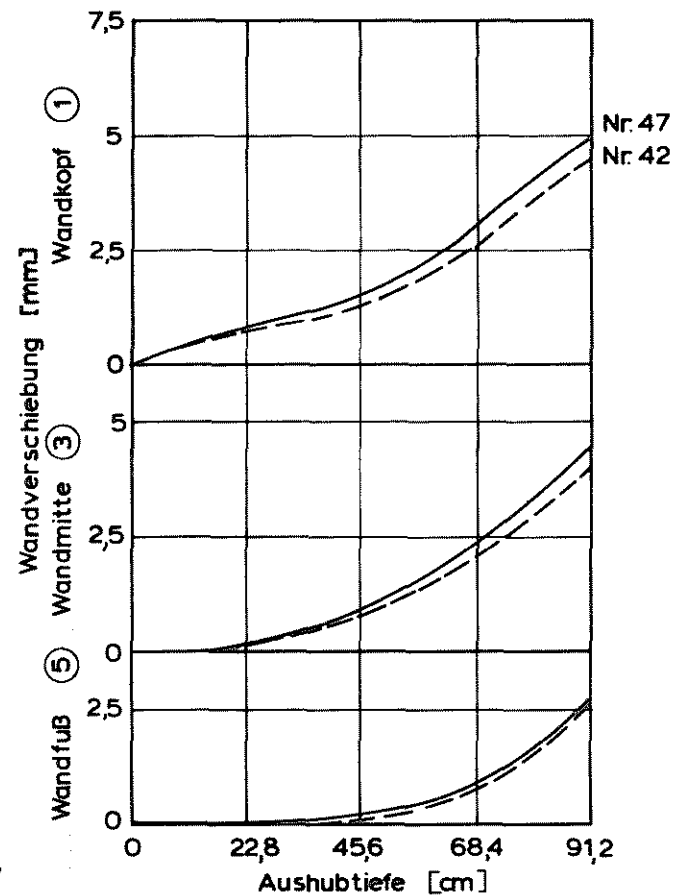


Versuch Nr. 42
Verankerungsstrecke 20cm



Versuch Nr. 47
Verankerungsstrecke 10 cm

Wandverschiebung



Wandverschiebung während
des Aushubs

Bild 45: Einfluß der Länge der Verankerungsstrecke auf die Wandverschiebung

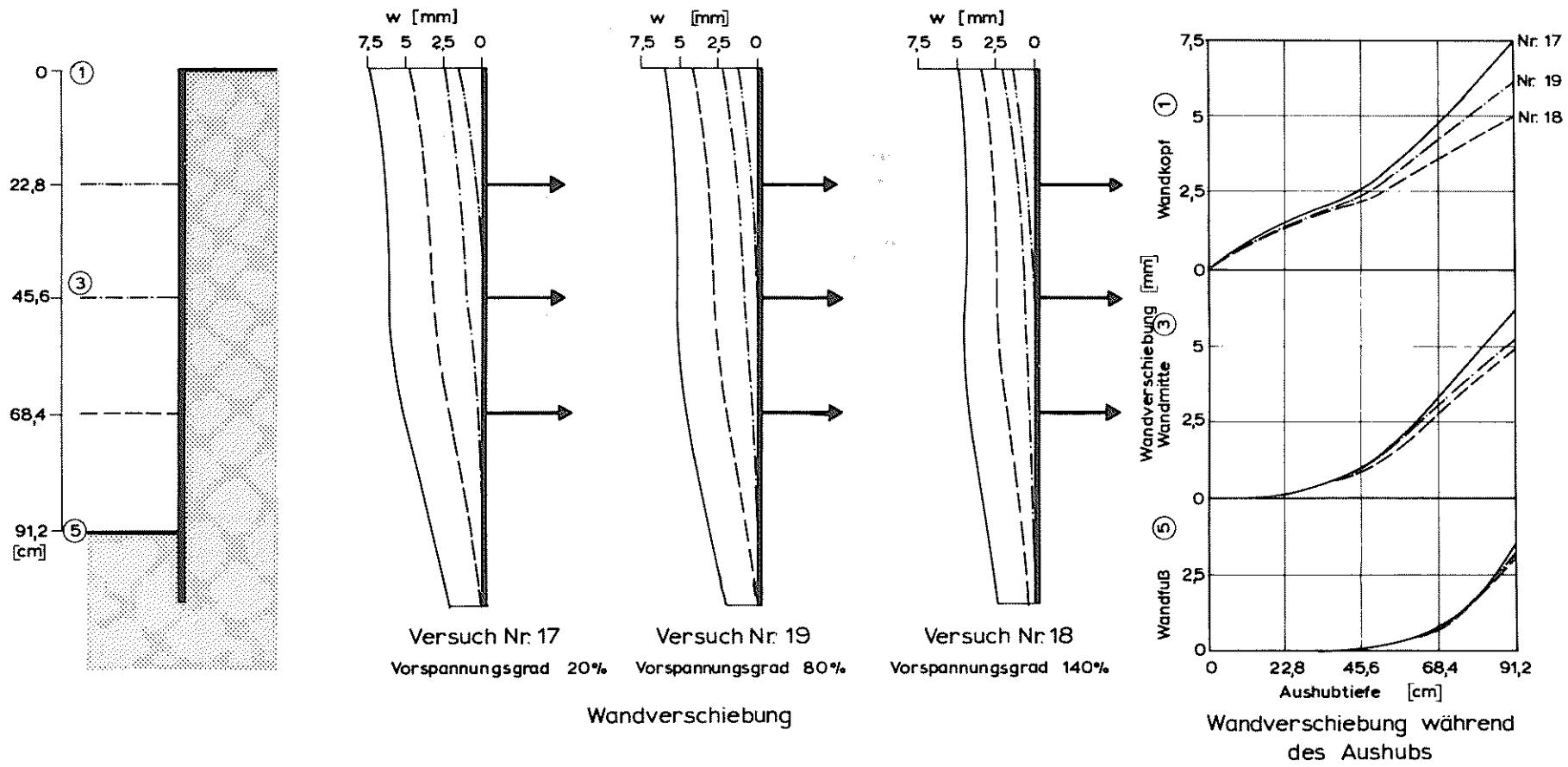
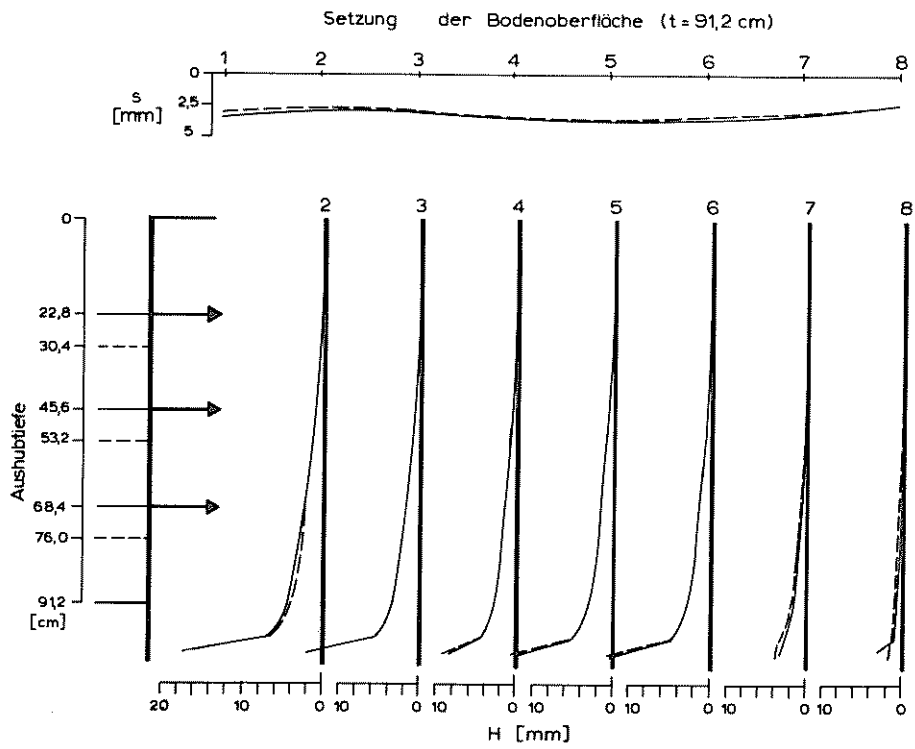
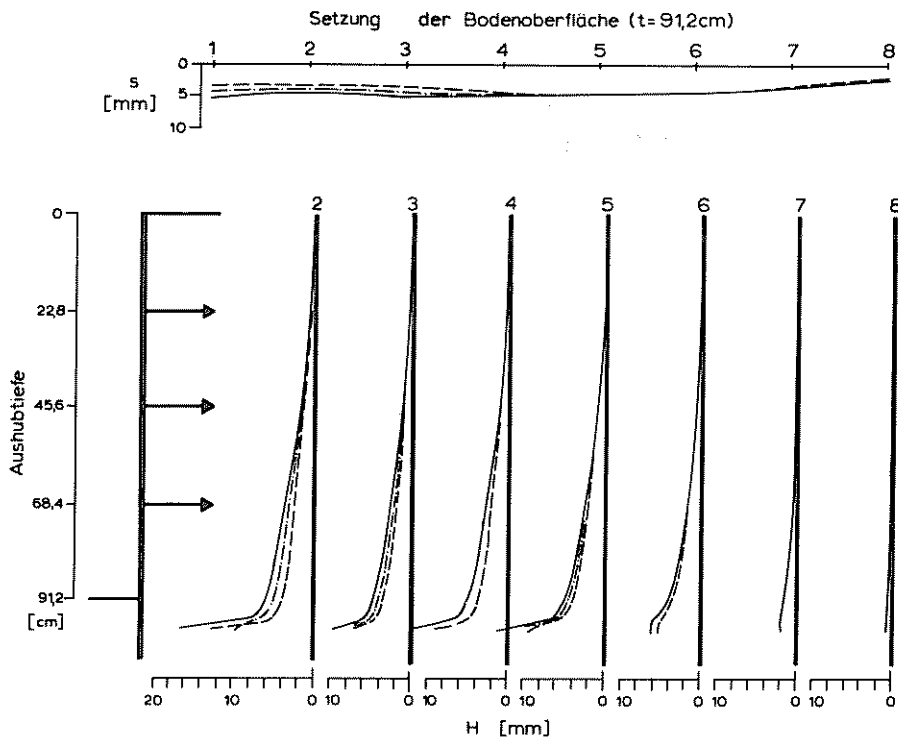


Bild 46: Einfluß der Vorspannung auf die Wandverschiebung



Horizontalverschiebung der Bodenoberfläche

Versuch Nr.	Verankerungstracks [cm]
—	47
- - -	42
	10
	20



Horizontalverschiebung der Bodenoberfläche
während des Aushubs

Versuch Nr.	Vorspannungsgrad
—	17
- - -	18
· · ·	19
	20%
	140%
	80%

Bild 47: Einfluß der Länge der Verankerungstracks und der Vorspannung auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche

da hierdurch zum einen die Verformung des Wandfußes geringer ist, und zum anderen die Standsicherheit nicht durch einen unteren kürzeren Anker verringert wird.

Bei einer mit der Tiefe zunehmenden Ankerlänge wird praktisch mit jedem Einbau eines Ankers die Standsicherheit vergrößert. Dies hat jedoch zur Folge, daß zu Beginn des Aushubs die Verschiebung der Bodenoberfläche und der Wand stärker zunimmt als bei einer Anordnung gleichlanger Anker.

Verlängert man nun bei einer Anordnung von Ankern, deren Ankerlänge mit der Tiefe zu- bzw. abnimmt, die oberen bzw. die unteren Anker, so wirkt sich dies auf die Wandverformung jeweils nur in dem Bereich der Wand wesentlich aus, wo die Ankerlänge zugenommen bzw. abgenommen hat.

Die Zahl der Anker und der Ankerabstand beeinflussen die Größe der Verformung der Wand und des Bodens entscheidend.

Ein Voreilen des Aushubs hat einen beachtlichen Einfluß auf die Zunahme der Wandverformung im oberen Wandbereich.

Die Wandsteifigkeit hat keinen wesentlichen Einfluß auf die Bewegung des Systems Wand-Boden-Anker. Sie wirkt sich nur örtlich im Bereich des Kragarms aus.

Durch die Vorspannung der Anker wird nur die Verformung der Wand im oberen Wandbereich und die Verschiebung der Bodenoberfläche im Bereich des Kragarms durch die Aktivierung der Reibungskräfte in der Verankerungsstrecke verringert. Die Bewegung des Systems Wand-Boden-Anker wird dagegen nicht kleiner.

9. Vergleich mit anderen Modellversuchen

Abouleid (1963), Hanna/Matallana (1970) und G.W.Plant (1972) haben die Ankerdrähte der zwei- bzw. dreifach verankerten Wände jeweils an der Rückwand der Modelle befestigt. Diese Art der Verankerung wirkt praktisch wie eine Aussteifung. Sie wirkt sich im Vergleich zu einem System, bei dem sich Wand, Boden und Anker frei verformen können, besonders auf die Erddruckverteilung und die Größe der Verformung aus.

Abouleid untersucht eine zweifach verankerte Spundwand, wobei er die Verschiebung der beiden Anker vorgibt (Bild 48, Kurven 1 und 7). Als Vergleich hierzu wurden die Versuche Nr. 46 mit zwei Steifen und Nr. 52 mit zwei Ankern durchgeführt. Der Versuch Nr. 46 entspricht qualitativ und quantitativ recht gut der Kurve (1) der Versuchsserie Nr. I von Abouleid. Der Erddruck konzentriert sich in Höhe der 2. Steife bzw. des unverschieblichen 2. Ankers und fällt dann stark ab. Bei einer willkürlichen Vorgabe der Ankerkopfverschiebung nimmt die Erddruckkonzentration in Höhe des 2. Ankers ab und es stellt sich eine dreieckförmige Erddruckverteilung ein, ähnlich wie der beim Versuch Nr. 52 mit zwei Ankern. Hierbei muß man jedoch bedenken, daß diese Übereinstimmung in der Erddruckverteilung rein zufällig ist und allein von der jeweils vorgegebenen Wandbewegung abhängt.

Obwohl auch der Verlauf der Wandbewegung qualitativ ähnlich ist, ist der Spannungs- und Verformungszustand durch die unterschiedliche Art der Krafteinleitung der Ankerkräfte jedoch völlig verschieden.

Stavropoulos (1969) untersucht eine 35 cm hohe um den Wandfuß drehbare, einfach verankerte, starre Wand. Die Erddruckverteilung wird nicht direkt gemessen. Er gibt eine dreieckförmige Verteilung des Erddruckes bis zum Anker hin an. Darunter nimmt der Erd-

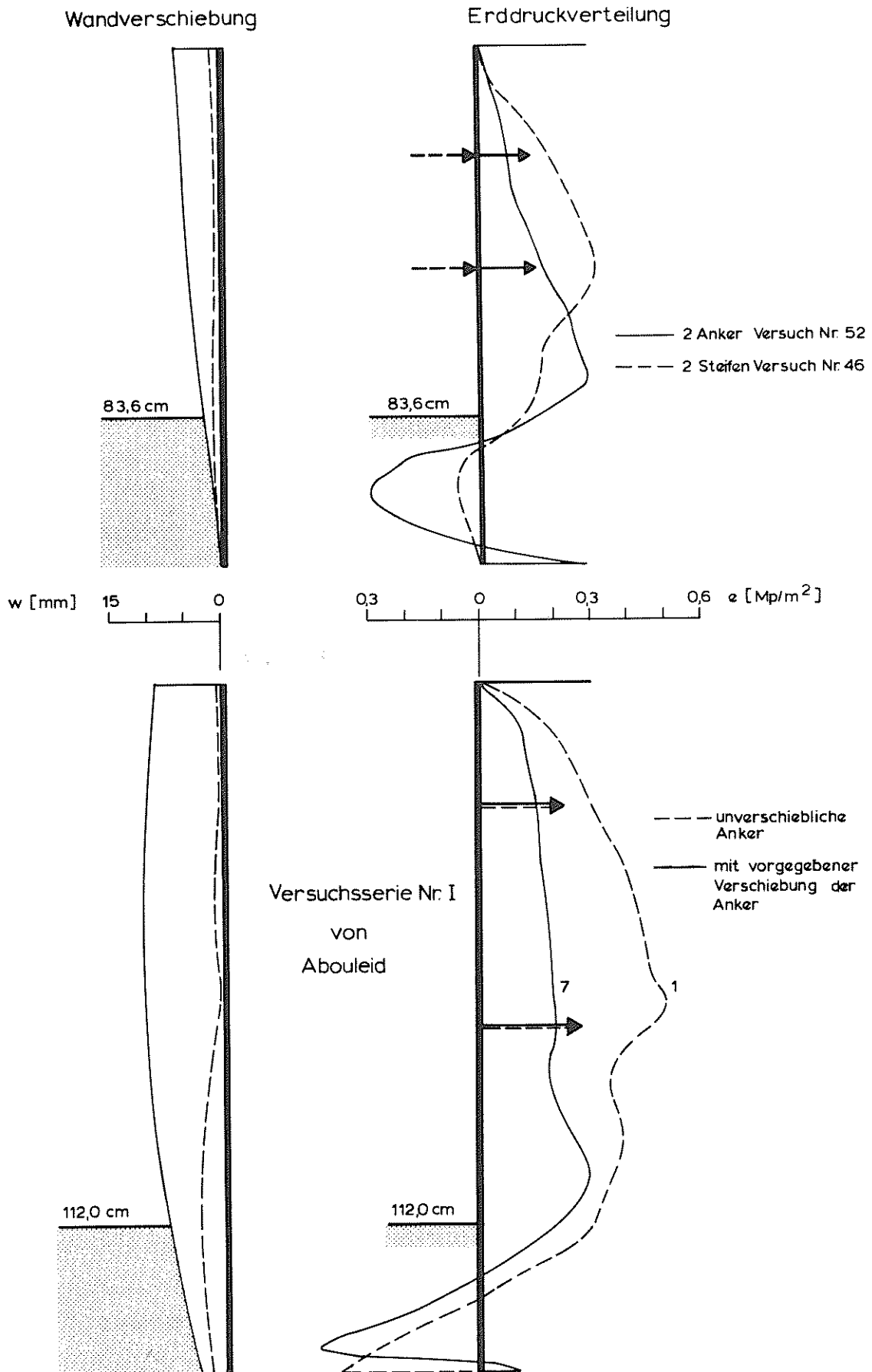
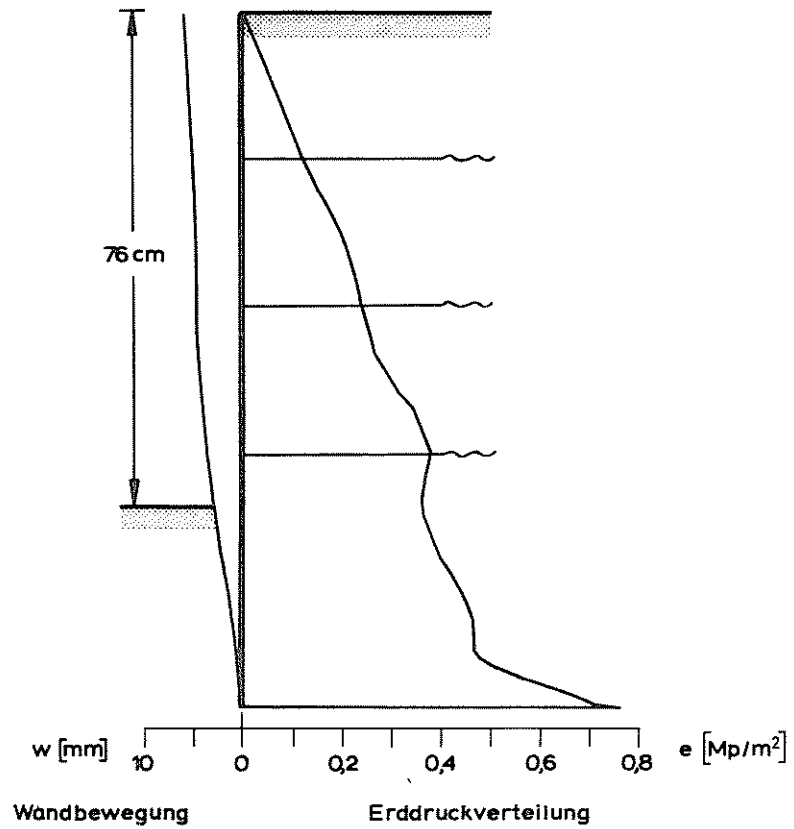


Bild 48: Vergleich zwischen den Modellversuchen von Abouleid und den Versuchen Nr. 52 und Nr. 46

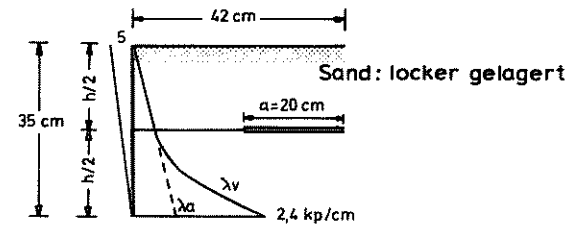
druck erheblich zu, weil im Bereich des unverschieblichen Wandfußes der Sand gestaucht wird und somit eine Entspannung des Bodens, wie dies bei Baugrubenwänden im Bereich des Erdauflagers durch die Verschiebung des Wandfußes möglich ist, nicht stattfindet.

Weiterhin wird der Bruch des Systems Wand-Boden-Anker durch eine Zugkraft in Höhe des Ankers herbeigeführt. Die Ergebnisse von Stavropoulos weichen von den durch die Versuche gefundenen Erkenntnissen erheblich ab. Dies liegt jedoch eindeutig an dem Versuchsmodell, das die Randbedingungen, wie sie in der Praxis für eine Baugrube gelten, nicht nachahmt. G. P. Schmitt (1974) hat dies ausführlich in seiner Arbeit dargelegt.

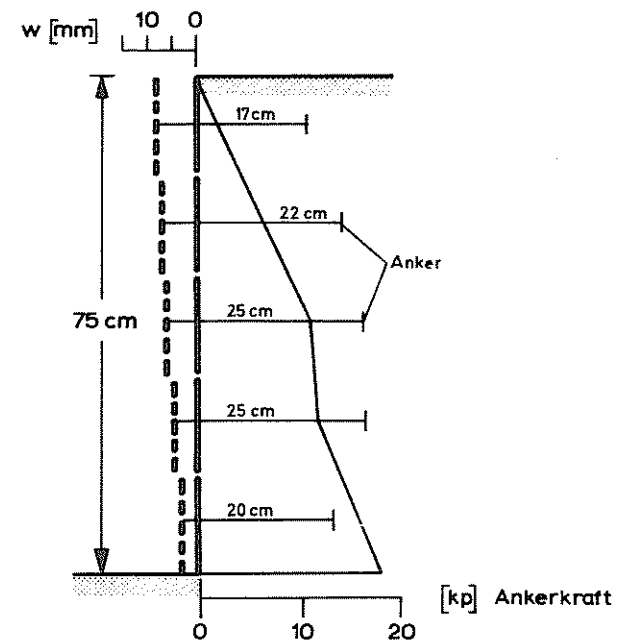
Schindler (1969) teilt seine Modellwand in fünf voneinander unabhängige Lamellen ein. Jede einzelne Lamelle wird von einer im Boden befindlichen Ankerplatte festgehalten. Bei Vorgabe von unterschiedlich großen Bewegungen der einzelnen Lamellen werden die jeweiligen Ankerkräfte gemessen. Aus der Verteilung der Ankerkräfte wird auf die Erddruckverteilung geschlossen. Die Erddruckverteilung ist somit entscheidend davon abhängig, an welcher Stelle und in welcher Reihenfolge die Lamellen vorgegebene Verschiebungen ausführen. Führen die Lamellen insgesamt eine Bewegung aus, die einer Parallelverschiebung der Wand entspricht, wobei der Wandfuß etwas zurückbleibt, so stellt sich eine nahezu dreieckförmige Erddruckverteilung ein. Die Wand von Schindler kann man praktisch als eine Wand mit sehr kleiner Biegesteifigkeit ansehen. Da jedoch der Einfluß der Biegesteifigkeit auf die Verteilung des Erddruckes nur gering ist, führt ein Vergleich des Versuches von Schindler mit dem einer dreifach verankerten Wand (Versuch Nr. 11) bei einer qualitativ gleichen Wandverformung zu einem ähnlichen Verlauf des Erddruckes über die Tiefe (Bild 49). Jedoch muß man beachten, daß bei den Versuchen von Schindler die Wandbewegung willkürlich vorgegeben wird.



