

Firma
Karl Maier GmbH (MaSys)
Am Leitzelbach 2
74889 Sinsheim



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen
Paul-Bonatz-Straße 9-11
57076 Siegen
Telefon: +49 271 740-3471
Telefax: +49 271 740-2722
E-Mail: joerg.wieland@uni-siegen.de
Web: www.fwu.uni-siegen.de

Siegen, 18.04.2019

Versuchs-/Prüfbericht zum Test des mobilen Hochwasserschutzsystems „HOWA KIT“ für die Stütz- bzw. Öffnungsweiten $b_1 = 150$ cm und $b_2 = 200$ cm (bis zu einer Stauhöhe von maximal $h = 1,0$ m)

Inhalt	Seite
1 Aufgabenstellung	1
2 Testgebäude auf dem Freigelände des fwu an der Universität Siegen	1
3 Montage des Systems und Messaufbau	3
4 Versuchsdurchführung und –auswertung	4
4.1 Versuch mit Stützweite $b_1 = 150$ cm	4
4.2 Versuch mit Stützweite $L_2 = 200$ cm	6
5 Statische Betrachtung	8
Anhang 1: HOWA KIT Aufbauanleitung	13

1 Aufgabenstellung

Die Firma MaSysd (Am Leitzelbach 2 · D-74889 Sinsheim · www.maier-systeme.de) bietet das temporäre Hochwasserschutzsystem „HOWA KIT“ für den Objektschutz (z.B. Tore, Türen und Fenster) an. Dieses System kann im Bedarfsfall binnen weniger Minuten aufgebaut werden. Die Schutzwände bestehen aus einzelnen Aluminium-Lamellen mit je 20 cm Höhe, die mit Nut-und Federsystem zu einem Dammbalken zusammengesteckt werden (siehe auch Anhang 1: Aufbauanleitung). Erreicht werden soll eine Schutzhöhe (Stauhöhe) von $h = 1,0$ m bei einer Stützweite (Öffnungsweite) von $b = 200$ cm. Größere Stützweiten können ggf. mit den Ergebnissen der Versuche – durch die Anordnung zusätzlicher Rückabstützungen - realisiert werden. Das System wurde am 10.04.2019 am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) hinsichtlich statischer Belastbarkeit („Verformung“) und Dichtheit getestet.

2 Testgebäude auf dem Freigelände des fwu an der Universität Siegen

Auf dem Außengelände des fwu steht für Hochwasserschutz-Versuche ein eigenständiges kleines Versuchsgebäude aus Stahlbeton zur Verfügung (siehe Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2).

Das dargestellte Versuchsgebäude ermöglicht den Test von Objektschutz-Systemen unter naturähnlichen Bedingungen. Bei der Betrachtung sind folgende „umgekehrte“ Verhältnisse zu berücksichtigen: Da für die Hochwasser-Versuche nicht das gesamte Universitäts-Gelände überflutet werden kann, wird das zu untersuchende Hochwasserschutzsystem – auf der verkehrten Seite - innen im Gebäude angebracht. Anschließend kann das Gebäude, mit Wasser aus dem geschlossenen Laborkreislauf, bis zur gewünschten Höhe „geflutet“ werden, eventuell austretende Leckage-Wassermengen werden in einer Rinne vor dem Gebäude gesammelt und fließen in einen Rücklauf- bzw. Messbehälter. Das Schema der Versuchsanordnung ist in Abbildung 2.3 dargestellt.



Abbildung 2.1: Versuchsgebäude für Test und Optimierung von mobilen Hochwasserschutzsystemen für den Objektschutz (mit der eingebauten Schutzwand $b_2 = 200$ cm; $h = 1,0$ m)

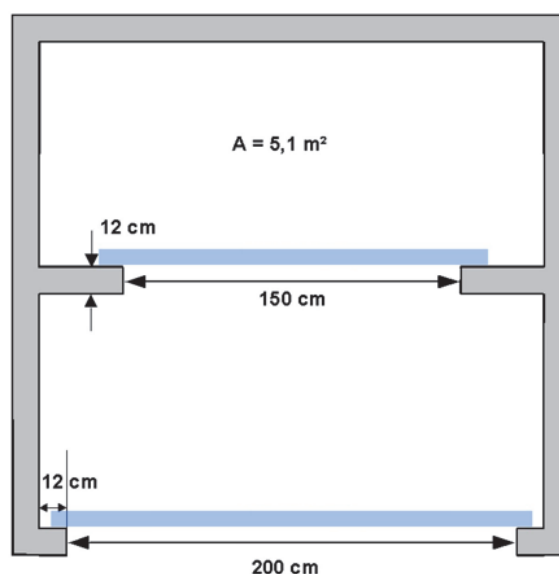


Abbildung 2.2: Grundriss des Versuchsgebäudes mit Öffnungsweiten $a = 150$ cm und $b = 200$ cm