Versuch Nr. 11



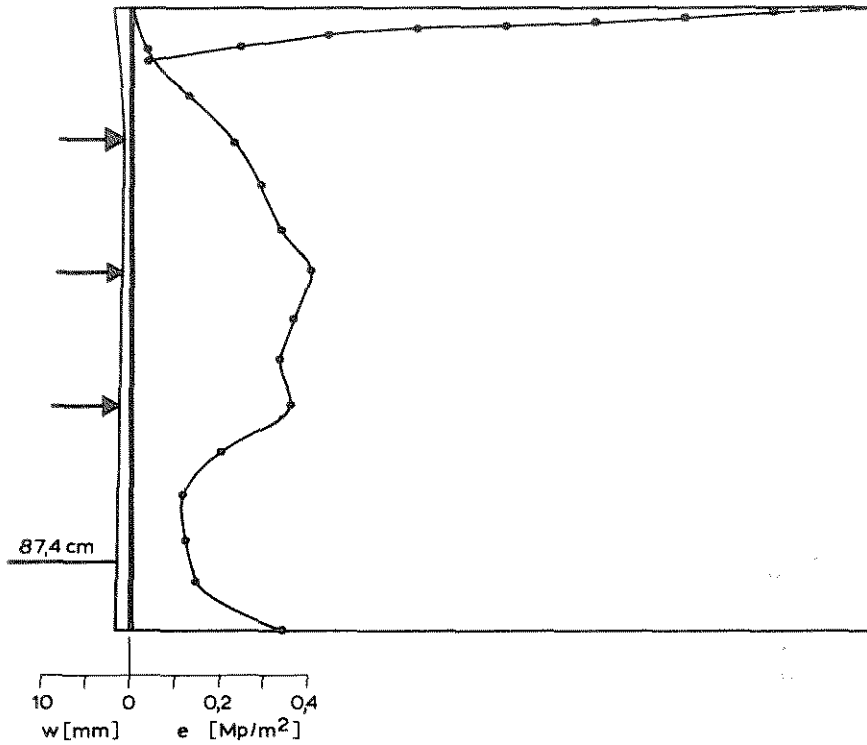
Erddruckverteilung nach Stavropoulos
Drehung um den Wandfußpunkt



Verteilung der Ankerkräfte nach Schindler

Bild 49: Modellversuche von Schindler (1969) und Stavropoulos (1969) und Versuch Nr. 11

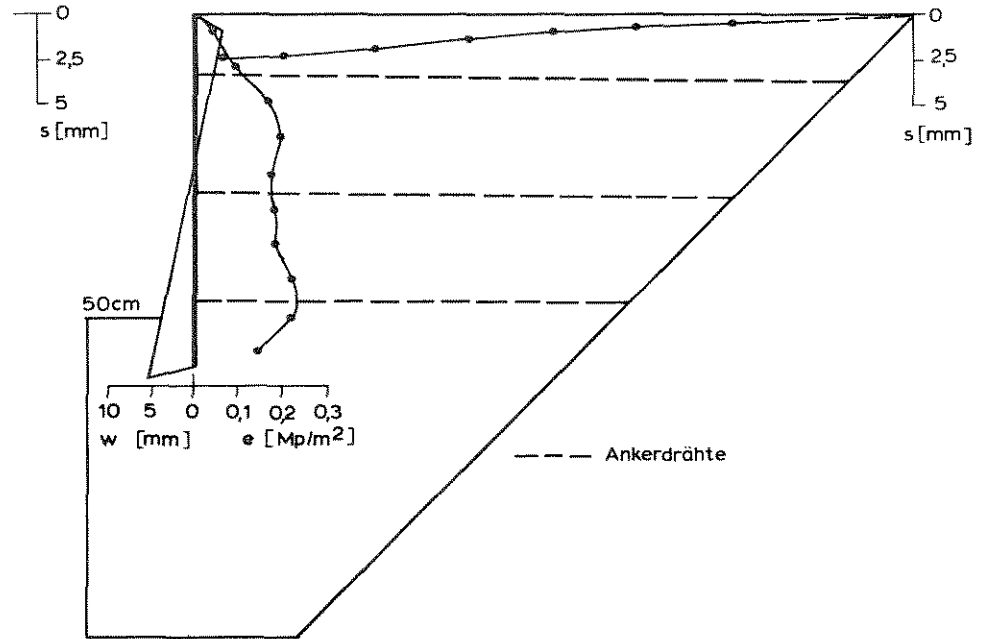
Setzung der Geländeoberfläche



Versuch Nr. 23

Wandbewegung w
Erddruck e

Setzung der Geländeoberfläche



Versuch von G.W. Plant (1972)

Wandbewegung w
Erddruck e

--- Ankerdrähte

Bild 50: Modellversuche von G.W. Plant (1972) und Versuch Nr. 23

Hanna / Matallana (1970) und G. W. Plant (1972) untersuchen das Verhalten einer 0,6 m hohen dreifach verankerten Wand. Da die Befestigung der Ankerdrähte an der Rückwand des Modells wie eine Aussteifung wirkt, ist daher ein weitgehender Vergleich mit den hier gemachten Modellversuchen nicht sinnvoll. Als Vergleichsversuch dient der Versuch Nr. 23 mit drei Steifen (Bild 50). Die Verteilung des Erddruckes ist bei beiden Versuchen qualitativ ähnlich. Die Setzungen der Geländeoberfläche haben fast die gleiche Größenordnung. Über die Verformung der Wand ist keine Aussage möglich, da nur die Bewegungen des Wandkopfes und des Wandfußes gemessen werden.

10. Vergleich zwischen Verankerung und Aussteifung

Um den Unterschied zwischen einer verankerten und einer ausgesteiften Wand aufzuzeigen, wurden die Versuche Nr. 9 und Nr. 8 mit jeweils zwei Steifen-bzw. zwei Ankerlagen und die Versuche Nr. 23 und Nr. 58 mit jeweils drei Steifen-bzw. drei Ankerlagen gemacht. Jede Anker- oder Steifenlage wurde mit jeweils 8 kp vorgespannt, um die Anker- und Steifenlage kraftschlüssig mit der Wand zu verbinden. Dies entspricht einem Vorspannungsgrad von 20 %. Diese geringe Vorspannung wurde gewählt, um die Erddruckverteilung nicht zu beeinflussen. Bei der Erddruckverteilung bestehen zwischen den Versuchen mit Ankern und Steifen quantitativ und qualitativ beträchtliche Unterschiede (Bild 51).

Der Erddruck ist bei den Versuchen mit zwei und drei Ankern im Bereich der Anker gleich dem Erdruhedruck. Unterhalb des letzten Ankers dagegen fällt der Erddruck ab und verläuft nun parallel der Erdruhedruckkurve. Die Erddruckordinaten sind in Höhe der Steifen max. 50 % größer als bei der Verankerung. Unterhalb der Steifen fällt der Erddruck stärker ab als bei den Ankern. Die Ordinaten sind hier nur halb so groß wie bei der Verankerung. Bei den Versuchen mit Steifen tritt also eine wesentlich stärkere Erddruckumlagerung auf, als bei

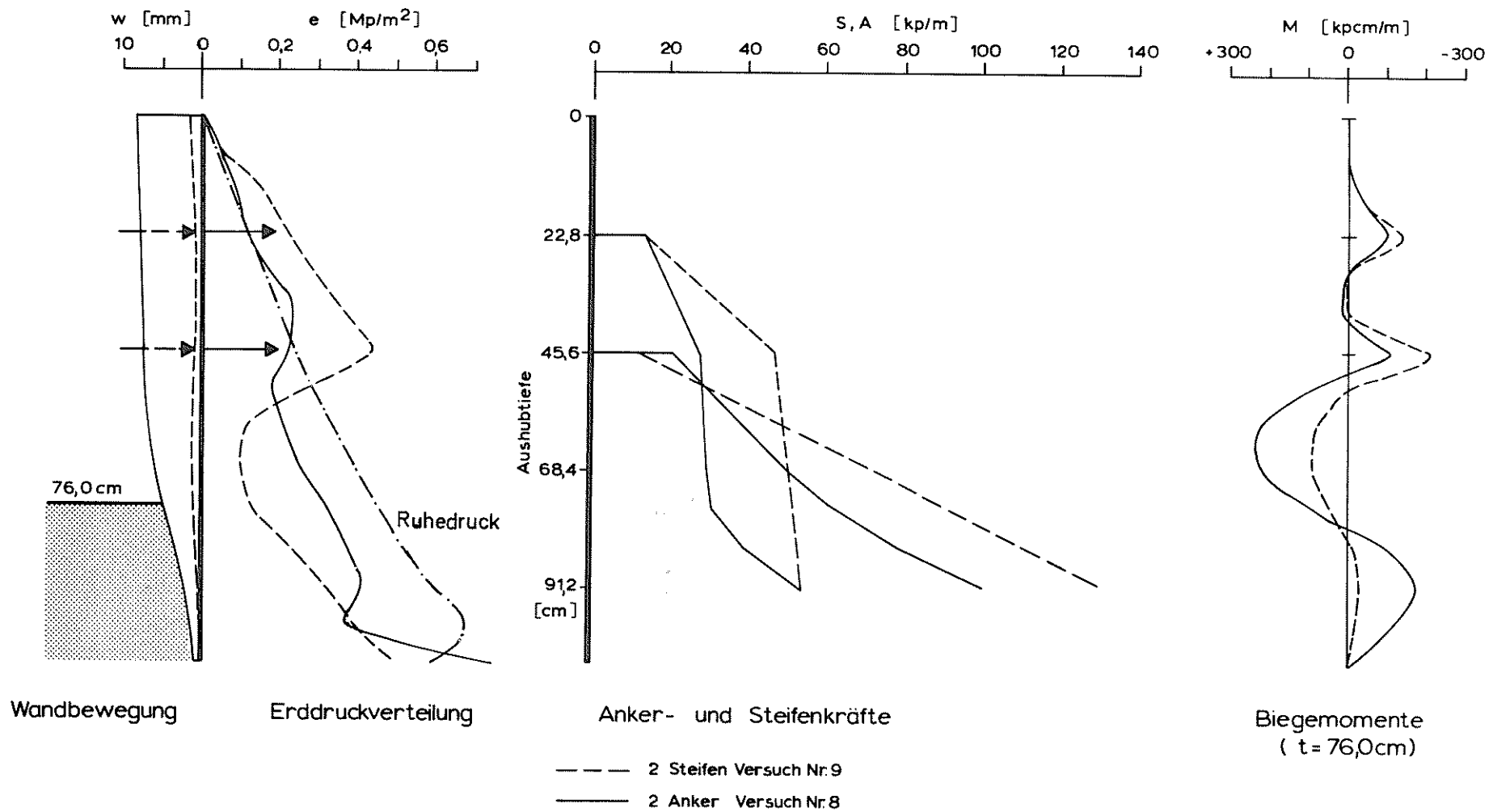


Bild 51: Vergleich zwischen einer zweifach ausgesteiften und verankerten Wand

den Versuchen mit Anker, Durch das Nachgeben der Anker ist die Konzentration des Erddrucks in Höhe der Anker nur sehr gering.

Dies zeigt sich auch an der verschiedenen Größe der Anker- und Steifenkräfte. Die Ankerkräfte sind im Mittel 40 % kleiner als die Steifenkräfte. Nach dem Einbau der 1. Steife bzw. des 1. Ankers nimmt die Steifenkraft wesentlich stärker zu als die Ankerkraft. Erst nach Einbau der 2. Steife bzw. des 2. Ankers wird die Kraft in der oberen Steife bzw. in dem oberen Anker kaum noch größer. Allgemein kann man sagen, daß nach Einbau einer Steifen- bzw. Ankerlage bei dem nachfolgenden Aushub diejenigen Steifen- bzw. Ankerkräfte nicht mehr zunehmen, die sich oberhalb der zuletzt eingebauten Steifen- bzw. Ankerlage befinden. Qualitativ unterscheidet sich der Verlauf der Anker- und Steifenkräfte über die Aushubtiefe nicht.

Was die Beanspruchung der zweifach abgesteiften Wand anbetrifft, so sind die Stützmomente 30 bis 50 % größer als bei der Verankerung. Bei der dreifach abgesteiften Wand beträgt der Unterschied bei den Stützmomenten ebenso 30 bis 50 %. Dies wird auch an dem kleineren Krümmungsradius der verformten Wand deutlich. Die Feldmomente dagegen sind bei der verankerten Wand infolge des höheren Erddruckes nahezu doppelt so groß. Bei den Versuchen mit drei Anker bzw. drei Steifen sind die Verhältnisse ähnlich.

Die Wandverformung, Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche sind bei den Versuchen mit Verankerung im Mittel 6- bis 7-mal größer als bei den Versuchen mit Steifen. Nach dem Einbau einer Steife ist die Wandbewegung im Bereich der Steifenlage praktisch zum Stillstand gekommen. Dies ist nach dem Anschluß eines Ankers völlig anders. Die Bewegungen nehmen weiter nahezu linear bis in Höhe des letzten Ankers mit dem Aushub zu. Danach kündigt sich der Bruch durch eine überproportionale Zunahme der Verformungen an.

Große Dehnungen der Geländeoberfläche in horizontaler Richtung treten nur bei den Versuchen mit Ankern auf. Der Boden zwischen Wand und Verankerungsstrecke erfährt zwar nur geringe Dehnungen. Hinter den Verankerungsstrecken aber entspannt sich der Boden, da sich das Bodenmassiv von dem dahinter in Ruhe befindlichen Boden ablöst. Im Gegensatz zur Aussteifung tritt nur vor Einbau der 1. Steife eine Dehnung der Bodenoberfläche im Bereich der Wand auf. Beim weiteren Ausgrab nehmen die Dehnungen praktisch nicht mehr zu.

11. Vergleich Feldmessung und Modellversuch

An einer mehrfach verankerten 21 m tiefen Baugrube im Frankfurter Hauptbahnhof wurden umfangreiche Messungen von Romberg (1973) durchgeführt.

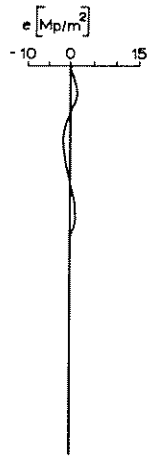
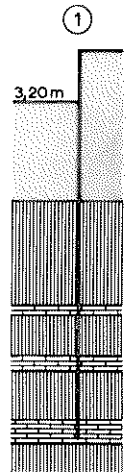
Der Untergrund besteht bis in etwa 9 m Tiefe aus quartären Sanden und Kiesen. Darunter folgen bis in große Tiefen tertiärer Ton, der von unterschiedlich dicken , nicht horizontbeständigen Kalksteinbänken und Kalksandschichten durchzogen ist.

Die Baugrubenwand war eine Trägerbohlwand, die durch 6 Ankerlagen gehalten wurde. Der Achsabstand der Stahlträger (Profil IPE 600) betrug 2 m. Sie wurden in vorher gebohrte Löcher gestellt. Danach wurden die Bohrlöcher unterhalb der Baugrubensohle mit Beton, oberhalb mit Kalkmörtel verfüllt.

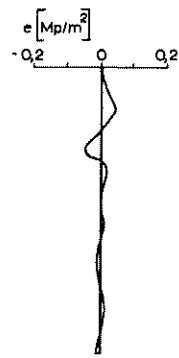
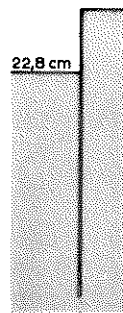
Die Ankerkräfte wurden mit Kraftmeßdosen, die Biegemomente über die Randfaserdehnung der Träger mit Dehnmeßstreifen gemessen.

Der Erddruck wurde nicht direkt, sondern durch zweimaliges Differenzieren der Biegemomente ermittelt. Weiterhin wurde die Wandverformung und die Setzungen der Geländeoberfläche ermittelt. Die Anker wur-

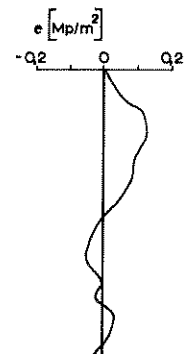
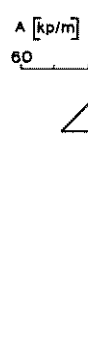
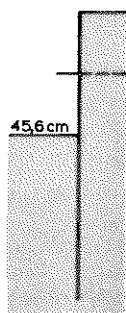
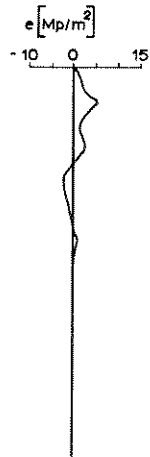
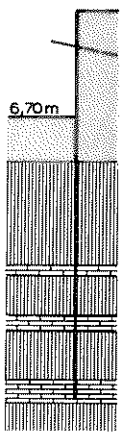
Feldmessung



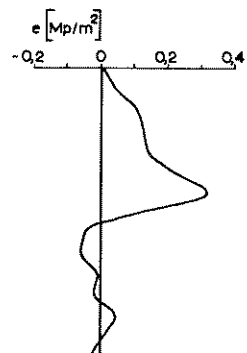
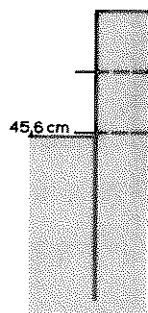
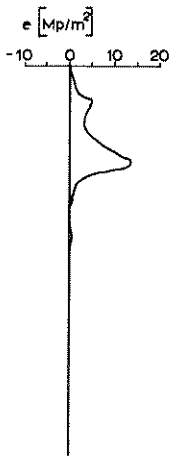
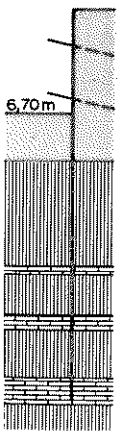
Versuch Nr:26



②



③



Aushub

Ankerkräfte

Erddruck-
verteilung

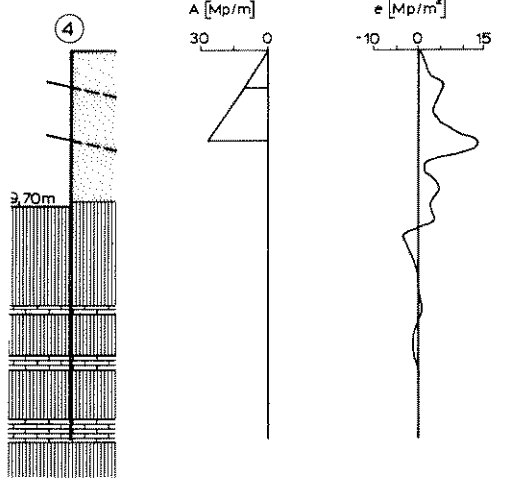
Aushub

Ankerkräfte

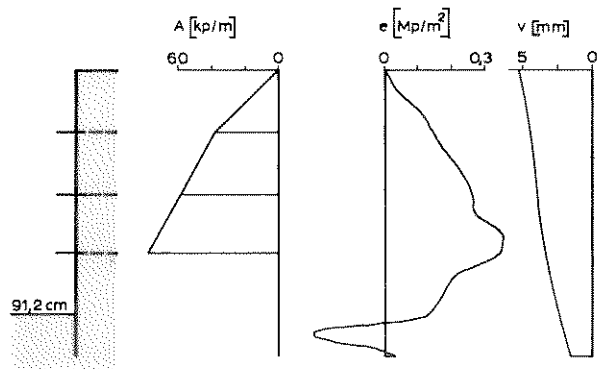
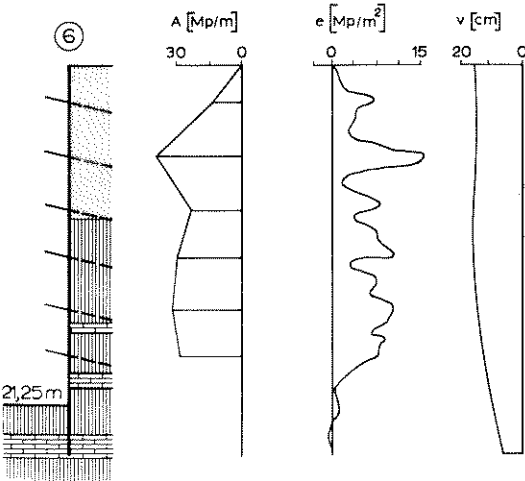
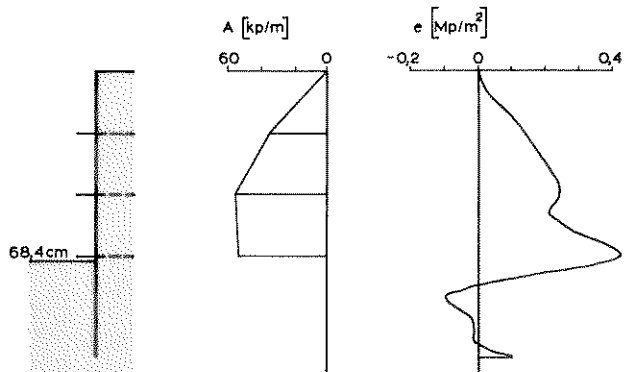
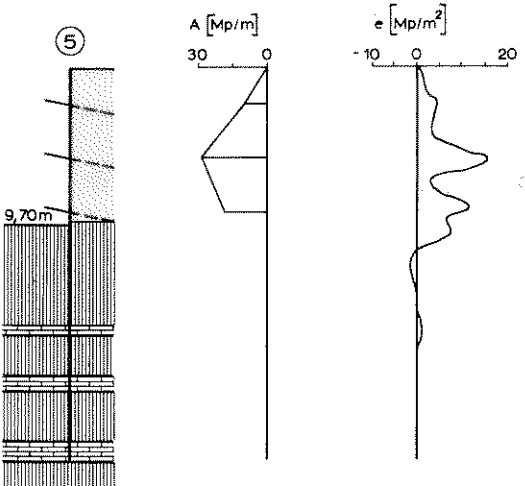
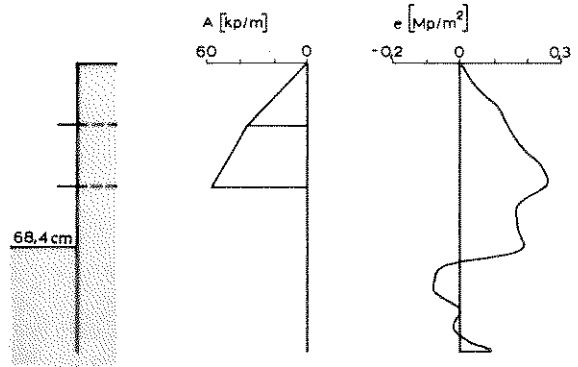
Erddruck-
verteilung

Bild 53: Vergleich zwischen Feldmessung und Versuch (Aushubstufe 1,2 und 3)

Feldmessung



Versuch Nr. 26



Aushub

Ankerkräfte

Erddruck-
verteilung

Wand-
verformung

Aushub

Ankerkräfte

Erddruck-
verteilung

Wand-
verformung

Bild 54: Vergleich zwischen Feldmessung und Versuch
(Aushubstufe 4,5 und 6)

den nach dem Abbinden des Verpreßmörtels auf etwa 90 % der für den Endzustand (Vollaushub) erwarteten Kräfte vorgespannt. Die Ankerkräfte wurden unter der Annahme einer rechteckförmigen Erddruckverteilung ermittelt und gleichmäßig vorgespannt. Ein gleichmäßiges Vorspannen der Anker konnte jedoch nicht immer erreicht werden. Es war vielmehr so, daß zahlreiche Anker wesentlich geringer vorgespannt wurden.