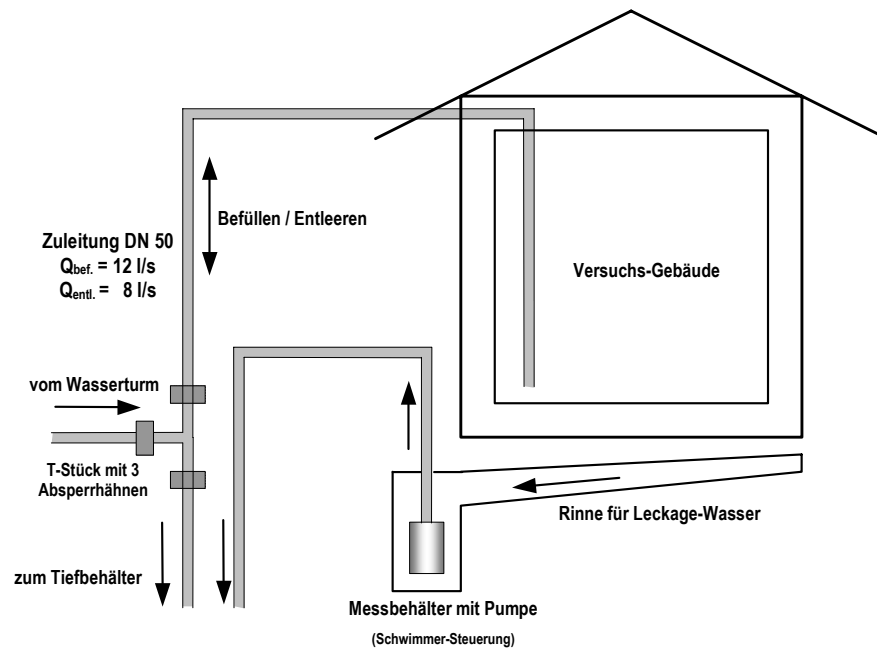


Abbildung 2.3: Querschnitt-Schema des Wasserkreislaufs der Versuchsanordnung

3 Montage des Systems und Messaufbau

Am Tag vor der Belastungsprüfung wurden die U-Schienen (Wandleisten) entsprechend der Aufbauanleitung sorgfältig links und rechts neben den Öffnungen mittels einer handelsüblichen Schrauben/Kunststoffdübel-Kombination verschraubt. Zusätzlich wurde der Wandanschluss durch eine Fugen-Silikonmasse versiegelt. Die Bodenbeschaffenheit im Bereich der größeren 200cm-Stützweite kann mit „glasierte Fliesen mit 5 mm Fugen“ angegeben werden. Im Bereich der kurzen Stützweite ist „eine rohe Betonoberfläche mit mehrfachem Fussbodenfarbe-Anstrich“ vorhanden (siehe Abbildung 3.1).

Die Abweichung von einer ideal glatten Oberfläche wurden in beiden Fällen mit weniger als 3,0 mm/m gemessen.



Abbildung 3.1: Lage der Tragschienen bzw. Bodenbeschaffenheit im Versuchsgebäude

Die Messung der horizontalen Verformung des Hochwasserschutzsystems durch den Wasserdruck wurde mittels Laser-Entfernungsmessung (Tachymetertyp SOKKIA SET530RK) durchgeführt. Das Tachymeter steht dabei im Abstand von etwa 6 Metern mittig vor dem Testaufbau. Um jeweils die gleichen Messpunkte abzutasten, wurden die Aluminium Profile jeweils mittig mit Zielmarken beklebt (siehe Abbildung 3.2).



Abbildung 3.2: Messung der horizontalen Durchbiegung des HWS-Systems mittels Laser- Tachymeter

Der unbelastete Zustand wurde vor Versuchsbeginn als Referenzabstand („Nullmessung“) gemessen. Alle Durchbiegungen ergeben sich dementsprechend als Differenzwert zur Nullmessung. Um die Genauigkeit zu erhöhen wurde der „fine-average“ Messmodus des Tachymeters gewählt, bei diesem wird die durchschnittliche Entfernung als Mittelwert aus 10 Einzelmessungen gemittelt. Damit wird eine Genauigkeit der Messung von $\pm 0,6$ mm bei einer Anzeigeauflösung in 0,1 mm-Schritten erreicht.

4 Versuchsdurchführung und –auswertung

4.1 Versuch mit Stützweite $b_1 = 150$ cm

Zunächst wurde das System mit 150 cm Stützweite getestet. Nach der Nullmessung wurde das Testgebäude in drei Schritten (0,51 m, 0,75 m und 1,00 m Stauhöhe) gefüllt. Nach jeder Teilfüllung wurde die Durchbiegung der fünf Aluminium-Profile vermessen.

Für die Stauhöhe $h_3 = 1,0$ m wurde die Leckage-Wassermenge mittels Eimer im Messbehälter zweimal über eine Zeit von etwa 10 Minuten ermittelt. Die erste Messung ergab eine Undichtigkeit $V_1 = 3,2$ Liter in 930 Sekunden ($q_{1,150} = 0,14$ l/(Minute·m) bei 1,0 m Stauhöhe). Da das Wasser im Laborkreislauf – im Gegensatz zum realen Hochwasser - nahezu keine Sedimente bzw. Trübstoffe aufweist, wurde wasserseitig direkt hinter der Stauwand eine geringe Menge eines feingestuftes Sandes (Körnung 0 bis 2 mm „Rheinsand“) eingestreut. Die Sandkörner verstopfen, angetrieben durch die Strömung bzw. den Wasserdruck, nahezu augenblicklich verbleibende undichte Stellen zwischen der Bodendichtung und

dem Untergrund (sog. „Selbstdichtungseffekt“ bei sedimentbelastetem Wasser). Hierdurch wird die messbare Undichtigkeit stark reduziert.



Abbildung 4.1: Das System mit 150 cm Stützweite unter voller Belastung ($h_3 = 1,0$ m)

Bei einer zweiten Messung der Undichtigkeit wurden daher nur noch $V_2 = 0,74$ Liter in 630 Sekunden ($q_{2,150} = 0,04$ L/(Minute·m) bei 1,0 m Stauhöhe) gemessen (Maßeinheit: Liter pro Minute und Meter Systemlänge bei 1 m Stauhöhe). Es kann daher davon ausgegangen werden, dass evtl. vorhandene kleine Undichtigkeiten des HOWA KIT-Systems bei realem Hochwasser (d.h. mit hohem Sediment- bzw. Trübstoffgehalt) durch den Selbstdichtungseffekt im Laufe der Staudauer sehr schnell weniger werden und erfahrungsgemäß nach einiger Zeit komplett verschwinden.

Die Auswertung der Verformungsmessung ist in Tabelle 4.1 und Abbildung 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.1: Messwerte des Verformungswegs s in Abhängigkeit der Stauhöhe h ($b = 150$ cm)

Stauhöhe	$h = 0,51$ m	$h = 0,75$ m	$h = 1,00$ m
Messpunkthöhe mm	s (mm)	s (mm)	s (mm)
919	0,3	2,6	7,1
720	1,1	3,1	8,0
513	1,6	5,1	10,3
324	4,1	8,4	14,6
131	4,3	10,1	16,4