Die wichtigste Erkenntnis aus den Messungen war, daß die Größe und die Verteilung des Erddrucks von der Vorspannung der Anker abhängen. Im folgenden werden die oberen vier Aushubschritte, die im Bereich der Kiese und Sande erfolgten, mit den entsprechenden Aushubschritten des Versuchs Nr. 26 verglichen. Bei Versuch Nr. 26 wurden entsprechend dem mit der Tiefe zunehmenden Erddruck die Ankerkräfte auf 80 % der bei Vollaushub vorhandenen Ankerkräfte vorgespannt.

Auf der Baustelle war es nicht möglich, alle Anker gleichmäßig vorzuspannen, dies wird bei der Ankerlage A und B deutlich. Die Ankerlage B ist 40 % höher als A und 20 % über der zulässigen Ankerkraft vorgespannt worden. Ein Vergleich der einzelnen Aushubstufen zeigt deutlich, daß die Verteilung des Erddruckes sowohl bei der Feldmessung als auch bei dem Modellversuch im wesentlichen von der Größe der Vorspannung abhängt. Die Erddruckverteilung der Feldmessung stimmt jedoch für die 5 Aushubschritte im Bereich des Sandes mit der im Versuch gemessenen Verteilung des Erddruckes recht gut überein. Die bei der Feldmessung durch das Vorspannen der Anker gemessenen Erddruckspitzen sind auch im Versuch aufgetreten.

Der Unterschied in der Erddruckverteilung beim Endaushub (Aushubstufe 6) erklärt sich dadurch, daß bei dem Feldversuch die Anker gleichmäßig vorgespannt wurden. Sowohl beim Feldversuch als auch beim Modellversuch entspricht die Erddruckverteilung genau der Verteilung der Ankerkräfte über die Aushubtiefe.

Weiterhin stimmt die Wandverformung für den Endaushub von Versuch Nr. 26 qualitativ gut mit der Feldmessung überein. Sowohl die Versuchswand als auch die Baugrubenwand haben sich nahezu parallel verschoben.

12. Vergleich der Modellversuche mit Berechnungen nach der Finite-Element-Methode

12.1 Übersicht

Neben den in Kapitel 2 beschriebenen Modellversuchen hat Stroh (1974) Berechnungen nach der Finite-Element-Methode angestellt. Er hat anhand einer vierfach verankerten Wand im "Frankfurter Ton" sowohl den Einfluß von konstruktiven Maßnahmen als auch den Einfluß der Bodeneigenschaften auf die Wandverschiebung, die Größe und Verteilung des Erddruckes und auf die Ankerkräfte untersucht. Für diese Parameterstudie wurden homogene Bodenverhältnisse angenommen. Die bodenmechanischen Kennwerte des Tons sind: Reibungswinkel $\rho = 20^\circ$, Kohäsion $c = 2 \text{ Mp/m}^2$ und Raumbgewicht $\gamma = 2,0 \text{ Mp/m}^3$. Sie unterscheiden sich damit von denen des Versuchssandes ($\rho = 39^\circ$, $c = 0$, $\gamma = 1,6 \text{ Mp/m}^3$).

Der Unterschied bei dem Reibungswinkel und der Kohäsion ist ohne Zweifel bei einem quantitativen Vergleich zwischen den Berechnungen und den Versuchen von Bedeutung. Weiterhin gelten die Ähnlichkeitsgesetze für die Modellversuche streng nur für den Bruchzustand. Daher soll an dieser Stelle nur ein qualitativer Vergleich zwischen Rechnung und Versuch durchgeführt werden.

Bei den Modellversuchen war es wegen der beschränkten Wandhöhe nicht möglich, mehr als 3 Anker zu verwenden. Die Berechnungen von Stroh dagegen erfolgten mit 4 Ankern. Dieser Unterschied in der Zahl der Anker hat praktisch keinen Einfluß, da man die Aushubzustände vor dem

Anspannen des 4. Ankers vergleichen kann.

Weiterhin sind die Anker bei Stroh um 15° geneigt. Aufgrund von Vergleichsrechnungen wurde jedoch gezeigt, daß der Einfluß der Ankerneigung auf die Wandverformung, die Erddruckverteilung und den Verlauf der Ankerkräfte sehr gering ist.

12.2 Einfluß der Ankerlänge

Folgende Versuche werden für einen Vergleich zwischen Modellversuch und Modellrechnung herangezogen.

- Versuch Nr. 14 3 kurze Anker, Ankerlänge 39,5 cm
- Versuch Nr. 31 Ankerlänge mit der Tiefe zunehmend
- Versuch Nr. 32 Ankerlänge mit der Tiefe abnehmend
- Versuch Nr. 20 3 lange Anker, Ankerlänge 59,5 cm

Die Anker werden ebenso wie bei den Modellrechnungen alle gleichmäßig vorgespannt.

Bis zur Aushubstufe von $t = 68,4$ cm unterscheidet sich die Verformung der Modellwand wenig von der der Modellrechnung (Bild 55 und 56). Beim weiteren Aushub nimmt die Verformung stark zu. Hierbei fällt auf, daß eine Parallelverschiebung der Wand sowohl beim Versuch als auch bei der Modellrechnung auftritt.

Eine Verlängerung der Anker (beim Versuch um 50 % und bei der Rechnung um 100 %) beeinflusst sowohl beim Versuch als auch bei der Rechnung die Bewegung des Wandfußes nur in geringem Maß. Im oberen Wandbereich aber werden die Verformungen von 7,9 mm auf 4,9 mm (bei der Rechnung von 11 cm auf 4 cm) verringert (Bild 57).

Der Verlauf der Wandverformung beim Versuch Nr. 32 (mit der Tiefe

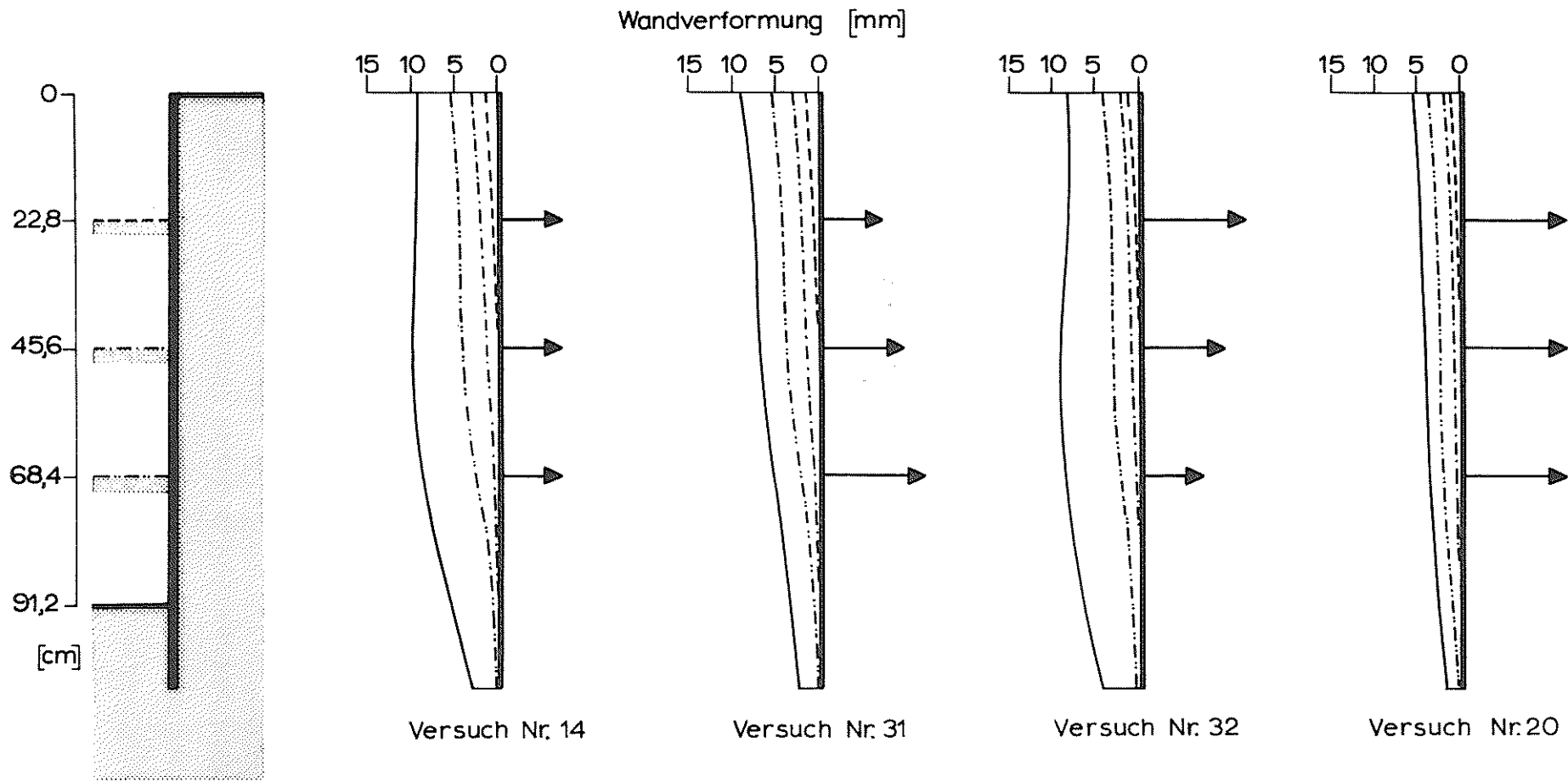


Bild 55: Einfluß der Ankerlänge auf die Wandverschiebung bei den Versuchen

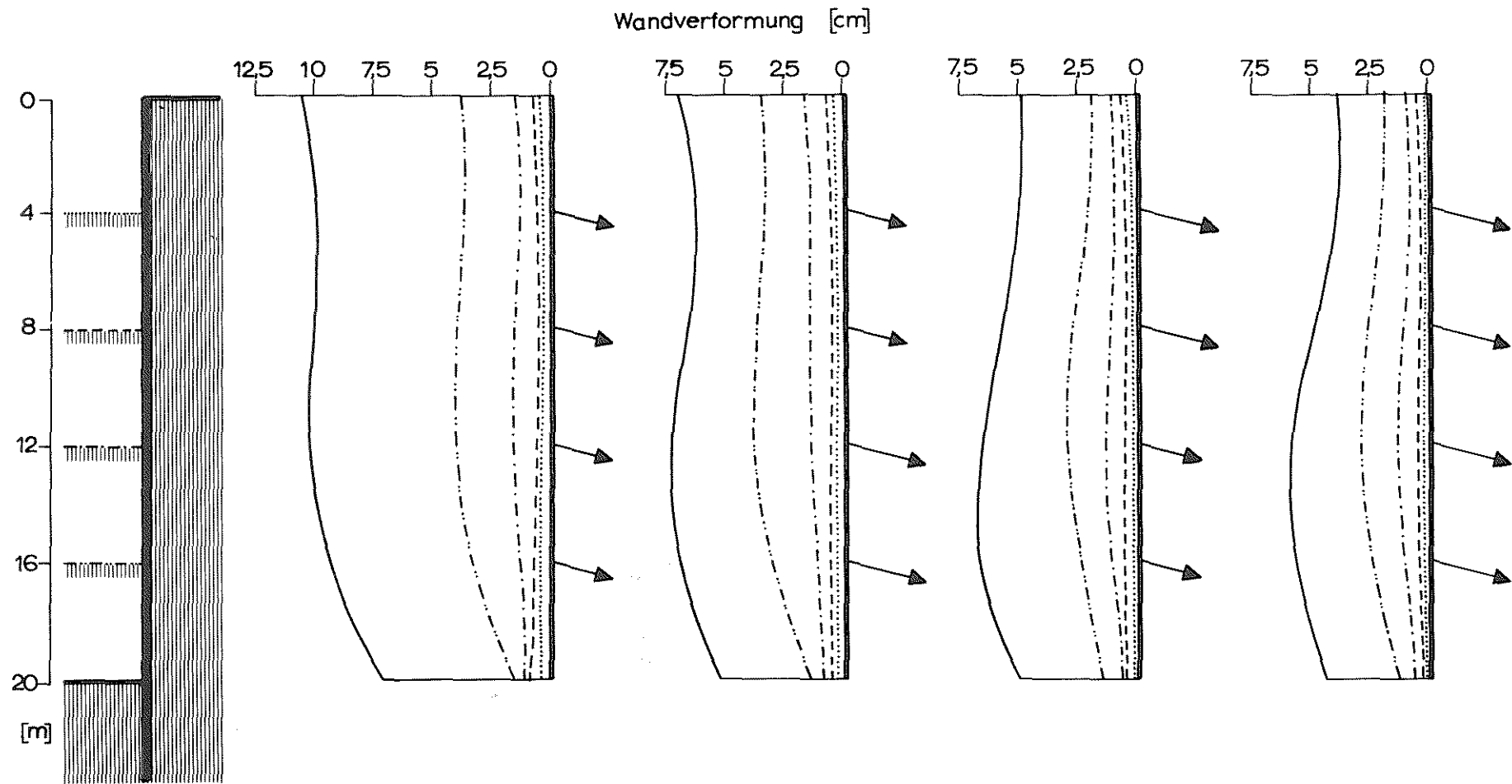
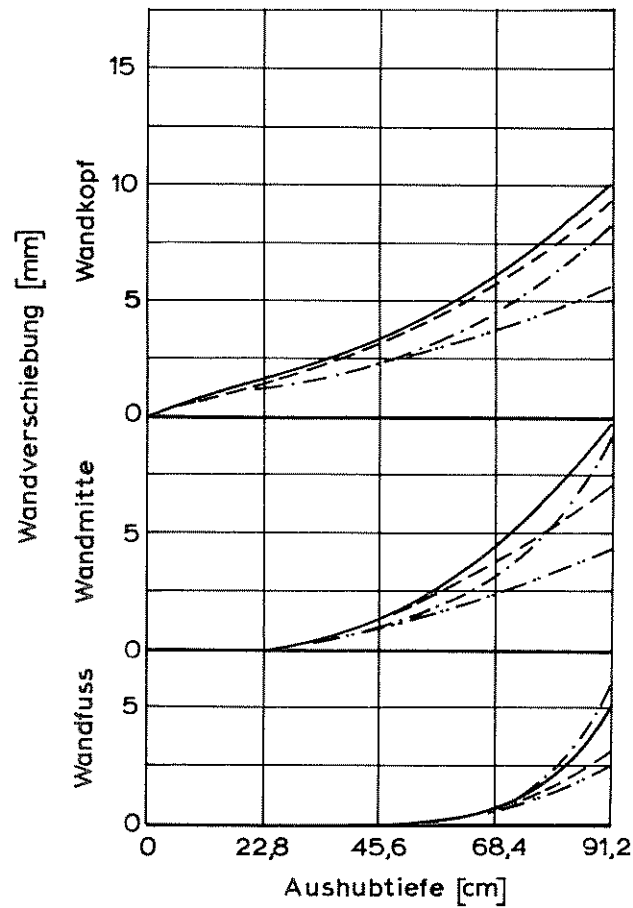


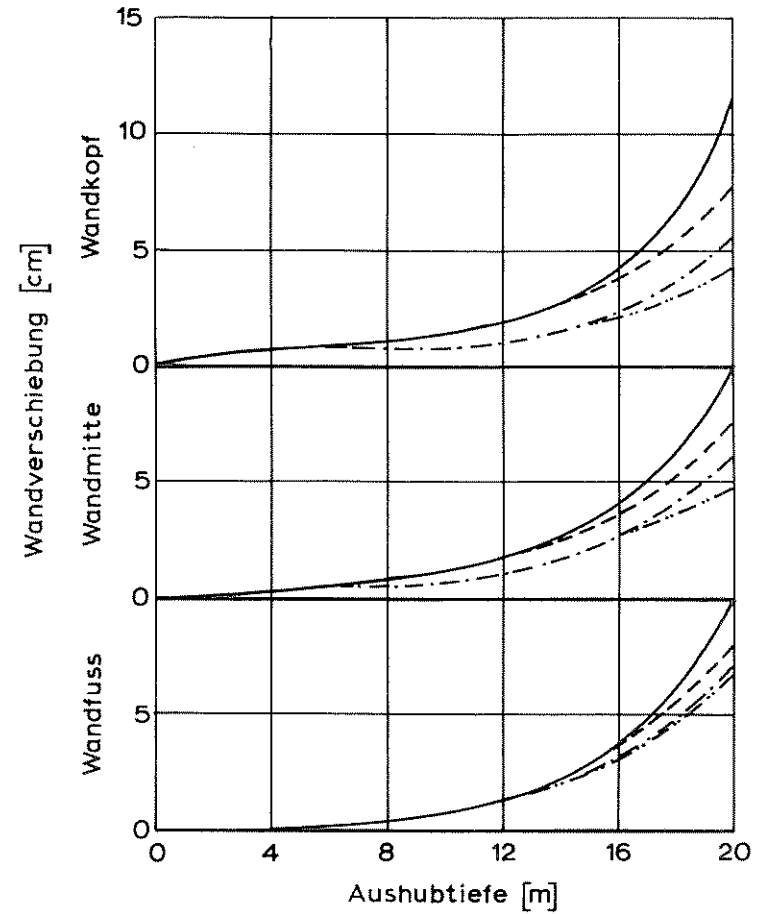
Bild 56: Einfluß der Ankerlänge auf die Wandverschiebung bei der Rechnung

Versuche



- 3 kurze Anker (Nr. 14)
- - - mit t zunehmend (Nr. 31)
- · - · mit t abnehmend (Nr. 32)
- - - - 3 lange Anker (Nr. 20)

F-E - Methode



- 4 kurze Anker
- - - oben 2 kurze Anker
unten 2 lange Anker
- · - · oben 2 lange Anker
unten 2 kurze Anker
- - - - 4 lange Anker

Bild 57: Wandverschiebung während des Aushubs bei den Versuchen und der Rechnung

abnehmende Ankerlänge) weicht bei der Aushubstufe $t = 68,4$ cm im unteren Wandbereich von der Rechnung ab. Die Verformung nimmt ab der Aushubstufe $t = 68,4$ cm wesentlich stärker zu als bei dem Versuch Nr. 20 (4 lange Anker). Während der Rechnung nach zwischen dem Verlauf der Verformung im unteren Wandbereich bei der Ankeranordnung "oben zwei lange Anker, unten zwei kurze Anker" und bei der Ankeranordnung "vier lange Anker" nur ein geringer Unterschied ist. Dieser Unterschied erklärt sich dadurch, daß bei beiden Fällen die Standsicherheit in der tiefen Gleitfuge nach *K r a n z* noch 2,4 bzw. 4,7 beträgt. Dies ist natürlich bei den Modellversuchen Nr. 32 und Nr. 20 völlig anders. Die Standsicherheit fällt bei Versuch Nr. 32 ab der Aushubstufe $t = 68,4$ cm von 1,5 auf 1,0 ab, bei Versuch Nr. 20 beträgt sie bis zur Aushubstufe $t = 91,2$ cm dagegen noch 2,1.

Zusammenfassend kann man sagen, daß bei einer genügend großen Standsicherheit der Verlauf der Wandverformung bei den Modellversuchen und bei den Modellrechnungen gut übereinstimmt.

Sowohl durch die Modellversuche als auch durch die Modellrechnungen wird der bedeutende Einfluß der Ankerlänge aufgezeigt. Weiterhin wird durch eine Verlängerung der oberen Anker die Wandbewegung im oberen Wanddrittel verringert. Bei einer Verkürzung der unteren Anker nimmt dagegen die Verformung im unteren Wanddrittel zu.

12.3 Einfluß der Ankervorspannung

Um den Einfluß der Vorspannung auf die Wandverformung und den Erd-
druck zu zeigen, wurden der Versuch Nr. 28 (0 % Vorspannung) und der
Versuch Nr. 26 (80 % Vorspannung) durchgeführt. Bei Versuch Nr. 26
wurden die drei Anker nicht gleichmäßig wie bei Stroh vorgespannt, son-

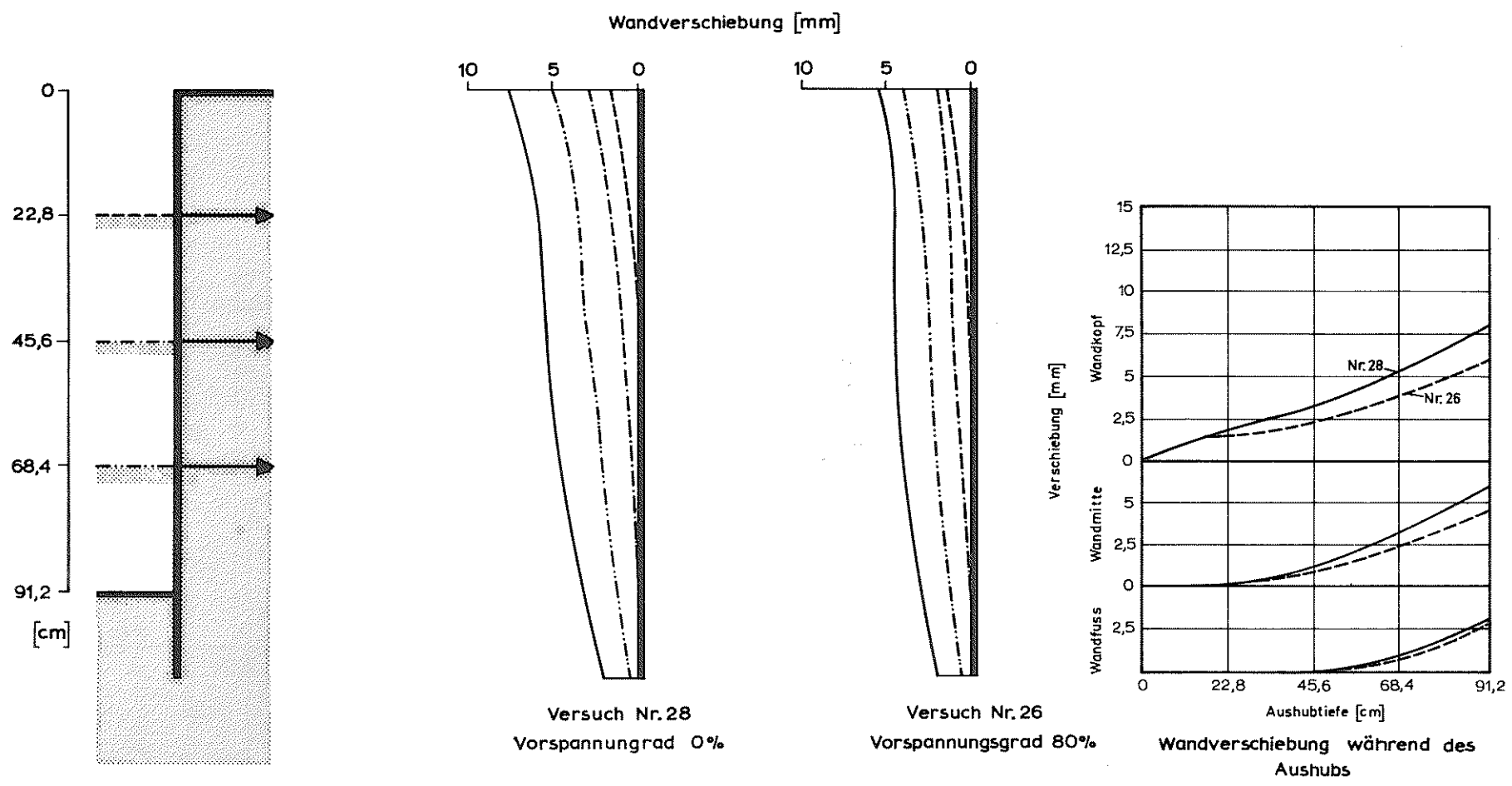


Bild 58: Einfluß der Vorspannung auf die Wandverschiebung (Versuche)