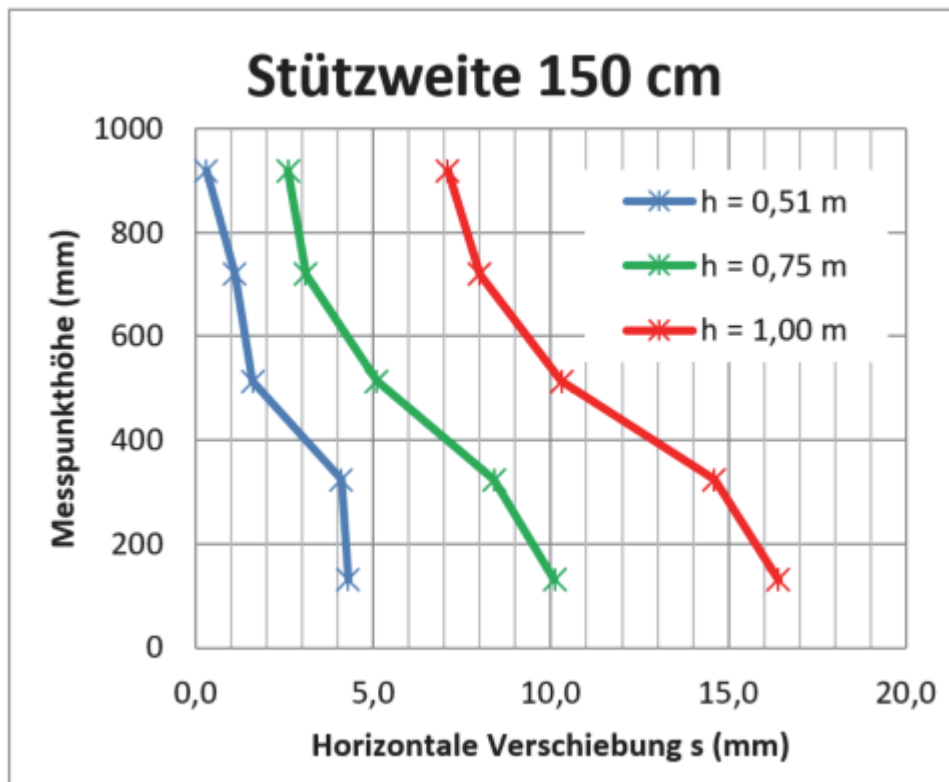


Abbildung 4.2: Grafische Darstellung der Verformungswege in Feldmitte (b = 150 cm Stützweite)

Aus Abbildung 4.2 wird ersichtlich, dass sich die Durchbiegung nicht linear über die Stauhöhe verteilt. Hierfür gibt es drei Gründe:

1. Die Profile sind in horizontaler Richtung über das Nut- und Federsystem formschlüssig miteinander verbunden. D.h. es werden auch Lasten von Profilen aufgenommen die noch nicht vom Wasser belastet sind
2. Die Wanddichtung aus EPDM-Schaumstoff (unbelastet ca. 5 mm dick) wird durch den größer werdenden Wasserdruck zusammengepresst, so dass sich das gesamte Schutzsystem geringfügig in Richtung der Luftseite verschiebt.
3. Die Reibung zwischen der Fußdichtung und dem Untergrund verhindert eine vollständig elastische Verformung des untersten Profils. Ein Teil der Lastabtragung des untersten Profils erfolgt dementsprechend über Reibungskräfte direkt in den Untergrund.

Nach Versuchsende wurde das Wasser abgelassen und erneut eine Nullmessung der Profilverformung durchgeführt. Dabei konnte keine bleibende Verformung der Aluminium-Profile gemessen werden. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass die Biegezugspannung im Aluminium-Querschnitt unter voller Wasserdruckbelastung noch im vollelastischen Bereich unterhalb der Streckgrenze liegt. Siehe hierzu auch Abschnitt 5 Statische Betrachtung.

4.2 Versuch mit Stützweite $L_2 = 200$ cm

Die Versuchsdurchführung erfolgte mit dem gleichen Ablauf wie unter Abschnitt 4.1 beschrieben.

Das 200 cm breite System wurde ebenfalls in drei Schritten (0,50 m, 0,75 m und 100 cm) belastet. Die gemessene Undichtigkeit beim 200 cm breiten System lag hier bei 3,05 Liter in 615 Sekunden ($q_{1,200} = 0,15 \text{ L}/(\text{Minute} \cdot \text{m})$ bei 1,0 m Stauhöhe).



Abbildung 4.3: Das System mit 200 cm Stützweite unter voller Belastung ($h_3 = 1,0 \text{ m}$)

Die zugehörige Verformungsmessung für das 200 cm breite System ist in Tabelle 4.2 und Abbildung 4.4 dargestellt. Es zeigen sich im Vergleich zur Verformung des 150 cm breiten Systems deutlich erkennbare Unterschiede.

Tabelle 4.2: Messwerte des Verformungswegs s in Abhängigkeit der Stauhöhe h ($b = 200 \text{ cm}$)

Stauhöhe	$h = 0,50 \text{ m}$	$h = 0,75 \text{ m}$	$h = 1,00 \text{ m}$
Messpunkthöhe mm	$s \text{ (mm)}$	$s \text{ (mm)}$	$s \text{ (mm)}$
919	3,9	13,1	27,9
720	5,9	16,9	32,9
513	8,6	20,8	36,1
324	12,9	25,1	39,2
131	18,2	28,9	47,9