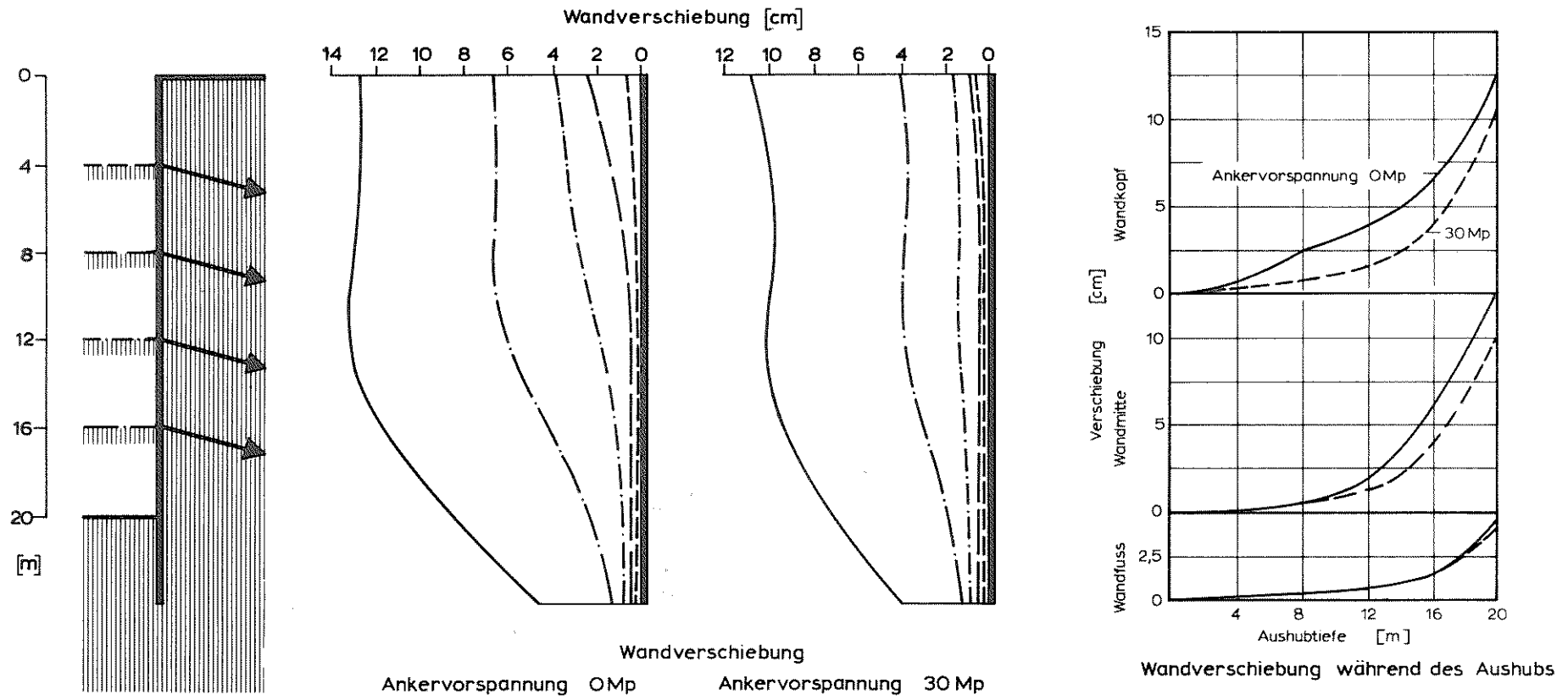


Bild 59: Einfluß der Vorspannung auf die Wandverschiebung (Rechnung)

dern jeder Anker wurde auf 80 % von derjenigen Ankerkraft, die sich bei keiner Vorspannung einstellt, vorgespannt.

Die Parallelverschiebung der Wand und das Zurückbleiben des Wandfußes tritt sowohl bei den Modellversuchen als auch bei der Modellrechnung auf (Bild 58 und 59). Durch die Vorspannung der Anker verringert sich die Wandverformung beim Endaushub von 7,8 mm auf 5,7 mm (bei der Rechnung von 13 cm auf 10 cm). Die Abnahme der Verformung liegt bei der Rechnung in der Vorwegnahme der elastischen Ankerstahldehnung. Bei den Versuchen ist der Einfluß der Stahldehnung sehr gering. Er beträgt im Durchschnitt nur 0,2 mm. Dagegen hat die durch die Vorspannung vorweggenommene Aktivierung der Reibung zwischen dem Verankerungskörper und den ihn umgebenden Boden hier den entscheidenden Einfluß.

Dies wird durch den Verlauf der Ankerkräfte deutlich (Bild 60). Nach Erreichen der jeweiligen Aushubstufe wird der Anker vorgespannt. Beim weiteren Aushub steht jetzt praktisch schon die volle Ankerkraft als Stützkraft zur Verfügung, während sich bei Versuchen ohne Vorspannung die volle Ankerkraft erst beim weiteren Aushub aufbaut. Zur Aktivierung der Reibungskraft zwischen Verankerungskörper und den ihn umgebenden Sand ist eine Bewegung des Ankers notwendig. Weiterhin zeigt sich, daß nach dem Vorspannen der Anker beim weiteren Aushub die Ankerkräfte nur noch wenig zunehmen.

Die Erddruckverteilung ist sowohl beim Modellversuch als auch bei der Modellrechnung dreieckförmig (Bild 61). Der Unterschied zwischen Versuch und Rechnung bei der Erddruckverteilung liegt darin, daß beim Versuch unterhalb des untersten Ankers der Erddruck abfällt. Warum diese Erddruckumlagerung bei der Rechnung nicht auftritt, hat Stroh (1974) in seiner Arbeit ausführlich dargelegt.

Die gleichmäßige Vorspannung der Anker bei der Rechnung hat natürlich zur Folge, daß der Erddruck im oberen Wandbereich stärker zunimmt,

F-E-Methode

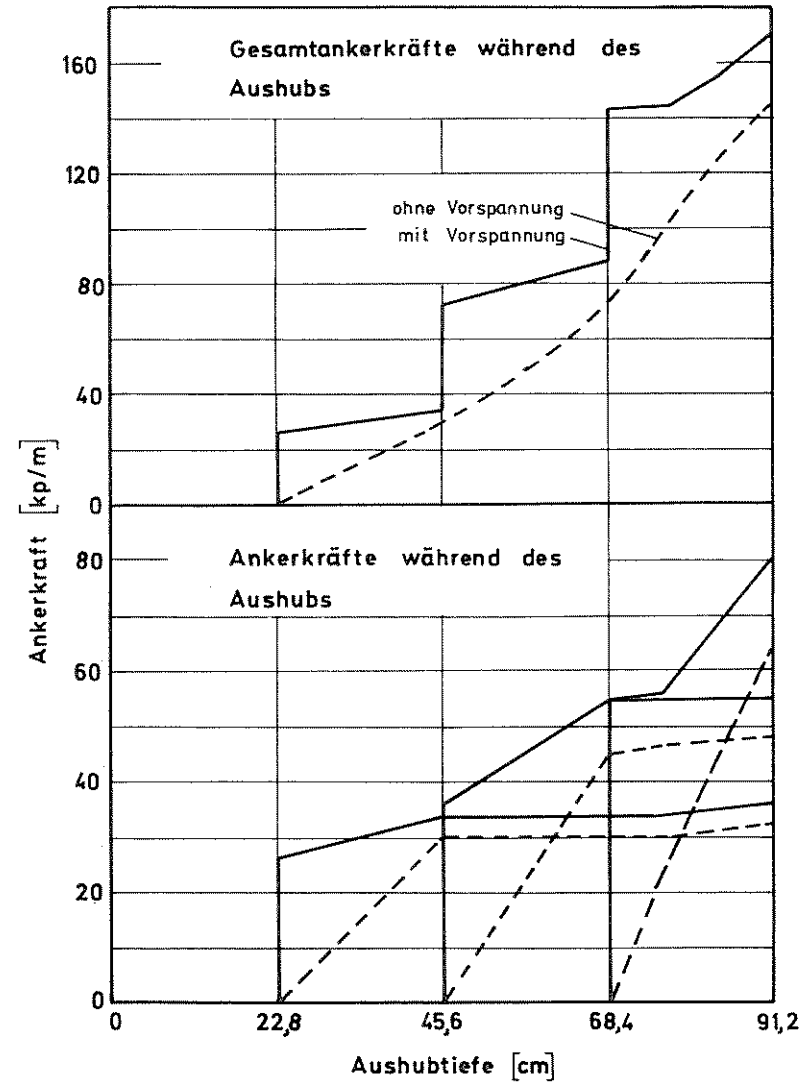
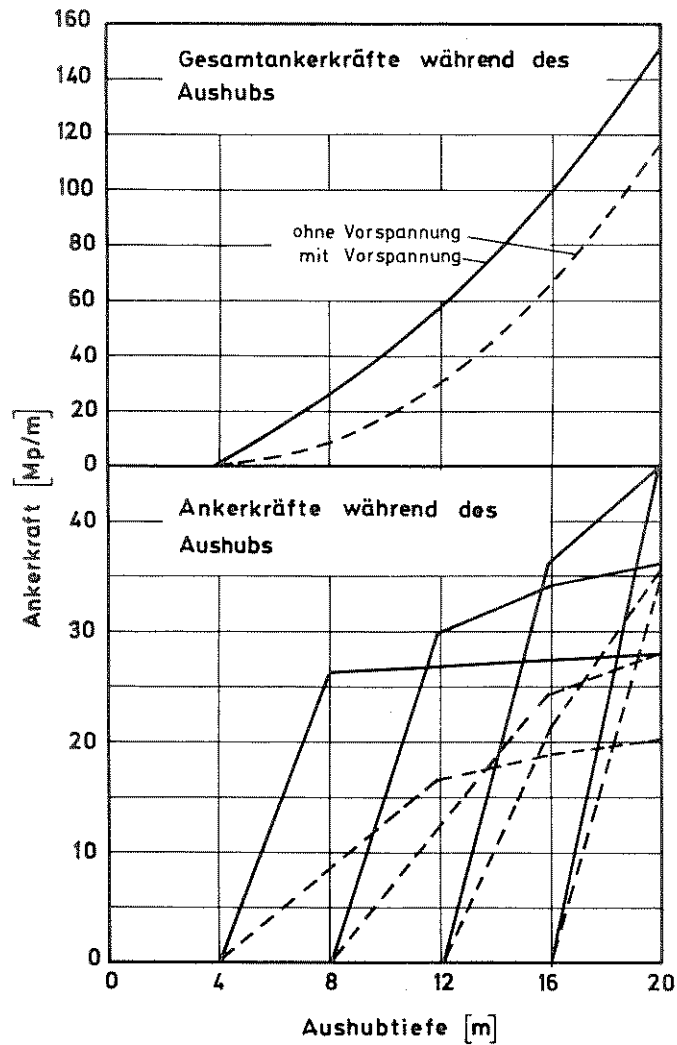


Bild 60: Ankerkräfte während des Aushubs bei den Versuchen und bei der Rechnung

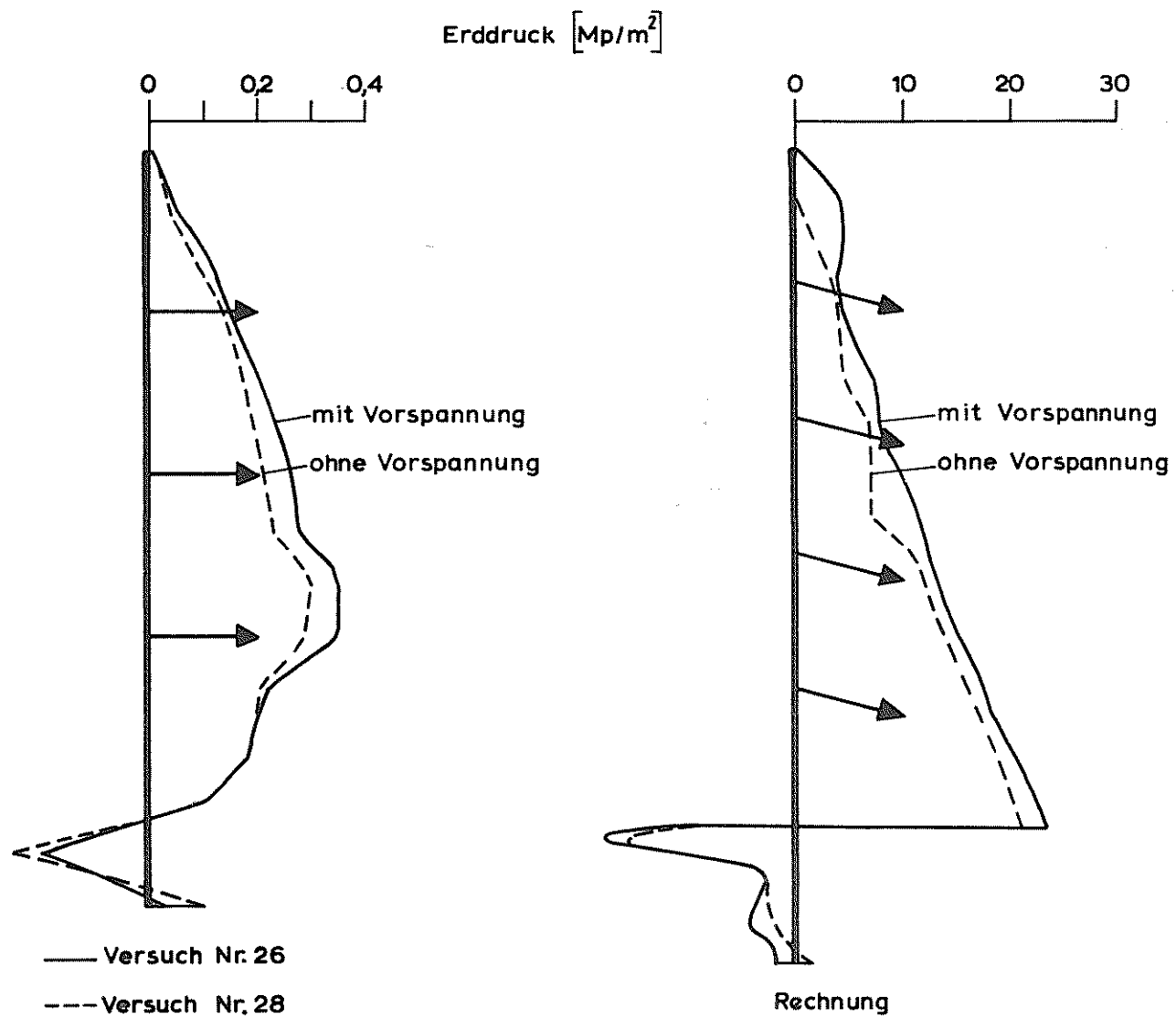


Bild 61: Einfluß der Vorspannung auf die Erddruckverteilung (Versuche und Rechnung)

als dies bei der im Versuch gewählten Vorspannung der Fall ist. Hier steigt der Erddruck nur geringfügig an, weil die Vorspannkraft mit der Aushubtiefe zunehmen und sich somit dem Verlauf der Ankerkräfte, wie sie sich ohne Vorspannung einstellen, anpassen. Die Größe des Erddrucks wird durch die Vorspannung sowohl bei den Modellversuchen als auch bei den Modellrechnungen erhöht (Bild 61).

12.4 Einfluß eines gemischten Stütz-Systems aus Anker und Steifen

Für diese Untersuchung wurden die Versuche Nr. 36 (3 Anker), Nr. 49 (2 Anker, 1 Steife) und Nr. 43 (1 Steife, 2 Anker) gemacht. Die Anker und Steifen wurden alle gleichmäßig vorgespannt. Der Vorspannungsgrad betrug 20 %. Diese geringe Vorspannung wurde gewählt, um die noch unbekannte Erddruckverteilung bei einem Mischsystem aus Steifen und Ankern ohne den Einfluß der Vorspannung zu ermitteln.

Die verankerte Wand hat sich bei Versuch Nr. 36 etwa 7,3 mm nahezu parallel verschoben (Bild 62). Nur der Wandfuß ist etwas zurückgeblieben.

Bei dem Versuch Nr. 49 hat sich die Wand nach Einbau der Steife, abgesehen von der elastischen Verkürzung der Steife, praktisch nicht mehr verschoben. Die Verschiebung der Wand beträgt beim Endaushub 5 mm.

Durch die Anordnung der Steife im oberen Wandbereich (Versuch Nr. 43) treten bei der Wandverformung zwischen den Versuchen Nr. 43, Nr. 36 und Nr. 49 erhebliche Unterschiede auf. Der Wandkopf hat sich nur nahezu 0,8 mm verschoben, während der übrige Teil der Wand sich 1,6 mm verschoben hat. Die Zunahme der Wandbewegung bei der letzten Aushubstufe ist beträchtlich. Die obere Steife hat somit nur einen geringen Einfluß auf die Bewegungen des unteren Wandbereichs. Die Wandverschiebung (Bild 62) stimmt qualitativ recht gut mit der Rechnung überein.

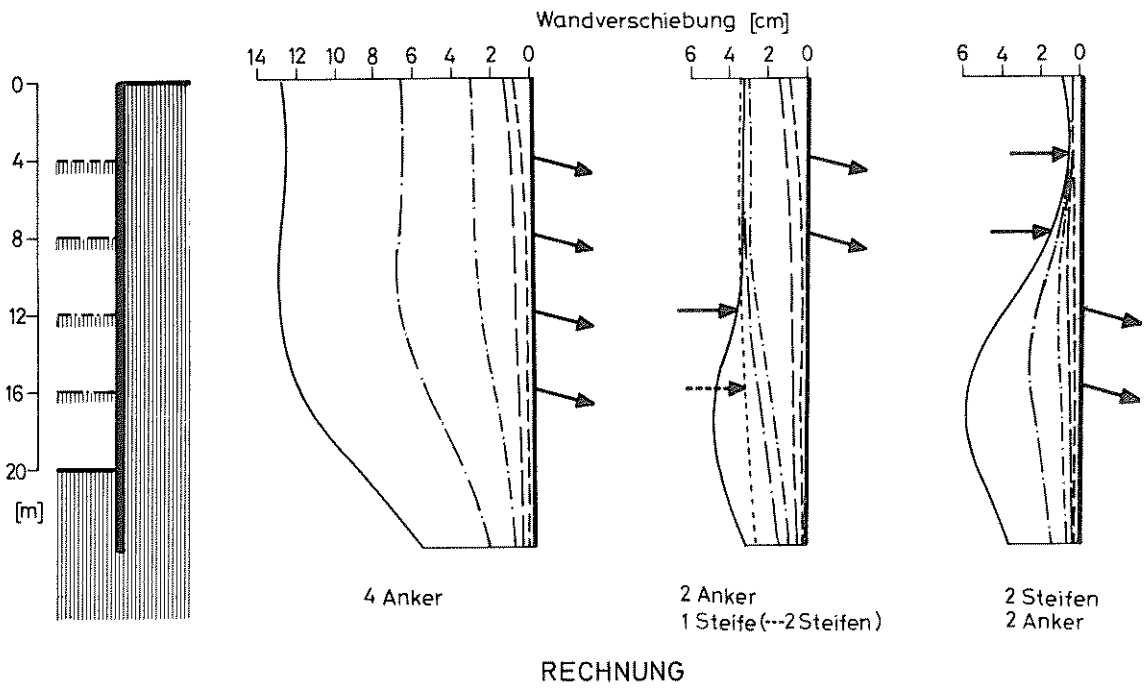
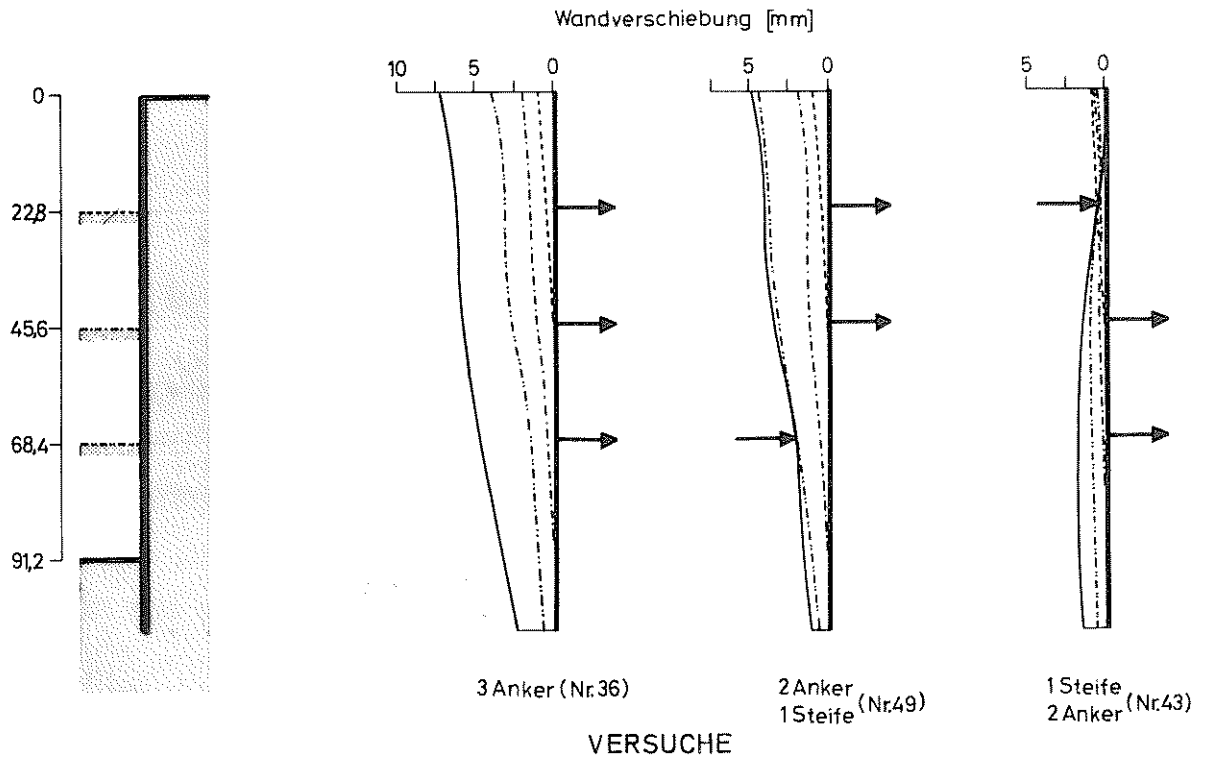
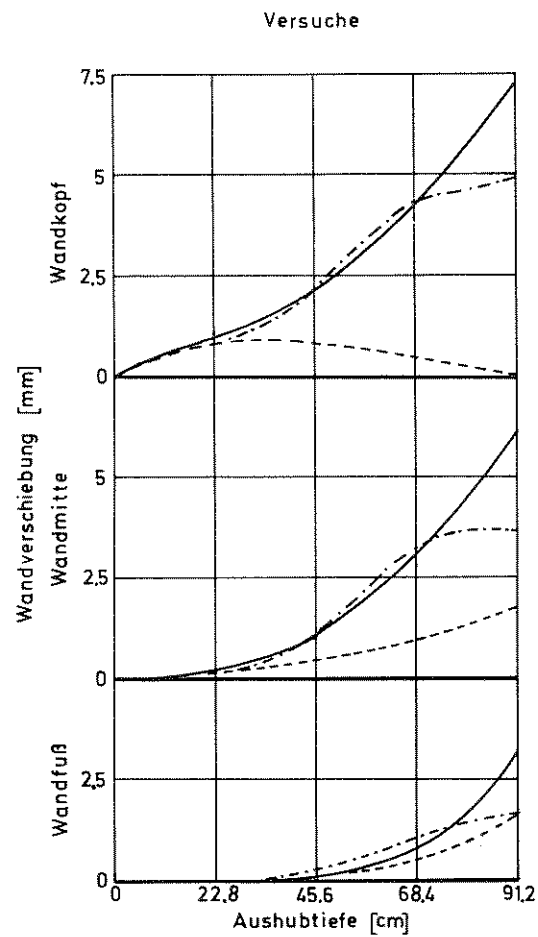
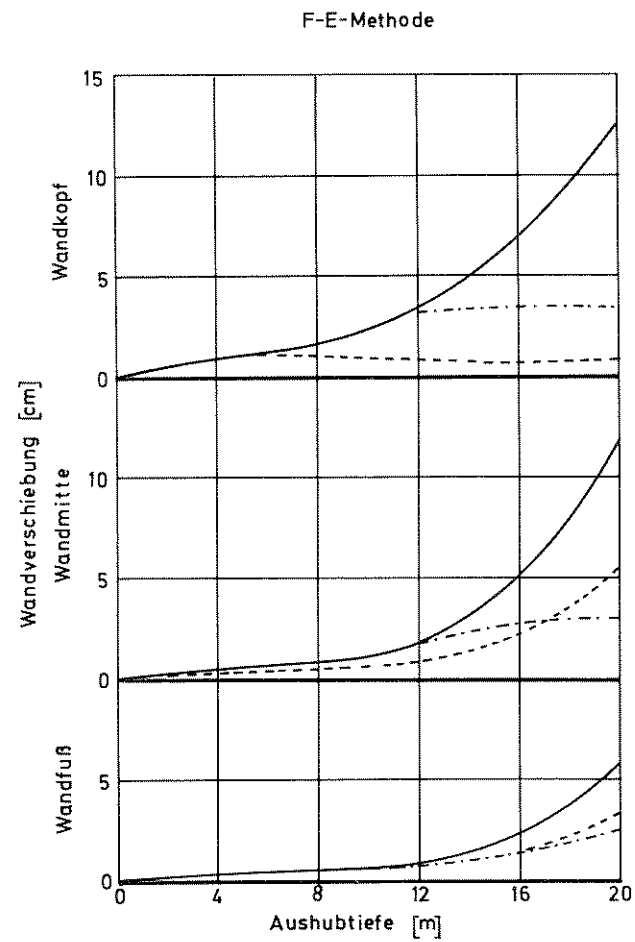


Bild 62: Einfluß von Ankern und Steifen auf die Wandverschiebung bei den Versuchen und bei der Rechnung.