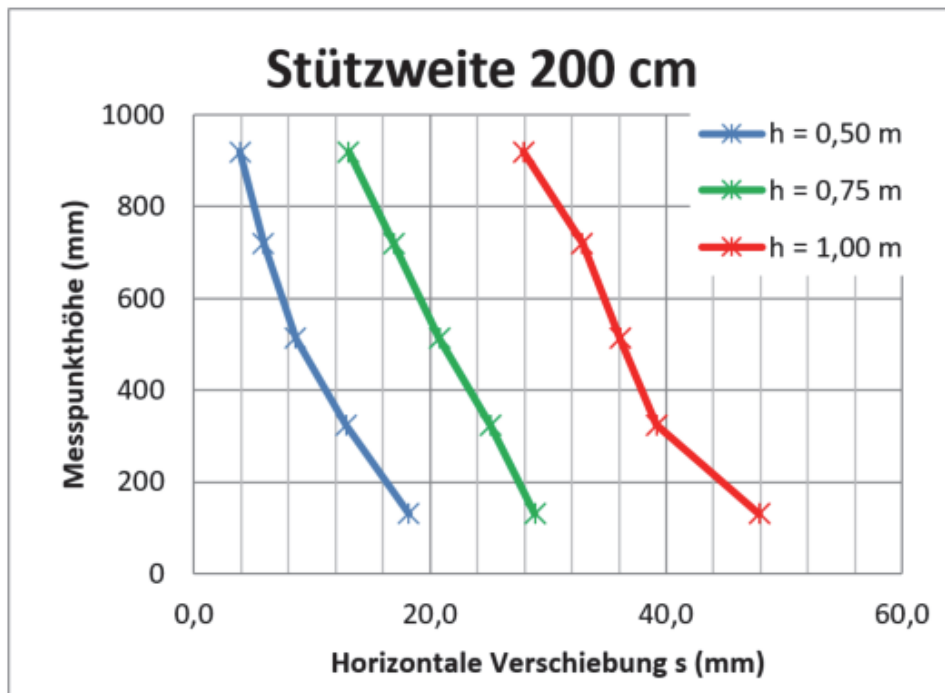


Abbildung 4.4: Grafische Darstellung der Verformungswege in Feldmitte (b = 200 cm Stützweite)

Der Abbildung 4.4 kann entnommen werden, dass der maximale Verformungsweg beim 200 cm breiten System mit $s_{\max} = 48$ mm mehr als doppelt so groß wie beim 150 cm breiten System ist. Diese Tatsache lässt sich mit dem – im direkten Vergleich - glatteren Untergrund („glasierte Fliesen“ / „rauer Beton“) begründen. Das System konnte auf dem glatten Fliesenuntergrund nahezu unbehindert ausfedern. Auch der Verlauf der Biegelinien ist durch die geringere Sohlreibung insgesamt stetiger.

Die erneute Nullmessung nach Versuchsende zeigt auch bei der großen Stützweite keine messbaren bleibenden Verformungen, d.h. auch das 200 cm breite System liegt noch im statisch zulässigen vollelastischen Verformungsbereich.

5 Statische Betrachtung

Die Stauversuche haben gezeigt, dass sich das Hochwasserschutzsystem HOWA KIT unter Wasserdruckbelastung bei einer Stützweite von $b = 200$ cm und einer Stauhöhe von $h = 1,0$ m noch im vollelastischen Bereich verformt. Nachfolgend soll auch der rechnerische Nachweis für diesen Sachverhalt erbracht werden. Da sich bei dem vorhandenen stranggepressten Profilquerschnitt die Querschnittswerte nur ungenau berechnen lassen (siehe Abbildung 5.1), wurde nach den Stauversuchen eine Probelastung als „Träger auf zwei Stützen mit Einzellast in Feldmitte“ durchgeführt.

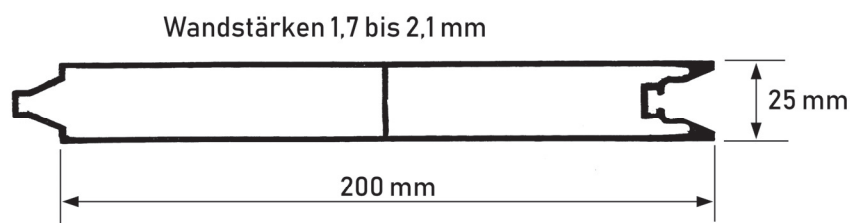


Abbildung 5.1: Querschnittsskizze des Alu-Tragprofils HOWA KIT

Um die Querschnittswerte des Systems sicher abschätzen zu können, wurde das horizontal auf zwei Widerlagerblöcken liegende Profil bei einer Stützweite von $b = 200 \text{ cm}$ mit einer Einzellast $F = 105 \text{ N}$ (resultierend aus einem Stahlgewicht mit $10,73 \text{ kg}$ Masse) in Feldmitte belastet. Mittels einer mm-Messuhr konnte ein zugehöriger Verformungsweg von $s = 2,25 \text{ mm}$ gemessen werden.