- 3 Anker (Nr.36)
- - - 2 Anker (Nr.49)
1 Steife
- - - 1 Steife (Nr.43)
2 Anker



- 4 Anker
- - - 2 Anker
2 Steifen
- - - 2 Steifen
2 Anker

Bild 63: Wandverschiebung während des Aushubs, bei Versuchen und bei der Rechnung

Auch der Verlauf der Wandverschiebung über die Aushubtiefe (Bild 63) ist ähnlich.

Für den Verlauf der Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche (Bild 64) gilt dasselbe wie für die Wandverschiebung. Die Verschiebung der Bodenoberfläche nimmt bei Versuch Nr. 36 mit zunehmendem Aushub weiter zu. Während bei dem Versuch Nr. 49 nach Einbau der Steife die Horizontalverschiebung und die Zerrungen im Bereich hinter den Ankern zum Stillstand kommen. Die Horizontalverschiebung bei dem Versuch Nr. 49 ist natürlich wegen der im oberen Wandbereich befindlichen Steife wesentlich kleiner als bei den Versuchen Nr. 36 und Nr. 49. Entsprechend ist auch die Setzung der Bodenoberfläche kleiner als bei der verankerten Wand.

Ein Vergleich der Erddruckverteilung (Bild 65) zwischen Versuch und Rechnung läßt eine gute Übereinstimmung erkennen. Bei der verankerten Wand stellt sich jeweils eine dreieckförmige Erddruckverteilung ein, wobei bei dem Versuch Nr. 36 im Bereich des Wandfußes der Erddruck etwas abfällt.

Durch den Einbau einer Steife im unteren Wandbereich bleibt die dreieckförmige Erddruckverteilung erhalten, nur im Bereich der Steife konzentriert sich der Erddruck so stark, daß er sogar größer ist als der Ruhedruck. Unterhalb der Steife nimmt er jedoch wieder ab. Bei der Anordnung einer Steife im oberen Wandbereich tritt dagegen eine erheblich stärkere Erddruckkonzentration auf. Der Erddruck liegt hier weit über dem Ruhedruck. Im Bereich der Anker steigt er dann nur langsam wieder auf den Erddruck an, wie er sich bei dem Versuch Nr. 36 mit 3 Ankern einstellt. Der Erddruck ist nahezu rechteckförmig verteilt, und die Größe entspricht fast dem Ruhedruck

Die gute Übereinstimmung bei der Erddruckverteilung zwischen den

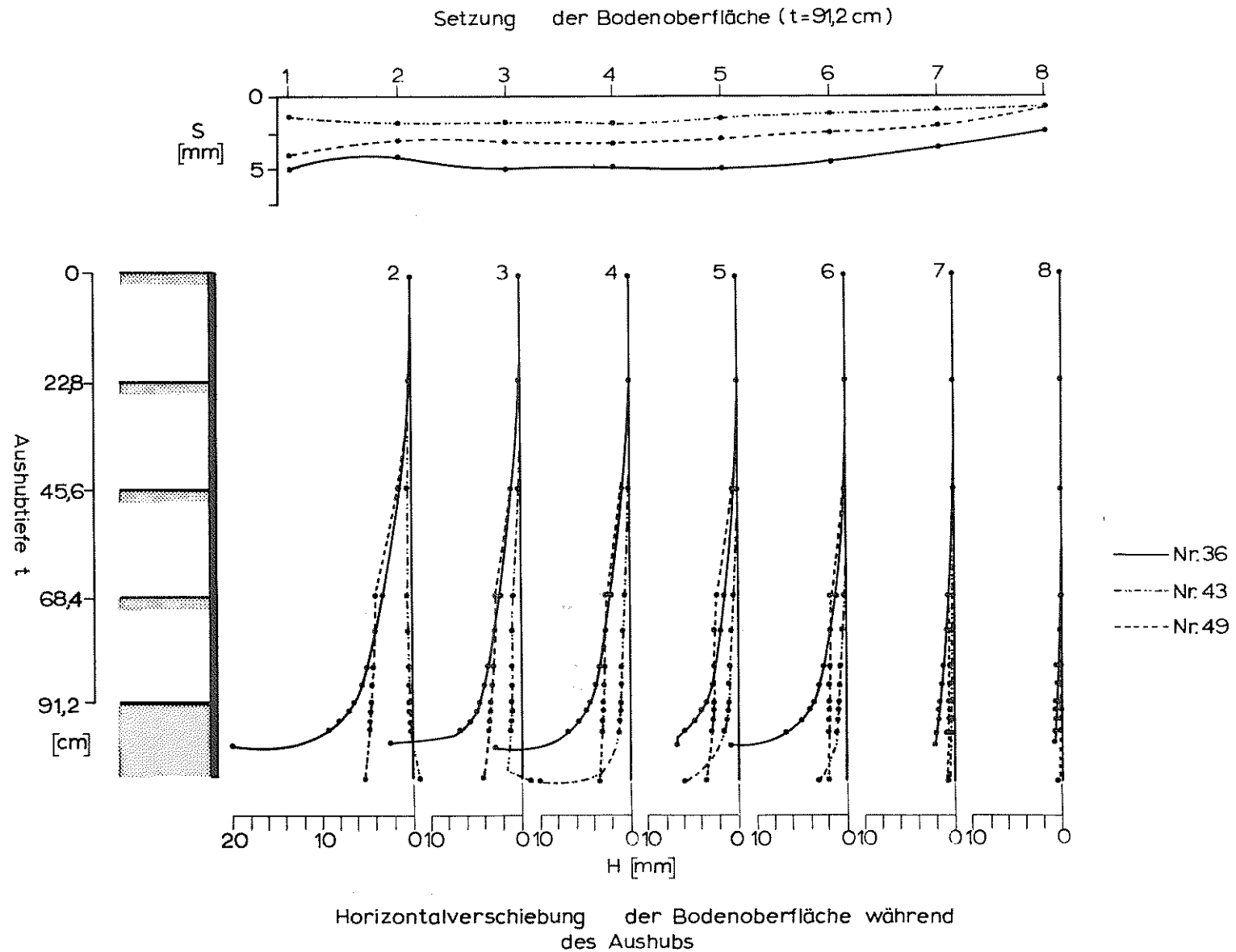


Bild 64: Einfluß von Ankern und Steifen auf die Setzung und Horizontalverschiebung der Bodenoberfläche (Versuche)

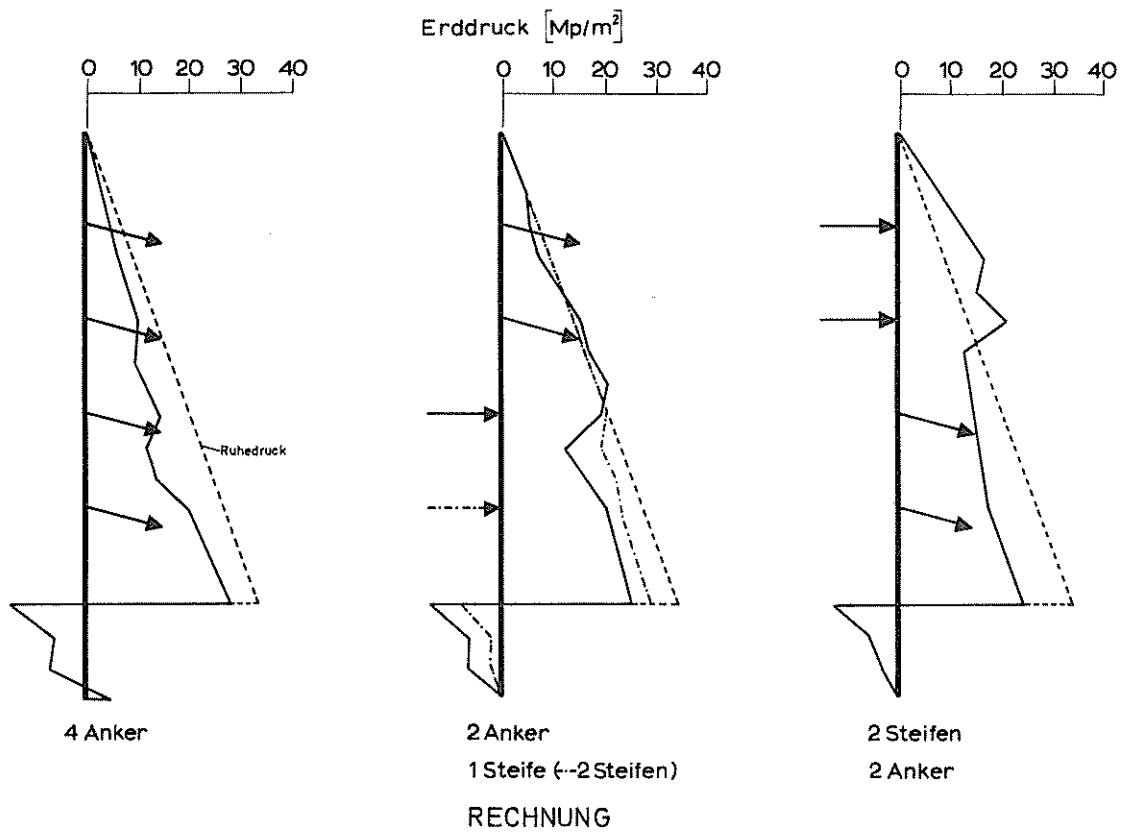
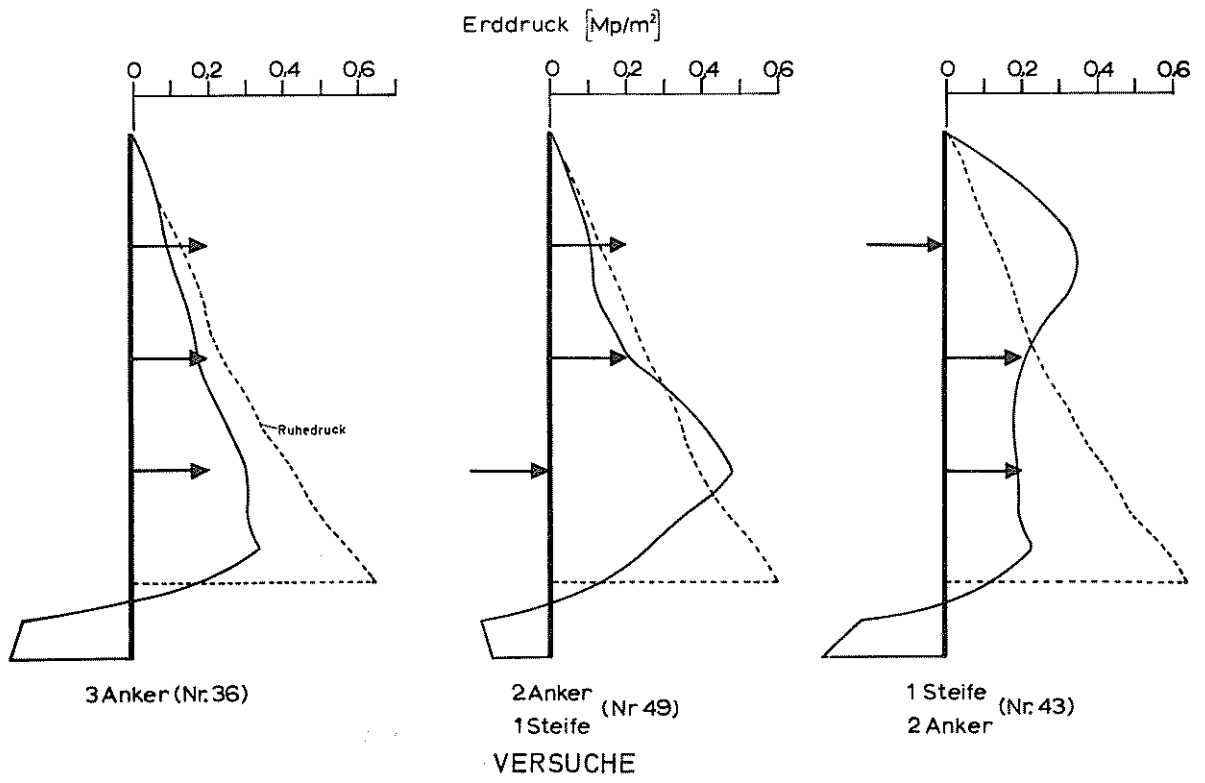


Bild 65: Einfluß von Ankern und Steifen auf die Erddruckverteilung (Versuche und Rechnung)

Versuchen und der Rechnung läßt sich auch daran erkennen, wenn man die entsprechenden Erddruckkurven in Beziehung zu dem Ruhedruck setzt. Der Anteil des Erddrucks, der über bzw. unterhalb des Ruhedrucks liegt, ist sowohl bei den Versuchen als auch bei der Rechnung fast genau gleich groß.

Am Verlauf der Gesamt-Anker- und Steifenkräfte (Bild 66 und 67) sieht man, daß die Kräfte auf die verankerte Wand genau wie bei der Rechnung am kleinsten sind und wenig über dem aktiven Erddruck liegen. Bei einer gemischten Abstützung sind die Gesamtankerkräfte untereinander nahezu gleich groß. Sie sind aber um etwa 30 % (bei der Rechnung um 25 %) größer als bei der Verankerung. Auf Bild 66 sieht man, daß sofort nach Einbau der unteren Steife (Versuch Nr. 49 --- Kurve) die Gesamt-Anker- und Steifenkraft der gemischten Abstützung stark ansteigt und beim Endaushub etwas über der Kurve von Versuch Nr. 43 (Kurve -.-.-) liegt. Bei der Rechnung ist dieser Verlauf ähnlich (Bild 67).

Der Verlauf der Anker- und Steifenkräfte in Abhängigkeit vom Aushub macht deutlich, daß nach dem Einbau eines Ankers beim weiteren Aushub die Ankerkraft des vorher eingebauten Ankers praktisch nicht mehr zunimmt. Wird nun, wie bei Versuch Nr. 49, anstelle eines Ankers eine Steife eingebaut, so ändern sich die Kräfte in den vorher eingebauten Ankern gegenüber dem Versuch Nr. 36, bei dem nur Anker vorhanden sind, nicht. Wird jedoch erst eine Steifenlage (Versuch Nr. 43) eingebaut, dann übernehmen die nachfolgenden Anker nur die Vorspannkraft. Lediglich der unterste Anker hat den gleichen Verlauf wie bei der verankerten Wand (Versuch Nr. 36). Die Steifen übernehmen also die Differenz des Erddrucks, die sich zwischen einer verankerten und einer mit Ankern und Steifen abgestützten Wand einstellt. Die Steifenkraft bei Versuch Nr. 43 und Nr. 49 ist fast genauso groß, wie die Gesamt-Ankerkraft bei der verankerten Wand (Versuch Nr. 36).

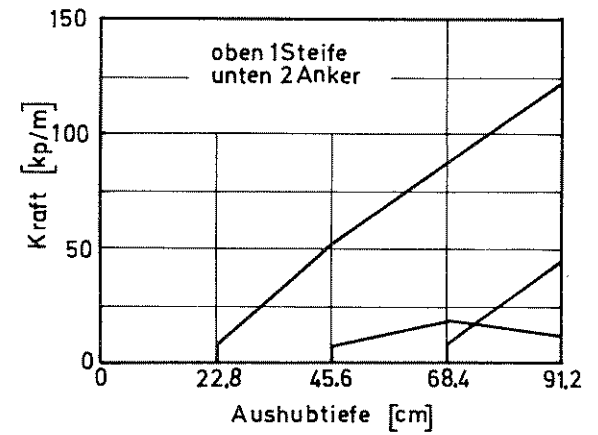
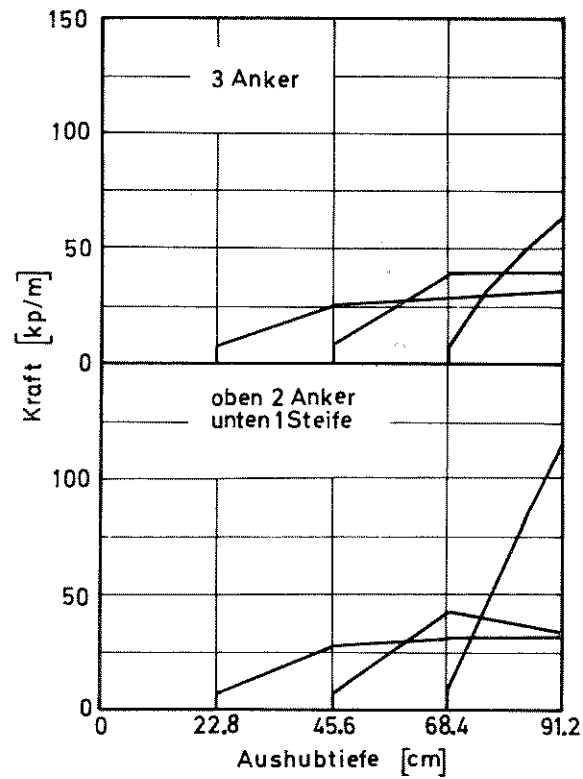
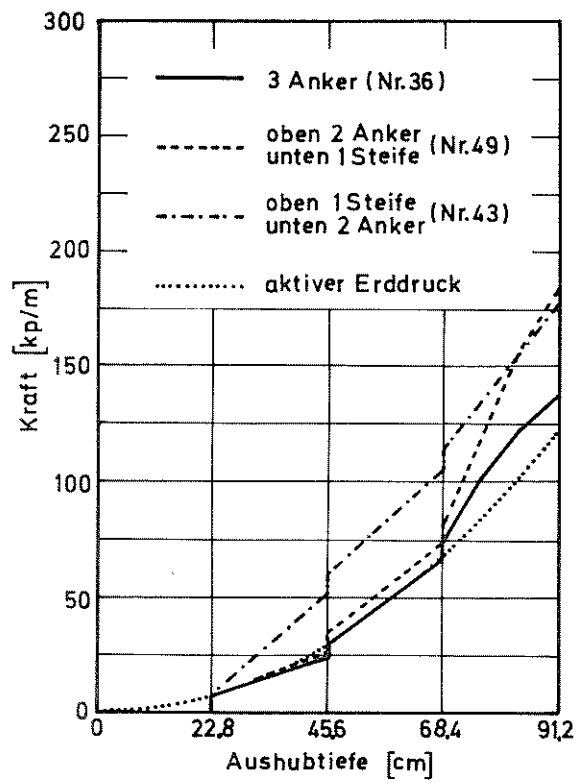


Bild 66: Anker und Steifenkräfte während des Aushubs
(Versuche Nr. 36, 43, 49)

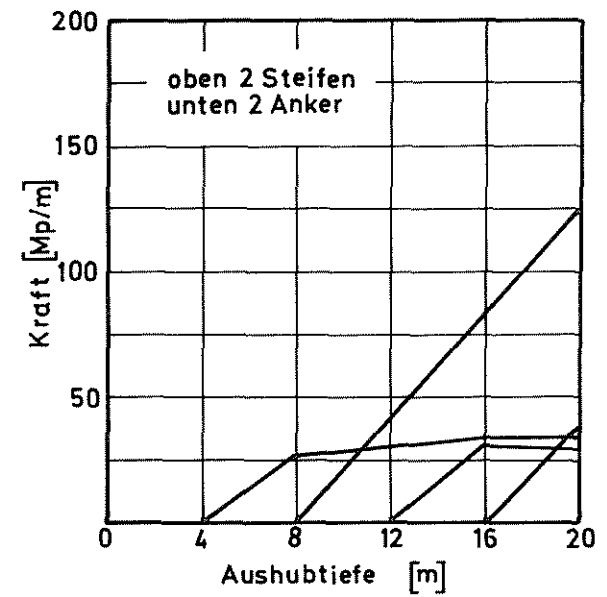
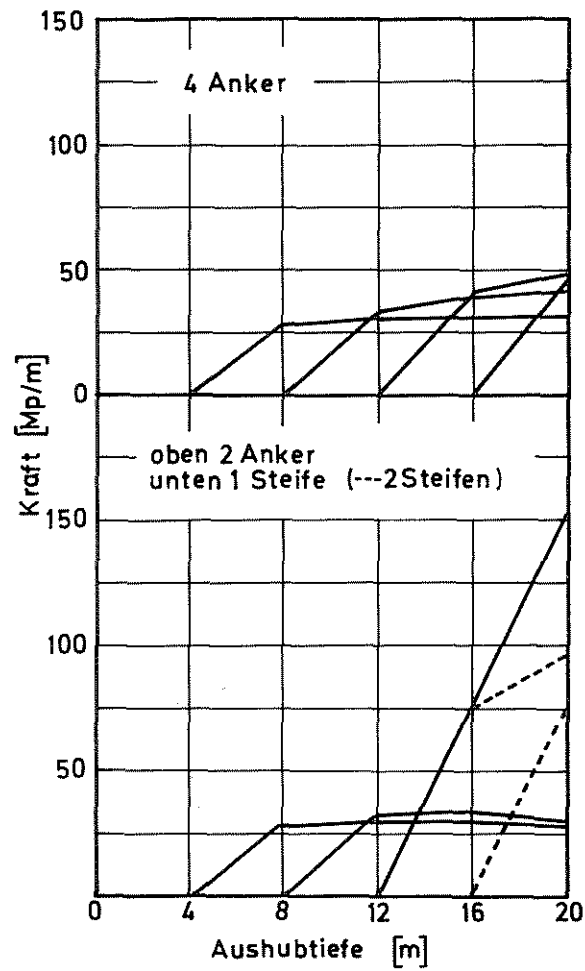
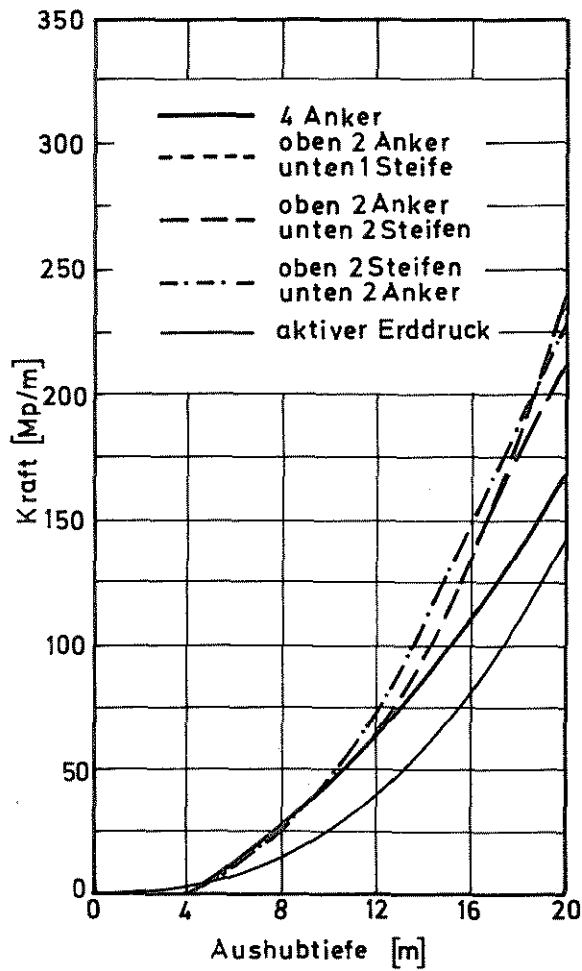
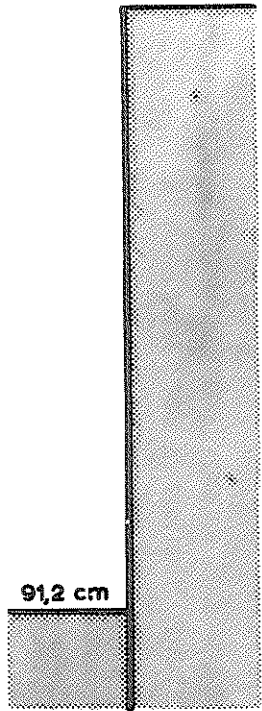