Für den Verformungsweg s gilt in diesem Fall (aus Schneider Bautabellen, 21. Auflage) die Beziehung:

$$s = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}$$

Mit den Werten

$s = 2,25 \text{ mm}$ (Durchbiegung in Feldmitte)

$L = 2000 \text{ mm}$ (Stützweite)

$E = 70000 \text{ N/mm}^2$ (E-Modul Aluminium)

ergibt sich ein Flächenträgheitsmoment $I = 111.387 \text{ mm}^4 = 11,14 \text{ cm}^4$. (Zum Vergleich: Für ein Rechteck-Hohlprofil ohne Mittelsteg $200 \times 25 \times 2 \text{ mm}$ ist ein Tabellenwert von $I = 10,9 \text{ cm}^4$ angegeben, daher ist der oben ermittelte Wert vertrauenswürdig und wird für alle weiteren Berechnungen verwendet.)

Aufgrund der Belastungsfläche des Wasserdrucks ist eine direkte und genaue statische Berechnung des Systems unmöglich, wie die nachfolgende Abbildung 5.2 verdeutlicht. Bei einer „normalen“ Streckenlast (Gewichtskraft) wirken die Kräfte auch bei durchgebogenem Träger parallel zur Lotrichtung (Erdmittelpunkt). Im Gegensatz dazu stehen die aus Wasserdruck resultierenden Druckkräfte immer senkrecht auf der belasteten Oberfläche. Demnach verursacht die Verformung der Lamellen eine Veränderung der Belastungsfläche, was eine iterative Berechnung erfordern würde. Die üblichen Verfahren der technischen Mechanik gehen von ebenen, unverformten Tragquerschnitten (= Theorie I. Ordnung) oder vorverformten Tragquerschnitten (= Theorie II. Ordnung, Vorverformung durch Eigengewicht) aus.

Beide Verfahren erfassen nicht (oder nur näherungsweise) das oben beschriebene Problem, da die Formänderung bei Theorie I. und II. Ordnung keine Änderung der Belastung berücksichtigt. Das vorliegende statische System ließe sich nur mittels iterativer Finite-Elemente-Methode (FEM) genau untersuchen, allerdings wäre der Aufwand hierfür unverhältnismäßig hoch.

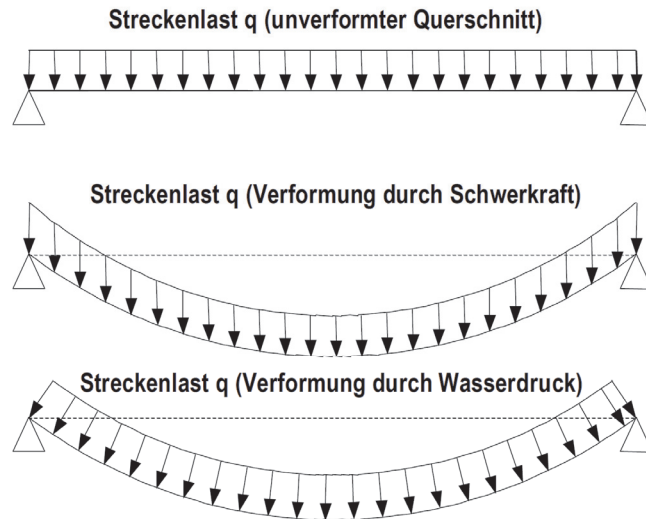


Abbildung 5.2.: Unterschiede in der Belastung durch Schwerkraft und Wasserdruck (schematisch)

Da das HOWA KIT System zuvor auch im Naturmaßstab getestet wurde, kann auf eine genaue Ermittlung des statischen Systems und der Schnittkräfte verzichtet werden. Maßgeblich sind die Erkenntnisse aus den Versuchen. Die oben beschriebene Erhöhung der Belastung durch die Verformung des Querschnittes (aufgrund der kleinen Formänderung) ist gering und kann durch einen Sicherheitszuschlag berücksichtigt werden.

Alle weiteren statischen Berechnungen erfolgen näherungsweise nach dem Kraftgrößenverfahren (Theorie I. Ordnung, vgl. SCHNEIDER Bautabellen, 21. Auflage). Das zugehörige, vereinfachte statische System ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Vereinfachend wird die Wasserdruckbelastung als Rechteckfläche angenommen, d.h. die Belastung ist rechnerisch etwas größer als bei dem realen System.

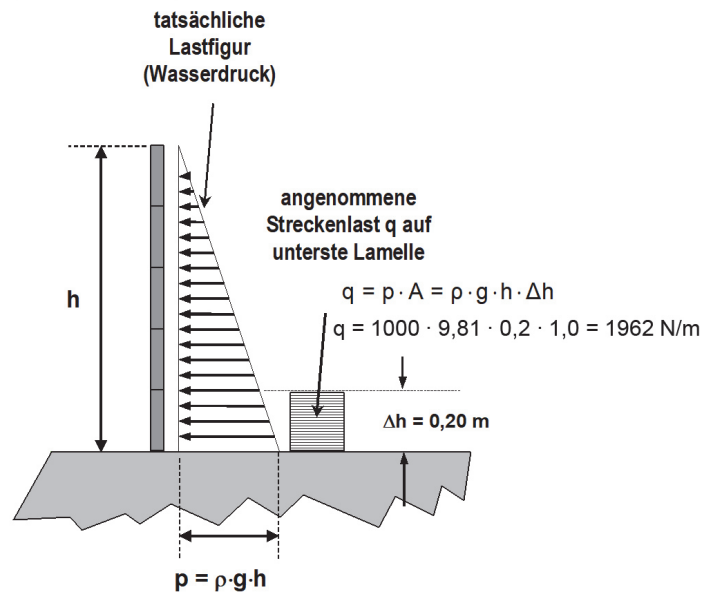
Mit dem oben berechneten Flächenträgheitsmoment $I = 11,14 \text{ cm}^4$ wird entsprechend der nachfolgenden Gleichung die Durchbiegung des Aluminium-Elements in Feldmitte aus der Wasserdruck-Streckenlast wie folgt berechnet:

$$s = \frac{q \cdot l^4}{76,8 \cdot E \cdot I} = \frac{1,962 \cdot 2020^4}{76,8 \cdot 70000 \cdot 11,14 \cdot 10^4} = 54,5 \text{ mm}$$

Dabei ist zu beachten, dass die Stützweite konstruktionsbedingt 2 cm größer als die lichte Öffnungsweite der Maueröffnung ist. Daher wurde mit der tatsächlichen Stützweite $L_1 = 202 \text{ cm}$ gerechnet.

Der berechnete Wert für die Durchbiegung in Feldmitte ist mit $s_{\text{ber}} = 54,5 \text{ mm}$ etwas größer als der gemessene Wert $s_{\text{gem}} = 47,9 \text{ mm}$. Der Unterschied begründet sich einerseits in der nicht berücksichtigten Verbundwirkung des Nut- und Feder-Systems und der unberücksichtigten Bodenreibung, andererseits ist die Belastungsfläche des statischen Ersatzsystems geringfügig größer als beim realen System (vgl. Abbildung 5.3).

Seitenansicht:



Grundriß:

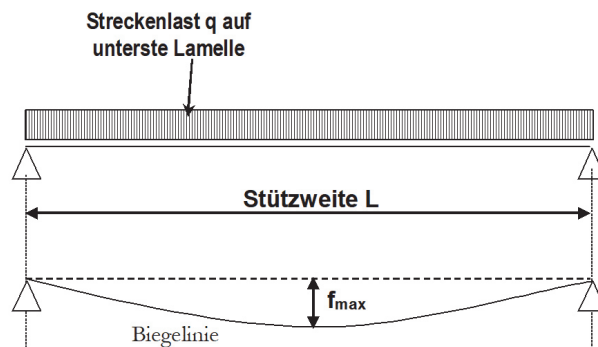


Abbildung 5.3: Statisches Ersatzsystem für die unterste HOWA KIT Lamelle

Die resultierenden maximalen Biegezugspannungen im Aluminium-Querschnitt können damit wie folgt abgeschätzt werden. Es gilt die folgende Beziehung für die Randzugspannung σ im Aluminium-Querschnitt (Siehe Schneider Bautabellen, 21. Auflage):

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot z = \frac{1000,7 \text{ Nm}}{11,4 \text{ cm}^4} \cdot 0,0125 \text{ m} \cong 110 \text{ N/mm}^2$$

mit M = maximales Moment in Feldmitte in Nm ($= 0,125 \cdot q \cdot L^2$)

I = Flächenträgheitsmoment cm^4

z = Profilrandabstand zur „neutralen Faser“ in m ($= d/2$)