Bild 67: Anker und Steifenkräfte während des Aushubs (Rechnung)

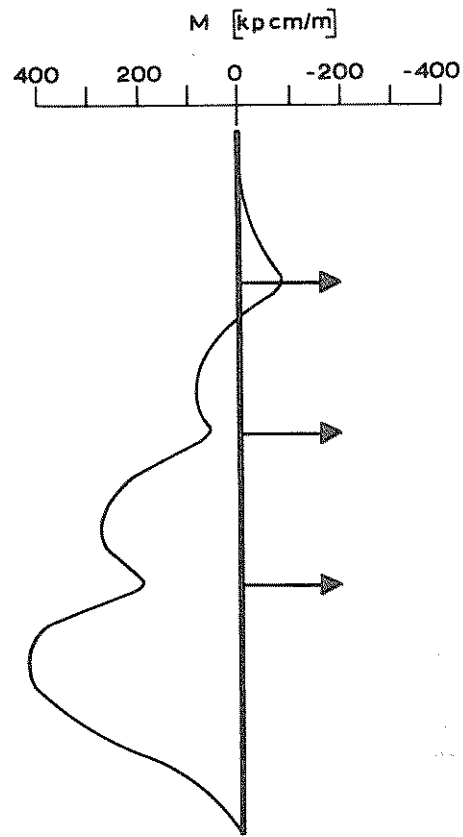
Zusammenfassend kann man sagen, daß bei einem Mischsystem aus Ankern und Steifen sich der Erddruck immer an den Steifen konzentriert und somit die Erddruckverteilung durch die Lage der Steife entscheidend beeinflußt wird. Dies muß auch bei der Bemessung der Steife beachtet werden, da allein die Steife die höhere Erddruckkraft übernimmt, während die Anker entweder nur den Anteil der Kraft, der ihnen bei einer verankerten Wand zugewiesen wird, oder nur die Vorspannkraft übernehmen.

Was die Beanspruchung der Wand angeht, so sind die Momente bei der verankerten Wand am geringsten (Bild 68), während bei einem Mischsystem im Bereich einer Steife das Stützmoment mit zunehmendem Aushub ansteigt. Dies wird auch an der starken Krümmung der Wand erkenntlich (Bild 62).

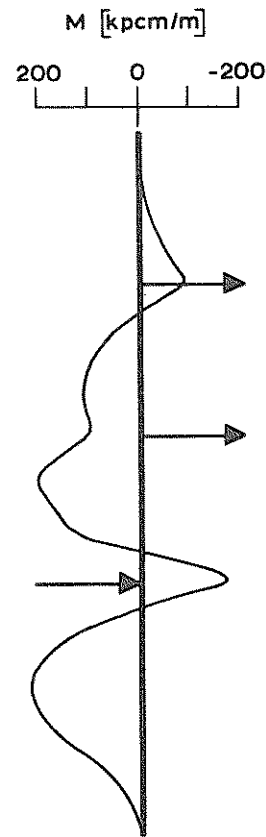
Der Bruch der einzelnen Systeme tritt sowohl bei der verankerten Wand als auch bei dem System mit einer im oberen Wandbereich angeordneten Steife ein (Bild 69). Während das System mit einer im unteren Wandbereich angeordneten Steife nicht zu Bruch geht. Hierbei ist natürlich ein Versagen der Steife ausgeschlossen.



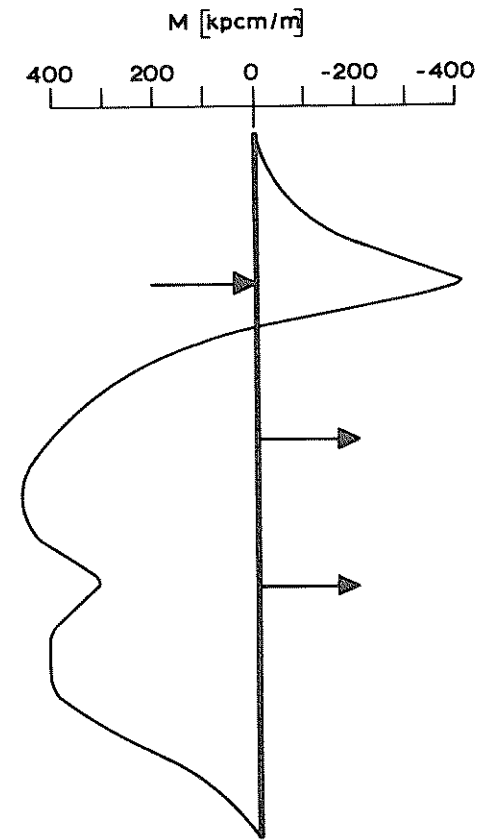
Aushubstufe



Versuch Nr. 36

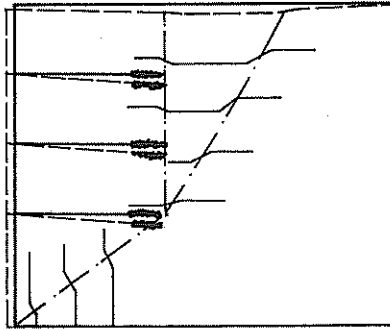


Versuch Nr. 49



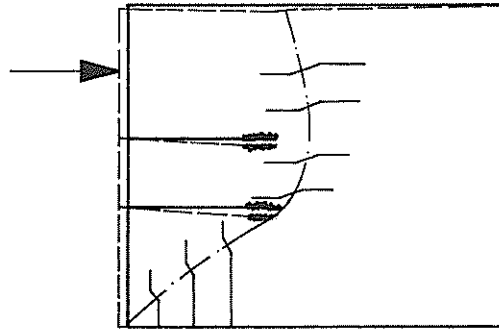
Versuch Nr. 43

Bild 68: Einfluß von Ankern und Steifen auf die Biegemomente der Wand (Versuche)



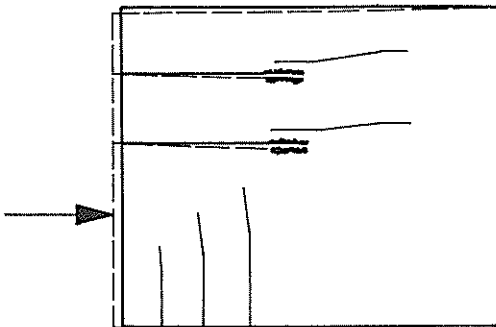
Versuch Nr. 36

3 Anker



Versuch Nr. 43

1 Steife
2 Anker



Versuch Nr. 49

2 Anker
1 Steife

--- verformter Erdkörper
- - - Gleitflächen

Bild 69: Gleitflächen bei einem gemischten Stützsystem aus Anker und Steifen (Versuche)

13. Berechnungsvorschlag

G.P. Schmitt (1974) hat mit Bezug auf seine Untersuchungen einen Vorschlag für die Bemessung der einfach verankerten Wand gemacht. Dieser Vorschlag soll nunmehr auf eine mehrfach verankerte Baugrubenwand erweitert werden, wobei die durch die Modellversuche gewonnenen Erkenntnisse verwertet werden sollen. Die Vorschläge gelten für die zwei- und dreifach verankerte frei aufgelagerte Wand.

13. 1 Erddruck und Ankerlänge

Bei der mehrfach verankerten Wand sollte mit einem größeren Erddruck als dem Coulomb'schen Erddruck gerechnet werden (Bild 26). Die Erddruckfläche gilt für den Fall, daß jeder Anker entsprechend der DIN 4125 auf den 1,2-fachen Wert der rechnerischen Ankerkraft angespannt wird und dann wieder auf den 0,8-fachen Wert abgelassen wird.

Die Erhöhung des Erddrucks kann dadurch geschehen, daß anstelle des Wandreibungswinkels $\delta = - 2/3\rho$ mit $\delta = 0$ bzw. anstelle von $\delta = 0$ mit $\delta = + 2/3\rho$ gerechnet wird.

Ein größerer Erddruck kann ohne weiteres auch durch eine entsprechende Reduzierung der Scherparameter des Bodens berücksichtigt werden.

Der so errechnete Erddruck infolge Bodeneigengewicht wird bei einer mehrfach verankerten Wand linear mit der Tiefe zunehmend über die Wandhöhe verteilt. In Ergänzung zu dem Vorschlag von Schmitt (1974) sollte der Erddruck auf eine mehrfach verankerte Wand bei einer Vorspannung der Anker von 80 % etwas erhöht wer-

den, da im Gegensatz zur einfach verankerten Wand bei einer mehrfach verankerten Wand durch die Vorspannung der Anker eine Entspannung des Bodens hinter der Wand und damit eine Abnahme des Erddrucks verhindert wird. Außerdem nimmt der Erddruck auch beim Bruch des Systems Wand-Boden-Anker nicht ab. Der Anteil des Erddrucks infolge der Vorspannung könnte dann bei einer gleichmäßigen oder bei einer mit der Tiefe zunehmenden Vorspannung der Anker trapezförmig bzw. dreieckförmig entsprechend der in Bild 25 angegebenen schraffierten Flächen verteilt werden.

Eine höhere Vorspannung der Anker auf 140 % wird die Größe und die Verteilung des Erddruckes entsprechend stärker beeinflussen. Jedoch erscheint eine so hohe Vorspannung der Anker wenig sinnvoll.

Der Erdwiderstand vor der Wand wird nach Coulomb oder Caquot/Kerisel berechnet und wird wegen der Begrenzung der Verschiebung des Wandfußes um mindestens 1,5 vermindert.

Die Lage und Neigung des untersten Ankers sind so zu wählen, daß der verankerte Erdkörper die Horizontalkomponente der Ankerkraft mit mindestens 1,5-facher Sicherheit aufnehmen kann. Die aufnehmbare Ankerkraft kann mit dem von Schmitt (1974) ausgearbeiteten Rechenprogramm nach Erweiterung auf die mehrfach verankerte Wand ermittelt werden. Hierfür wird als Gleitfläche ein nach oben konvexer Gleitkreis (Bild 15) zwischen Wandfuß und dem Ende des untersten Ankers gelegt.

Hinter der Ersatzankerwand entsteht der Rankine'sche Grenzzustand, so daß der Erddruck dort mit $\delta = 0^\circ$ ermittelt wird. Die so errechnete Ankerlänge gilt für die durchgehende Ankerwand. Für eine Reihe von Verpreßkörpern sollte die Ankerlänge nach Stavropoulos (1969) um $l = \frac{e}{4 \tan \rho}$ verlängert werden, wenn e der Abstand der einzelnen Ankerkörper ist.

13. 2 W a n d

B i l d 70 macht am Beispiel des Versuchs Nr. 25 deutlich, wie sehr die für den Durchlaufträger berechneten Momente von den gemessenen Momenten abweichen. In Kapitel 7.4 sind die Einflüsse auf die Größe und Verteilung der Momente aufgezeigt. Für die Bemessung der Wand ist es daher unmöglich, alle diese Einflüsse zu berücksichtigen.

Aufgrund dieser Unsicherheit täuscht die Berechnung der Wand als Durchlaufträger eine Genauigkeit vor, die in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Daher sollte die Wand nach dem Traglastverfahren bemessen werden. Nach Weissenbach (1969) ist eine solche Bemessung weniger aufwendig und oftmals wirtschaftlicher als die Berechnung nach der Elastizitätstheorie.

Für die Bemessung des Kragarms sollte infolge der Ankervorspannung ein erhöhter Erddruck angesetzt werden. Um eine gleichmäßige Beanspruchung der Wand zu erreichen, sollten die Abstände zwischen den Ankern und der Abstand zwischen dem untersten Anker und der Baugrubensohle möglichst gleich groß sein.

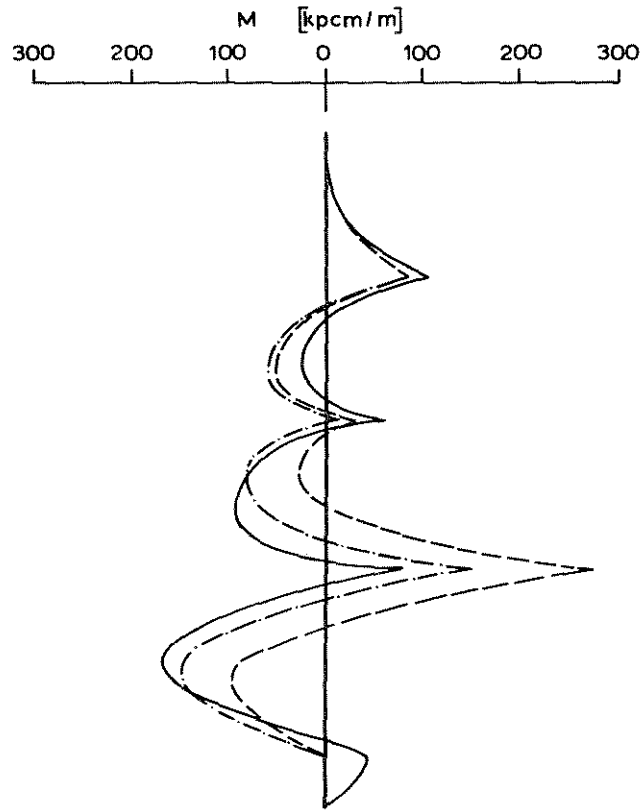
13. 3 V e r f o r m u n g e n

Die Wandverschiebung und die Verformung des Bodens können durch folgende Maßnahmen verringert werden. Auf die Schubverformung des verankerten Erdblocks haben diese Maßnahmen nur wenig Einfluß. (siehe hierzu auch die Arbeit von Stroh (1974)).

Der Bodenaushub sollte nicht mehr als $1/3$ des Abstands der Ankerlagen vorausseilen.

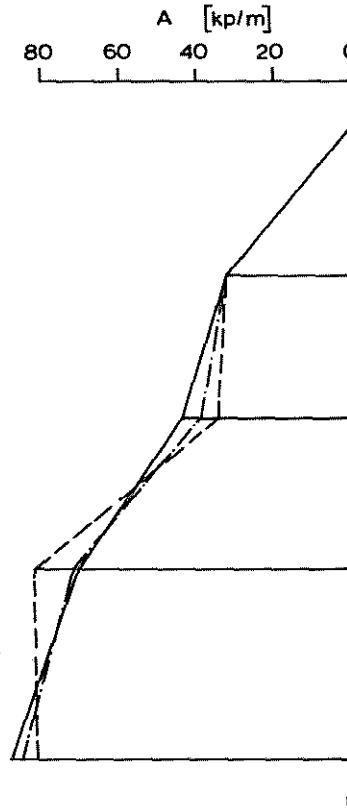
Die Anker sollten auf ca. 80 % ihrer Gebrauchslast vorgespannt werden. Durch die Vorspannung können die Verschiebungen der Wand und des Bodens nur in örtlichen Bereichen verringert werden. Durch Überspannen und anschließendes Nachlassen kann der Schlupf der Anker klein gehalten werden.

Die unteren Anker sollten nicht kürzer als die oberen Anker sein.



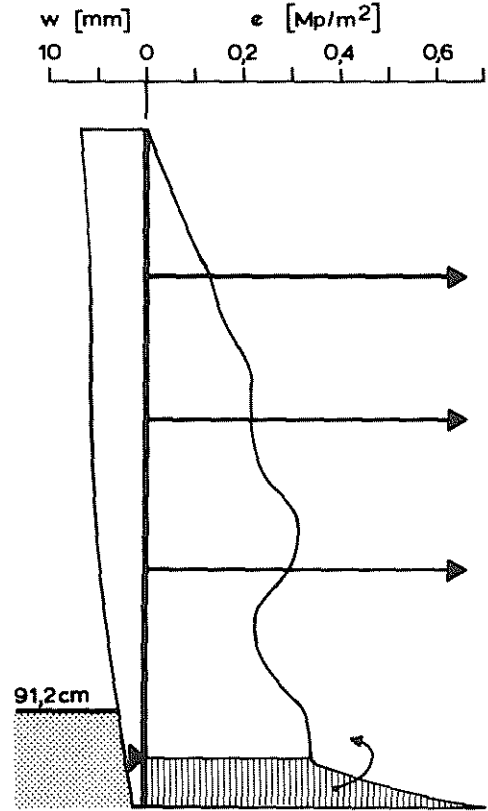
Biegemomente

— errechnete Schnittgrößen am Durchlaufträger bei Berücksichtigung der Wandverformung



Ankerkräfte

— errechnete Schnittgrößen am Durchlaufträger auf unnachgiebigen Lagern



Wandbewegung

Erddruckverteilung

— gemessene Werte

Bild 70: Einfluß der Wandverformung auf die Schnittgrößen (Versuch Nr. 25)

14. Zusammenfassung

Es wurden Modellversuche durchgeführt, bei denen besonders darauf geachtet wurde, daß der Boden vor der Wand abgetragen und jeder Anker vorgespannt wurde, wie bei der Erstellung einer mehrfach verankerten Baugrubenwand. Mit der genauen Nachahmung des Bauvorganges wurden der Modellwand dieselbe Bewegungsmöglichkeit wie der Baugrubenwand gegeben; ebenso war damit sichergestellt, daß der Boden im Modell auf die gleiche Weise zu Bruch kam, wie hinter dem verankerten Stützbauwerk.

Wand und Boden konnten sich ohne Behinderung bis zum Bruch des Bodens verformen. Die Modellwand war 1,15 m hoch. Sie wurde von 2 bzw. 3 Ankern gehalten. Der Versuchsboden war gewaschener Quarzsand, der in locker bis mitteldichter Lagerung eingebaut wurde. Erddruck, Erdwiderstand, Ankerkräfte, Wandreibungswinkel und Wandbewegung sowie die Setzung und Horizontalverschiebung der Geländeoberfläche wurden von Beginn des Aushubs an bei jedem Aushubschritt bis zum Bruch des Systems Wand-Boden-Anker gemessen. Nach jedem Versuch wurden die Gleitflächen im Boden freigelegt und aufgemessen.

Die Arbeit untersuchte den Einfluß der Zahl, Anordnung, Länge und Vorspannung der Anker sowie den Einfluß der Biegesteifigkeit der Wand und des Aushubvorganges auf die Größe und Verteilung des Erddrucks. Über die im Augenblick des Bruches gemessenen Kräfte war eine Aussage über die Standfestigkeit des untersuchten Systems möglich.

Die wichtigsten Ergebnisse der Versuche sind:

Der Erddruck ist dreieckförmig verteilt. Die Spitze des Erddruckdrei-

ecks liegt in Höhe des letzten Ankers. Darunter fällt der Erddruck ab. Der Erddruck ist größer als der aktive Erddruck nach Coulomb. Der Schwerpunkt der Erddruckfläche liegt etwas über dem unteren Drittel der Wandhöhe. Diese Aussage gilt, wenn die Anker auf 80 % des linear nach der Tiefe zunehmenden Coulomb'schen Erddrucks vorgespannt werden. Durch eine entsprechende Vorspannung der Anker kann ein, von dieser Festsetzung abweichend, größerer und anders verteilter Erddruck erzeugt werden. Größe und Verteilung des Erddrucks auf die Wand können durch die Ankervorspannung in Grenzen vorgegeben werden. Die Ankerlänge beeinflusst die Größe des Erddrucks, die Verteilung des Erddrucks dagegen nur wenig. Auch ist der Einfluß der Wandsteifigkeit auf den Erddruck gering.

Die Standsicherheit des Systems Wand-Boden-Anker wurde auf ebenen und gekrümmten Gleitflächen überprüft. Bei der Annahme von ebenen Gleitflächen wird eine zu große Sicherheit vorgetäuscht.

Mit zunehmender Ankerlänge wird die Standsicherheit des Systems Wand-Boden-Anker entscheidend vergrößert, die Bewegungen der Wand und des Bodens wesentlich verringert.

Anordnung und Zahl der Anker bestimmen ebenfalls die Standsicherheit. Besonders die Länge des untersten Ankers hat einen großen Einfluß auf die Standsicherheit des Systems und auf die Verformung der Wand und des Bodens.

Die Vorspannung der Anker und die Biegesteifigkeit der Wand beeinflussen die Standsicherheit nicht. Dagegen wird die Wandverformung nur im oberen Wandbereich und die Setzung der Geländeoberfläche hinter der Wand etwas verringert, wenn die Anker höher vorgespannt werden und die Wand steifer ist.

In Übereinstimmung mit einer in Frankfurt/Main durchgeführten Messung an einer mehrfach verankerten Wand zeigten die Modell-

versuche, daß die Erddruckverteilung mit der Vorspannung der Anker vorgegeben wird, und die Vorspannung der Anker beim Aushub nahezu erhalten bleibt. Baugrubenwand und Modellwand haben sich während des Bodenaushubs parallel verschoben, wohingegen der Wandfuß etwas zurückblieb.

Ein Vergleich mit Berechnungen nach der Finite-Element-Methode haben die Ergebnisse der Modellversuche in den wesentlichsten Punkten bestätigt. Dies gilt im Besonderen für die Aussagen über die Erddruckverteilung sowie über die Vorspannung und Länge der Anker.

In Versuchen mit zusammengesetzten Stützsystemen aus Ankern und Steifen konnte bei der Erddruckverteilung sowie bei der Größe der Anker- und Steifenkräfte eine Übereinstimmung in Modell und Rechnung erzielt werden.

Ebenso stimmen auch die Verformung der Wand und des Bodens im Versuch qualitativ gut mit der Rechnung überein.

Aus den Versuchsergebnissen wurde ein Berechnungsvorschlag für die mehrfach verankerte Wand abgeleitet.

Literaturverzeichnis

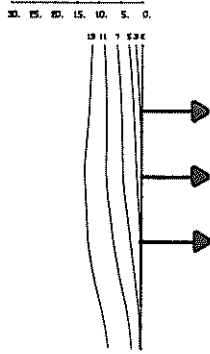
- 1 Abouleid, Abdel-fattah Beitrag zur Berechnung einer in lockeren Sand geramnten, zweifach verankerten Spundwand. Mitteilungen, Institut für Wasserwirtschaft, Grundbau und Wasserbau, 1963, TH Stuttgart, Heft 1
- 2 Arthur, J. R. F. und Roscoe, K. H. An Examination of the Edge Effects in Plane-Strain Model Earth Pressure Tests. Proc. 6th Int. Conf. SMFE, 1965, Montreal, Vol. 2, pp. 363 - 367
- 3 Breth, H. und Stroh, D. Das Tragverhalten von Injektionsankern im Ton. Vortrag Baugrundtagung Düsseldorf, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V., Essen, 1970, S. 57 - 82
- 4 Breth, H. und Romberg, W. Messungen an einer verankerten Wand. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau der TH Darmstadt, 1973, Heft 12
- 5 Breth, H. /Wanoschek, H. R. Steifenkraftmessungen in einer durch Pfahlwände gesicherten Tiefbahnbau-grube im Frankfurter Ton. Der Bauingenieur, 1969, S. 240 - 243
- 6 Brinch Hansen, J. und Lundgren, H. Hauptprpbleme der Bodenmechanik. Springer Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960
- 7 Briske, R. /Pirlet, E. Messungen über die Beanspruchung des Baugrubenverbaus der Kölner U-Bahn. Die Bautechnik 1968, S. 290 - 299
- 8 Czapla, H. Berechnung eines Modellversuchs nach der Finite-Element Methode. Diplom-Arbeit am Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau TH Darmstadt, 1973
- 9 Egger, P. Influence of wall stiffness and anchor presting on earth pressure distribution. Proc. of the fifth European Conference on Soil Mechanics and foundation engineering. Madrid 1972, S. 259 - 264

- 10 Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Herausgegeben vom Arbeitsausschuß "Ufereinfassungen der Hafenbautechnischen Gesellschaft e. V. und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V.", Verlag Wilhelm Ernst und Sohn, 1970
- 11 Franke, L. Ruhedruck in kohäsionslosen Böden im ebenen Fall. Die Bautechnik 44 (1967), Heft 2, S. 42 - 47
- 12 Heeb/Bonz/Schurr/Henke/Müller Erddruckmessungen am Baugrubenverbau für Stuttgarter Verkehrsbauwerke. Die Bautechnik 1966, S. 208 dazu: Versuchsbericht der Messungen in der Planie
- 13 Hanna, T. H., Matallana, G. A. The behavior of tied-back retaining walls. Canadian Geotechnical Journal, 7, 372, 1970
- 14 Jelinek, R. / Ostermayer, H. Zur Berechnung von Fangedämmen und verankerten Stützwänden. Die Bautechnik, 1967, Heft 5 und 6
- 15 Klenner, C. Versuche über die Verteilung des Erddruckes über die Wände ausgesteifter Baugruben. Die Bautechnik 1941, S. 316 - 319
- 16 Kötter, F. Die Bestimmung des Drucks an gekrümmten Gleitflächen, eine Aufgabe aus der Lehre von Erddruck. Setzungsbericht der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1903
- 17 Kranz, E. Über die Verankerung von Spundwänden. Mitteilungen aus dem Gebiet des Wasserbaus und der Baugrundforschung, H. 11, Berlin 1940
- 18 Lazebnik, G. E. und Cernyseva, E. I. Untersuchung der Erddruckverteilung in einem Modell mit einfach verankerten biegsamen Wänden. Osnovanija fundamenty i mehanika gruntov 1966, Heft 2, S. 3 - 5

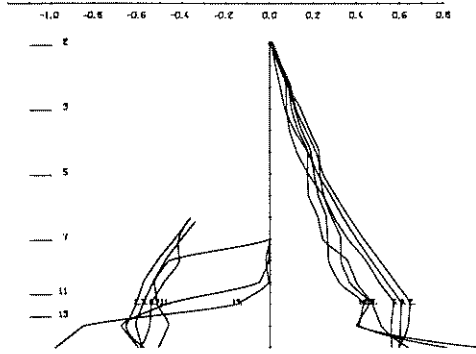
- 19 Lazebnik, G.E. und Cernyseva, E.I. Certain Errors in Experimental Determination of Earth Pressure on Models of Retaining Walls. (Translated from "Gidrotekhnicheskoe Stroitel stvo" , No. 4, pp. 39 - 43, April 1968, TIB Hannover)
- 20 Lehmann, H. Die Verteilung des Erdangriffs an einer oben drehbar gelagerten Wand. Ein Beitrag zur Berechnung von Baugrubenaussteifungen. Die Bautechnik Heft 31/32, (1942), S. 273 - 283
- 21 Loos, W. /Breth, H. Modellversuche über Biegebeanspruchung von Pfählen und Spundwänden. Die Bautechnik 1949, S. 264
- 22 Mecke, W. Der Erdangriff an einer im unteren Teil nachgiebigen Wand. Diss. TH Hannover, 1939
- 23 Nendza, H. Über die Größe der Vertikalkräfte in einer verankerten Trägerbohlwand . Vortrag Baugrundtagung Stuttgart. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. ,Essen, S. 825 - 875
- 24 Oberti, G. Die Theorie der Modelle unter besonderem Hinweis auf Probleme der Geomechanik. Abhandlungen der deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Jahrgang 1961, Nr.1 . Klasse für Bergbau, Hüttenwesen und Montangeologie. Bericht über das 1. Ländertreffen des internationalen Büros für Gebirgsmechanik, Leipzig, 3. - 7. November 1959
- 25 Petersen / Schmitt Untersuchungen über die Standsicherheit verankerter Baugrubenwände an Beispielen des Hamburger Schnellbahntunnelbaus. Straße Brücke Tunnel,(1971), Heft 9, S. 225
- 26 Plant, G.W. Anchor inclination - its effect on the performance of a laboratory scale tied-back retaining wall. University of Sheffield, 1972

- 36 Spilker, A. Mitteilung über die Messung der Kräfte in einer Baugrubenaussteifung. Die Bautechnik 1937, Heft 1, S. 16 - 18, Disk. S. 150 - 151
- 37 Wanoschek, R. Der Einfluß von Fundamentlasten auf die Größe und Verteilung des Erddrucks auf biegsame, abgesteifte Baugrubenwände. Diss., Institut für Bodenmechanik und Grundbau, TH Darmstadt, 1971
- 38 Weissenbach, A. Berechnung von mehrfach gestützten Baugrubenwänden und Trägerbohlwänden nach dem Traglastverfahren. Straße Brücke Tunnel 21 (1969), Heft 1, S. 17 - 23, Heft 2, S. 38 - 42, Heft 3, S. 67 - 74 und Heft 5, S. 130 - 136
- 39 Weissenbach, A. Baugrubensicherung, Ergänzungsband zum Grundbau Taschenbuch Band I, S. 355 - 470. Berlin/München/Düsseldorf 1971. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn
- 40 Weissenbach, A. Baugrubensicherung. Berechnung und Konstruktion von Baugrubenumschließungen. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Hannover, Heft 3, 1973
- 41 Werner, H. U. Die Tragkraft langzylindrischer Erdanker zur Verankerung von Stützwänden unter besonderer Berücksichtigung der Lagerungsdichte kohäsionsloser Böden. Diss. 1971
- 42 Wiegmann, D. Der Erddruck auf verankerte Stahlspundwände, festgestellt auf Grund von Verformungsmessungen am Bauwerk. Diss., TH Hannover 1953
- 43 Wolff, R. Ermittlung des Erddrucks auf eine mehrfach verankerte Baugrubenwand durch Modellversuche. Meßtechnische Briefe von Hottinger Baldwin 9 (1973), Heft 3, S. 45

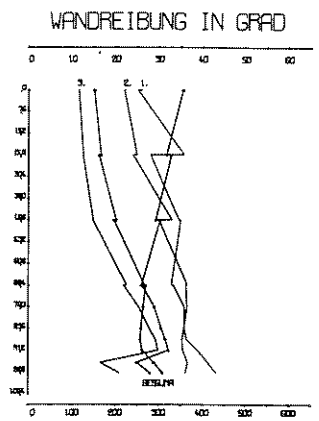
ANHANG



WANDBEWEGUNG IN MM



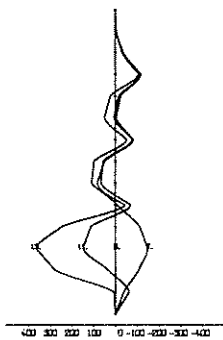
ERDDRUCKVERTEILUNG IN MP/Mx2



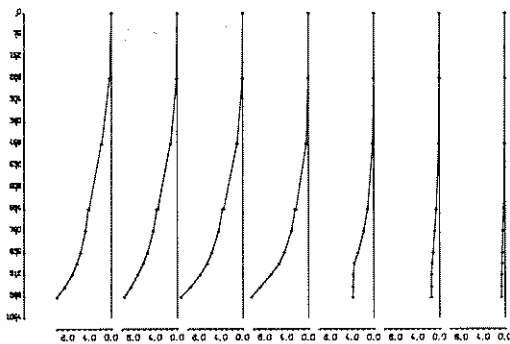
GESAMTERDDRUCK IN KP/M



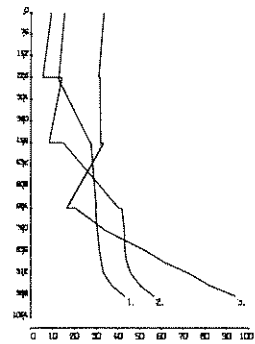
SETZUNGEN IN MM



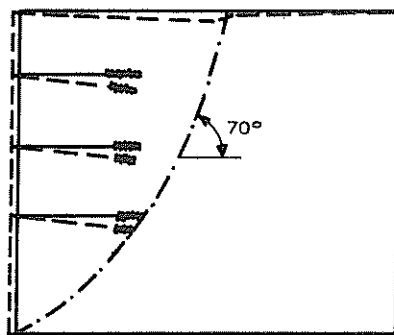
BIEGEMOMENTE IN KP CM/M



VERSCHIEBUNG DER HORIZONTALPEGEL IN MM



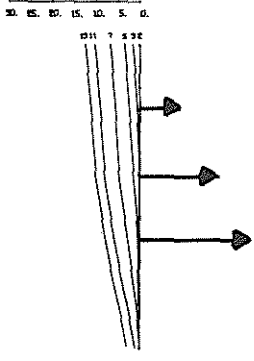
ANKERKRAEFTE IN KP/M



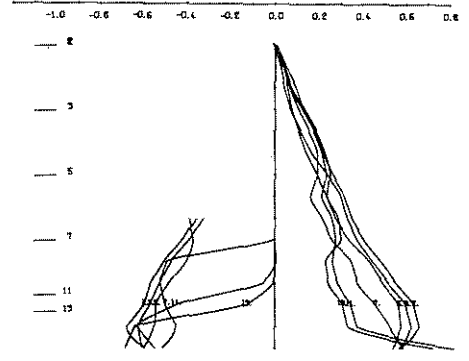
--- verformter Erdkörper
 - - - - - Gleitflächen

VERSUCH NR. 14

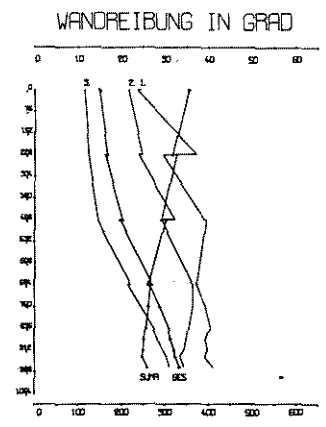
Ankerlänge 39,5 cm



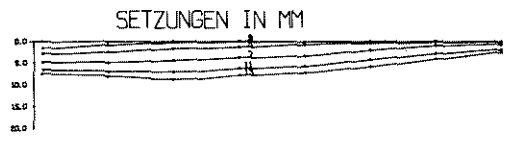
WANDBEWEGUNG IN MM



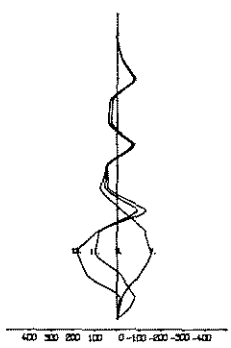
ERDRUCKVERTEILUNG IN MP/M x 2



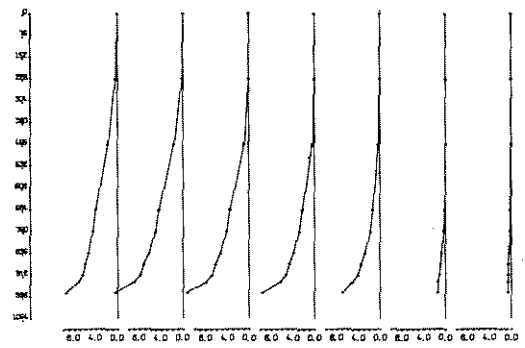
GESAMTERDRUCK IN KP/M



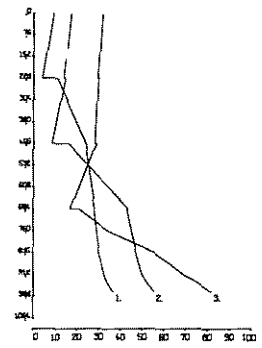
SETZUNGEN IN MM



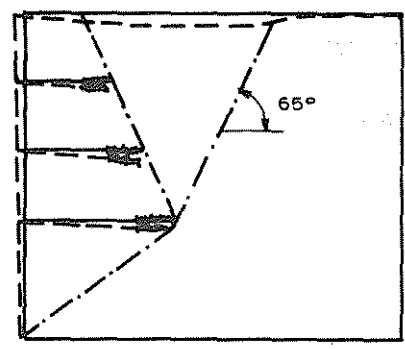
BIEGEMOMENTE IN KP CM/M



VERSCHIEBUNG DER HORIZONTALPEGEL IN MM

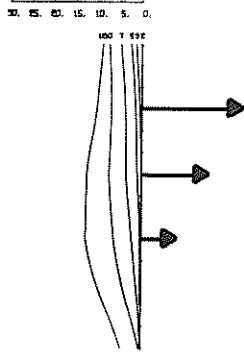


ANKERKRAEFTE IN KP/M

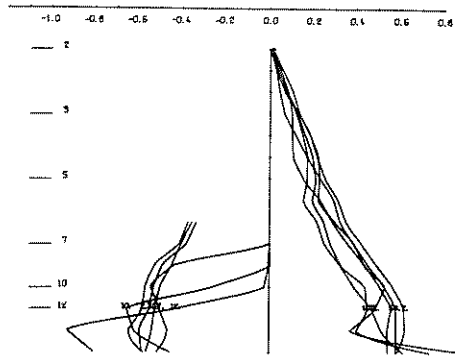


--- verformter Erdkörper
 - - - Gleitflächen

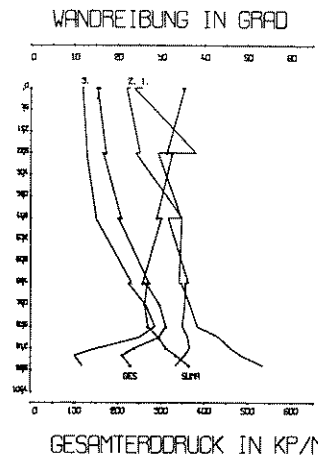
VERSUCH NR. 15



WANDBEWEGUNG IN MM



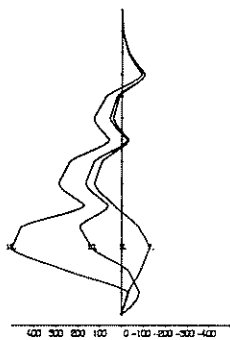
ERDRUCKVERTEILUNG IN MP/Mx2



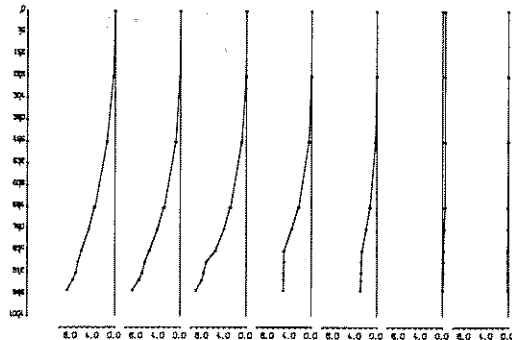
GESAMTERDRUCK IN KP/M



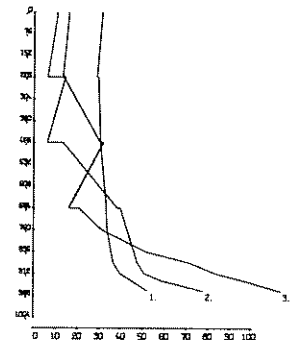
SETZUNGEN IN MM



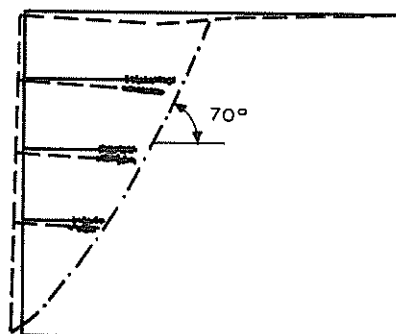
BIEGEMOMENTE IN KP CM/M



VERSchiebung DER HORIZONTALPEGEL IN MM

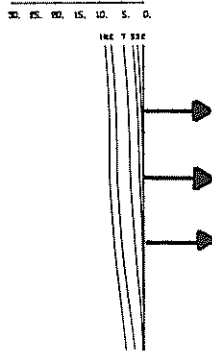


ANKERKRAEFTE IN KP/M

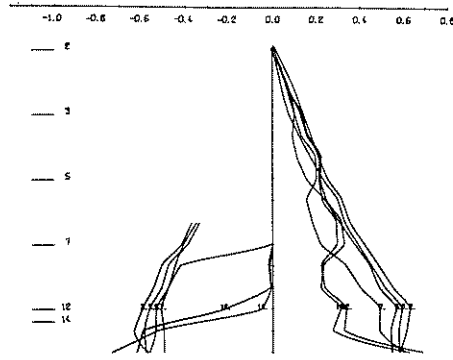


- verformter Erdkörper
- · - - Gleitflächen

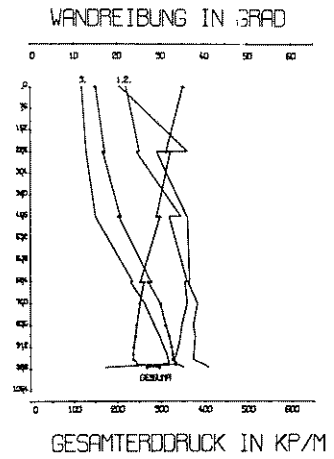
VERSUCH NR. 16



WANDBEWEGUNG IN MM



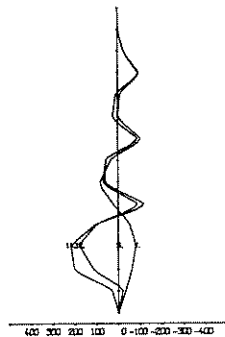
ERDRUCKVERTEILUNG IN MP/Mx2



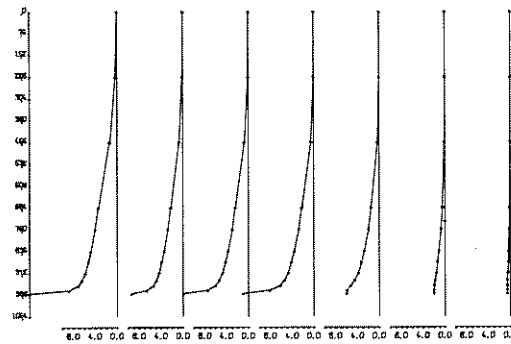
GESAMTERDRUCK IN KP/M



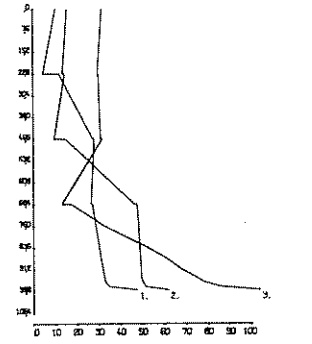
SETZUNGEN IN MM



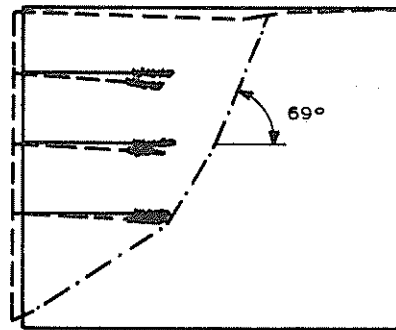
BIEGEMOMENTE IN KP CM/M



VERSCHIEBUNG DER HORIZONTALPEGEL IN MM



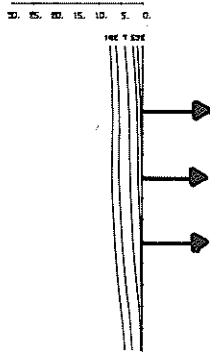
ANKERKRAEFTE IN KP/M



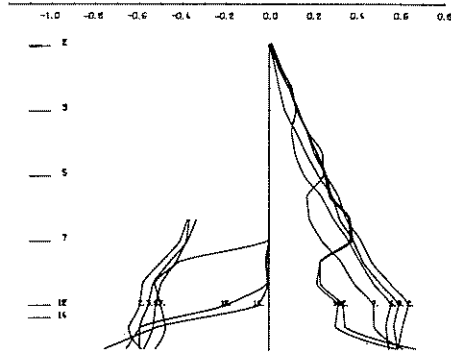
--- verformter Erdkörper
 - - - - - Gleitflächen

VERSUCH NR. 17

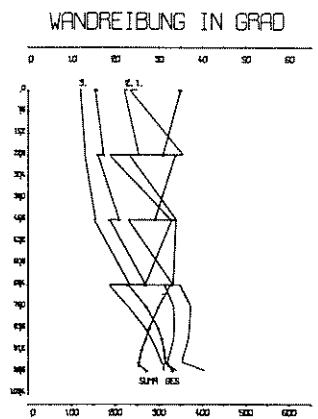
Vorspannung der Anker 20%



WANDBEWEGUNG IN MM



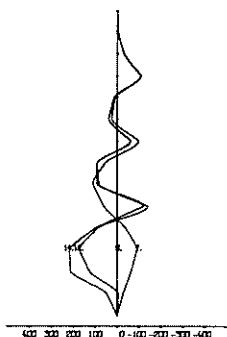
ERDRUCKVERTEILUNG IN MP/M \times 2



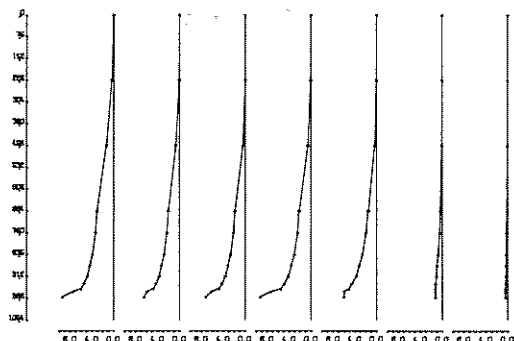
GESAMTERDRUCK IN KP/M



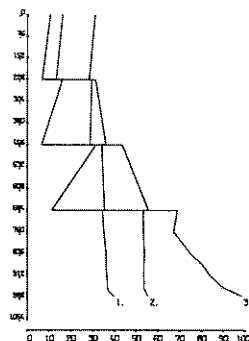
SETZUNGEN IN MM



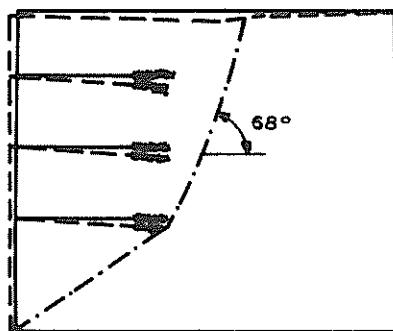
BIEGEMOMENTE IN KP CM/M



VERSCHIEBUNG DER HORIZONTALPEGEL IN MM

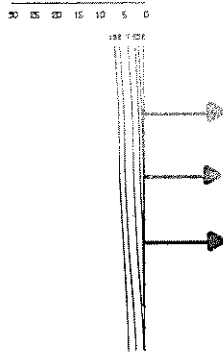


ANKERKRAEFTE IN KP/M

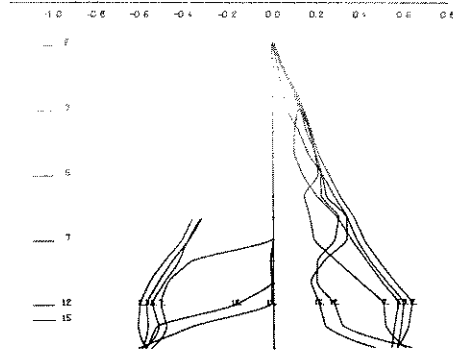


--- verformter Erdkörper
 - - - Gleitflächen

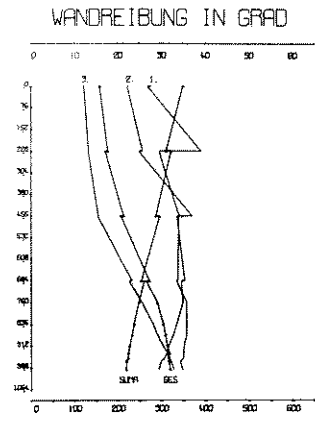
VERSUCH NR. 19
 Vorspannung der Anker 80 %



WANDBEWEGUNG IN MM



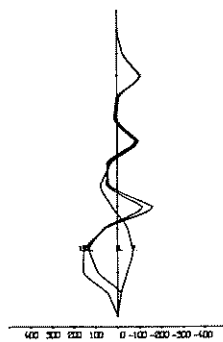
ERDDRUCKVERTEILUNG IN MP/M \times 2



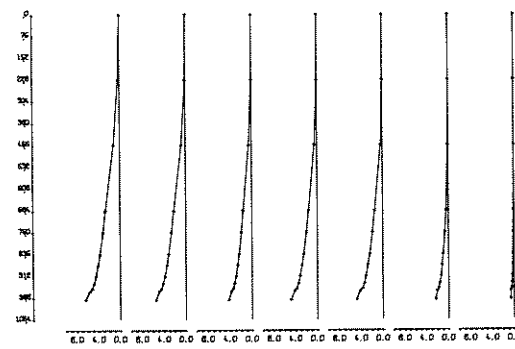
GESAMTERDDRUCK IN KP/M



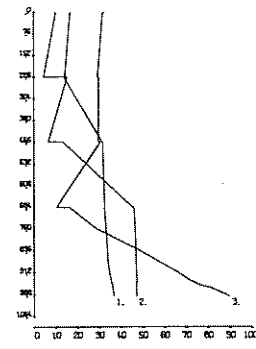
SETZUNGEN IN MM



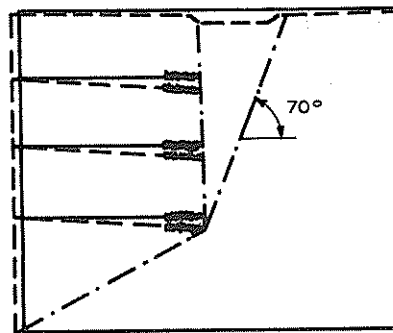
BIEGEMOMENTE IN KP CM/M



VERSCHIEBUNG DER HORIZONTALPEGEL IN MM



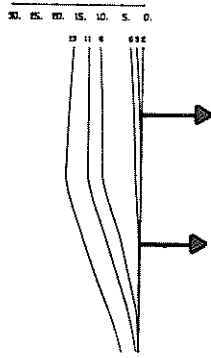
ANKERKRAEFTE IN KP/M



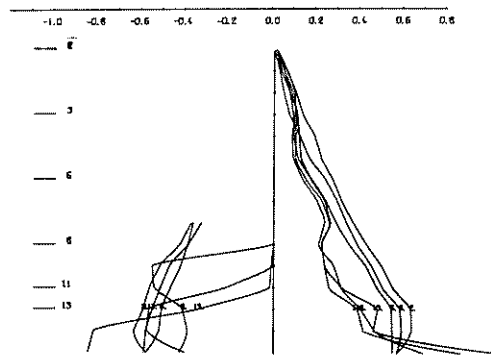
--- verformter Erdkörper
 - - - - - Gleitflächen

VERSUCH NR. 20

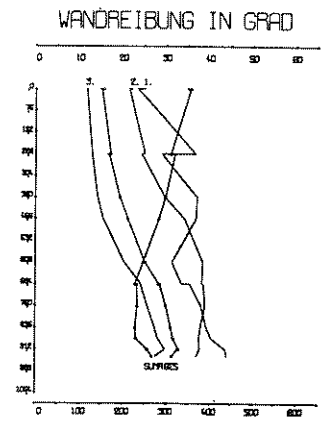
Ankerlänge 59,5 cm



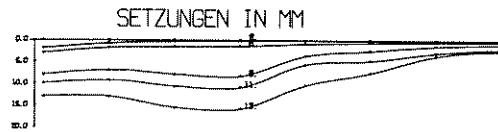
WANDBEWEGUNG IN MM



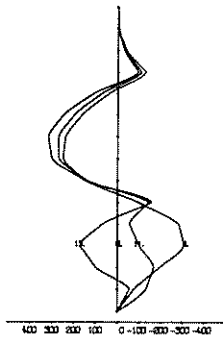
ERDRUCKVERTEILUNG IN MP/Mx2.



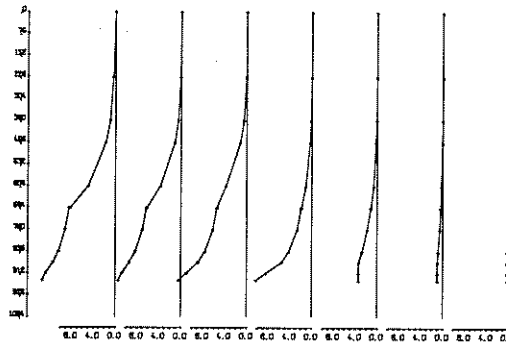
GESAMTERDRUCK IN KP/M



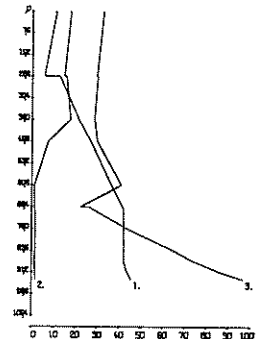
SETZUNGEN IN MM



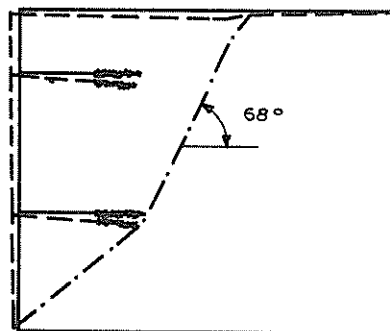
BIEGEMOMENTE IN KP CM/M



VERSCHIEBUNG DER HORIZONTALPEGEL IN MM

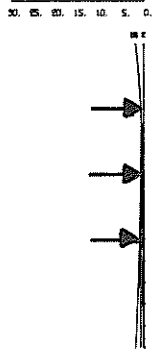


ANKERKRAEFTE IN KP/M

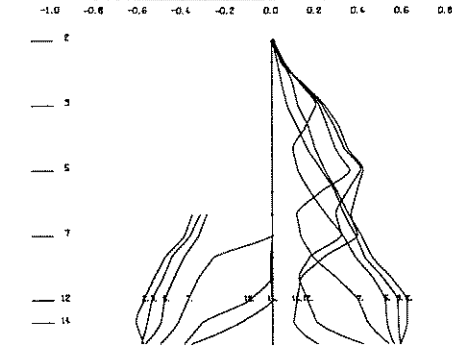


--- verformter Erdkörper
 -.-.-.-.- Gleitflächen

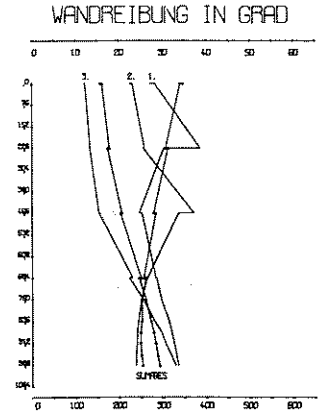
VERSUCH NR. 22



WANDBEWEGUNG IN MM



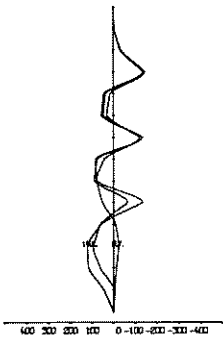
ERODRUCKVERTEILUNG IN MP/Mx2



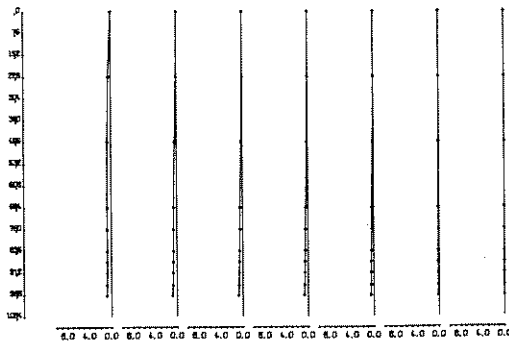
GESAMTERODRUCK IN KP/M



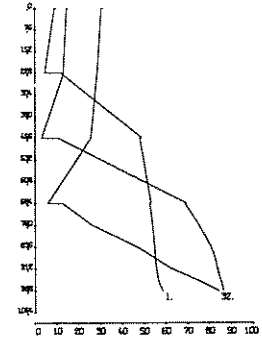
SETZUNGEN IN MM



BIEGEMOMENTE IN KP CM/M

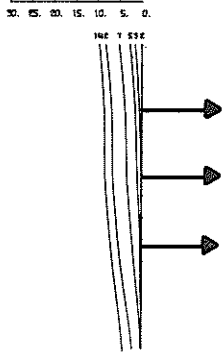


VERSCHIEBUNG DER HORIZONTALPEGEL IN MM

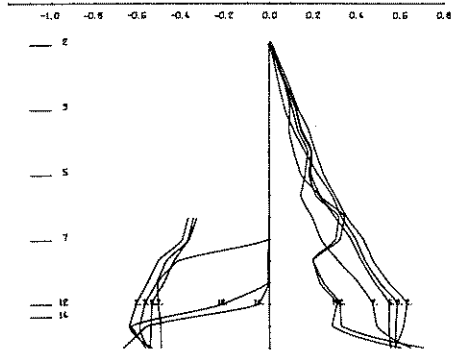


ANKERKRAEFTE IN KP/M

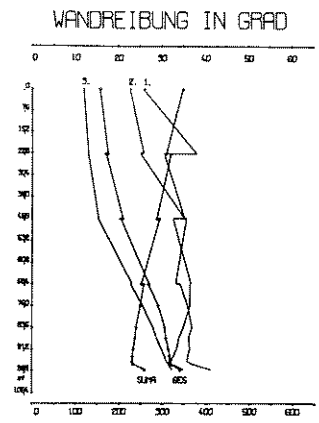
VERSUCH NR. 23



WANDBEWEGUNG IN MM



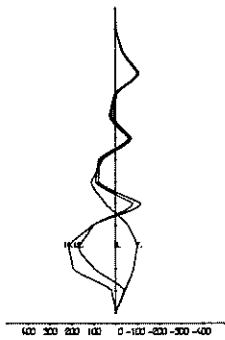
ERDRUCKVERTEILUNG IN MP/Mx2



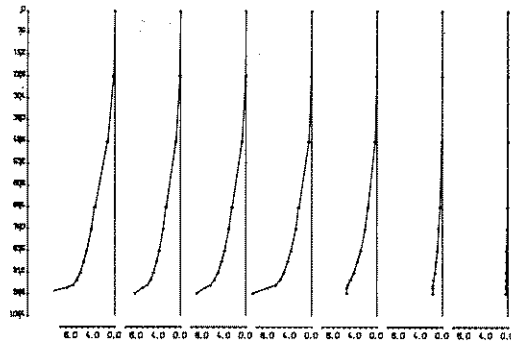
GESAMTERDRUCK IN KP/M



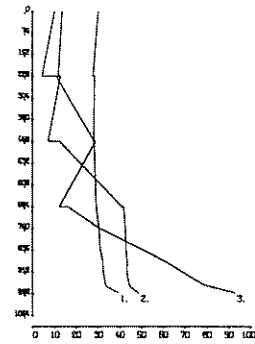
SETZUNGEN IN MM



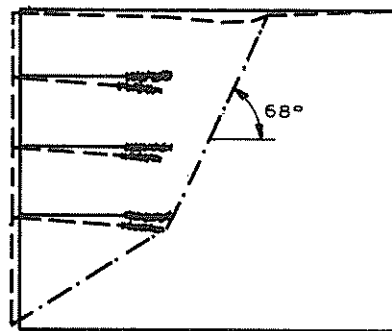
BIEGEMOMENTE IN KP CM/M



VERSCHIEBUNG DER HORIZONTALPEGEL IN MM

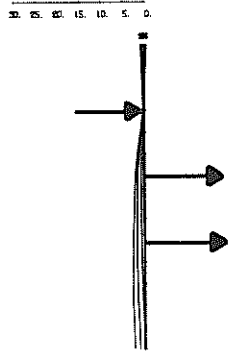


ANKERKRAEFTE IN KP/M

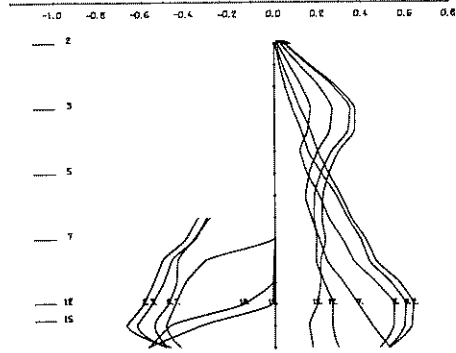


- verformter Erdkörper
- · - - - Gleitflächen

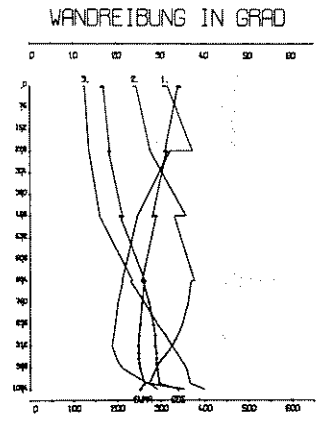
VERSUCH NR. 25
Wiederholungsversuch von Nr. 17



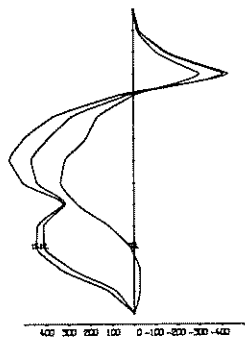
WANDBEWEGUNG IN MM



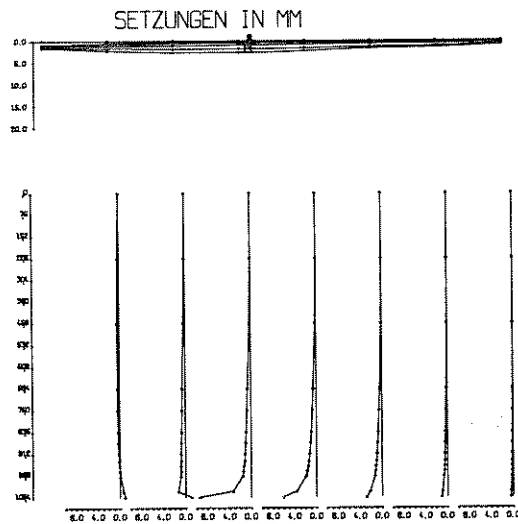
ERDRUCKVERTEILUNG IN MP/M \times 2



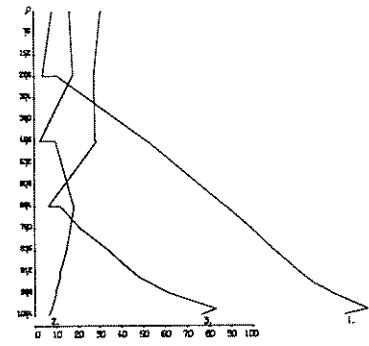
GESAMTERDRUCK IN KP/M



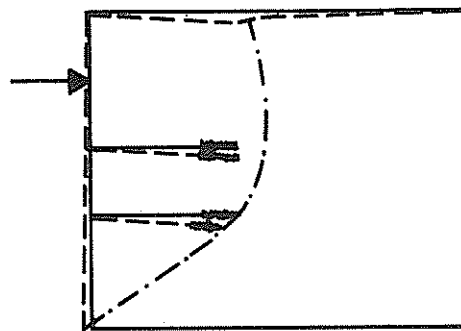
BIEGEMOMENTE IN KP CM/M



VERSCHIEBUNG DER HORIZONTALPEGEL IN MM

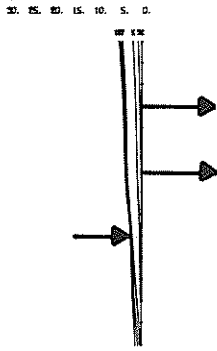


ANKERKRAEFTE IN KP/M

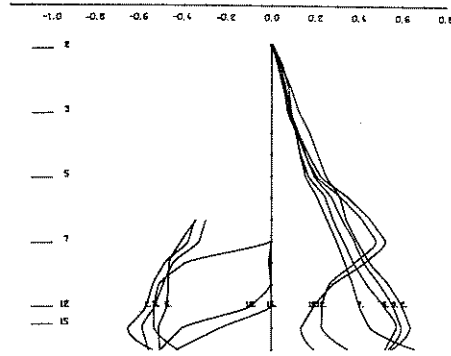


--- verformter Erdkörper
 — Gleitflächen

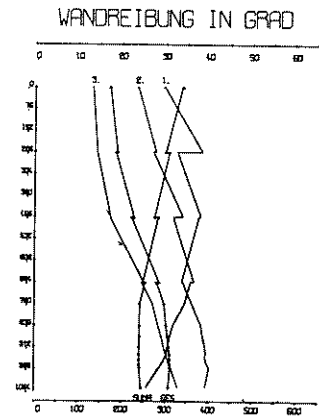
VERSUCH NR. 43



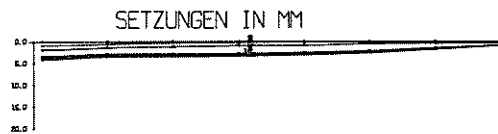
WANDBEWEGUNG IN MM



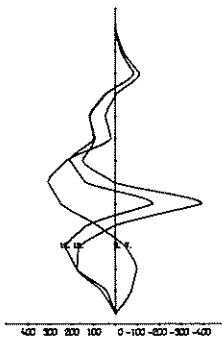
ERDRUCKVERTEILUNG IN MP/Mx2



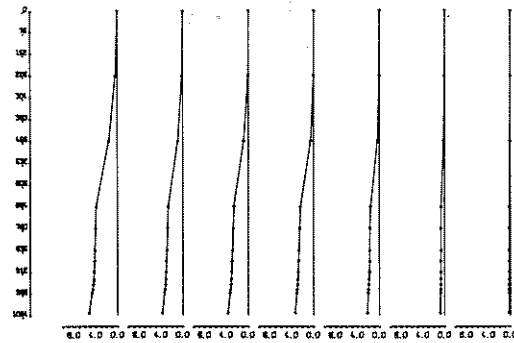
GESAMTERDRUCK IN KP/M



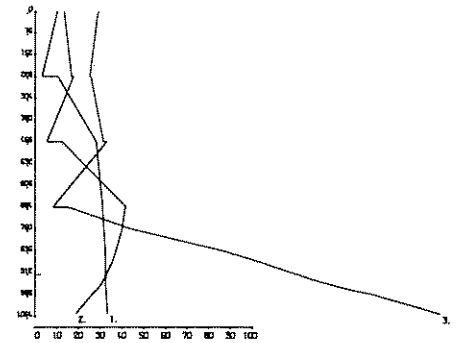
SETZUNGEN IN MM



BIEGEMOMENTE IN KP CM/M



VERSCHIEBUNG DER HORIZONTALPEGEL IN MM



ANKERKRAEFTE IN KP/M

VERSUCH NR.49

Mitteilungen der Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau
der Technischen Hochschule Darmstadt

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. H. Breth

- Nr. 1 Beitrag zur Berechnung von Gründungsbalken und einseitig ausgesteiften
Gründungsplatten unter Einbeziehung der Steifigkeit von rahmenartigen
Hochbauten
Dr.-Ing. H. Sommer, Februar 1965
- Nr. 2 Aktuelle Probleme im Staudambau
Veröffentlichungen in den Jahren 1966 und 1967
- Nr. 3 Über den Einfluß eines dünnwandigen, im Boden verlegten Rohres auf
das Tragverhalten des Bodens
Dr.-Ing. K. H. Schwinn, Januar 1968
- Nr. 4 Das Tragverhalten des Frankfurter Tons bei im Tiefbau auftretenden Bean-
spruchungen
Prof. Dr.-Ing. H. Breth, Dipl.-Ing. E. Schultz Dipl.-Ing. D. Stroh, April 1970
- Nr. 5 Zur Frage der Erosionssicherheit unterströmter Erdstaudämme
Dr.-Ing. K. Günther, Juni 1970
- Nr. 6 Ermittlung der rheologischen Zustandsgleichung eines Lehmes mit Hilfe
einer neuentwickelten Versuchsanlage
Dr.-Ing. D. Fedder, Dezember 1970
- Nr. 7 Beiträge in den Jahren 1968 - 1970
- Nr. 8 Der Einfluß der Steifigkeit von Stahlbetonskelettbauten auf die Verformung
und die Beanspruchung von Gründungsplatten auf Ton
Dr.-Ing. H. Heil Juni 1971
- Nr. 9 Der Einfluß von Fundamentlasten auf die Größe und Verteilung des Erd-
drucks auf biegsame, abgesteifte Baugrubenwände
Dr.-Ing. H. R. Wanoschek, März 1972
- Nr. 10 Das Verformungsverhalten des Frankfurter Tons beim Tunnelvortrieb
Dipl.-Ing. G. Chambosse, Februar 1972
- Nr. 11 Beiträge in den Jahren 1972-1973
- Nr. 12 Messungen an einer verankerten Baugrubenwand
Dipl.-Ing. W. Romberg, Dezember 1973
- Nr. 13 Berechnung verankerter Baugruben nach der Finite Element Methode
Dr.-Ing. D. Stroh, Juni 1974
- Nr. 14 Ein Beitrag zur Klärung des Tragverhaltens einfach verankerter Baugru-
benwände
Dr.-Ing. Gert-Peter Schmitt, Juli 1974

- Nr. 15 Verformungsverhalten des Baugrundes beim Baugrubenaushub und anschließendem Hochhausbau am Beispiel des Frankfurter Tons
Dr.-Ing. P. Amann, Prof. Dr.-Ing. H. Breth, Dr.-Ing. D. Stroh, Juni 1975
- Nr. 16 Ermittlung des Tragverhaltens einer mehrfach verankerten Baugrubenwand durch Modellversuche
Dr.-Ing. Reinhard Wolff, Juni 1975

WA

BIEGEN