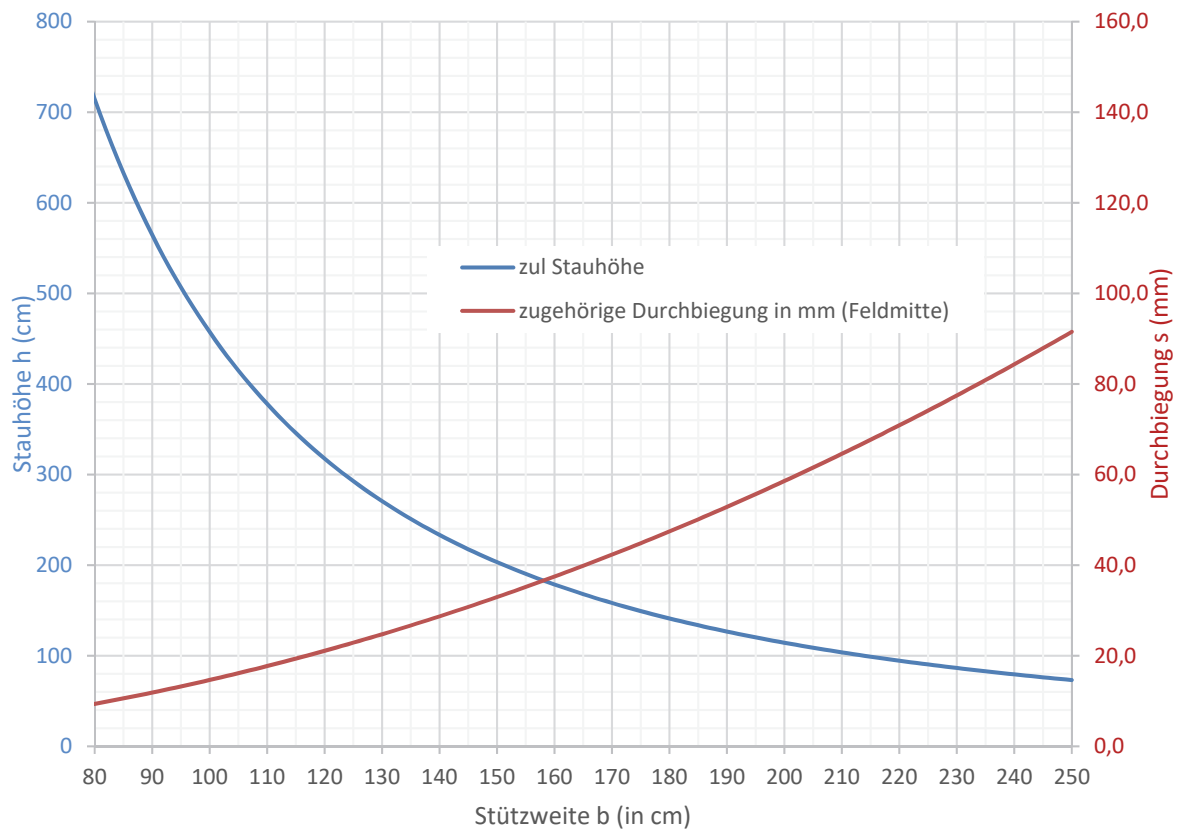
Nach den Herstellerangaben sind die Aluminium Profile aus dem Werkstoff 3.3206 (Norm EN AW-6063: AlMgSi0,7) gefertigt. Für diesen Aluminium Werkstoff ist eine 0,2%-Streckgrenze (=Ersatzstreckgrenze) mit $R_e = 160 \text{ N/mm}^2$ (für Bauteile mit Wanddicken bis 10 mm) angegeben. Mit einem Sicherheitsabschlag von 30% auf die Grenzzugspannung ergibt sich:

$$\sigma_{\text{vorh.}} = 112 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{zul.}} = 160 / 1,3 = 123 \text{ N/mm}^2$$

D.h. das HOWA KIT System liegt bei der zugrundeliegenden Belastungssituation (Stützweite $b = 200 \text{ cm}$, $h = 1,0 \text{ m}$ Stauhöhe) auch rechnerisch noch im vollelastischen Bereich, d.h. ohne bleibende Verformungen. Anmerkung: Die Belastungen des Materials durch Querkkräfte sind im Verhältnis zur

Belastung aus Biegemomenten von untergeordneter Bedeutung und wurden nicht explizit nachgewiesen.

Anhand des oben beschriebenen Formelsatzes lässt sich mit der zulässigen Biegespannung $\sigma_{zul} = 123 \text{ N/mm}^2$ eine Stützweiten-Stauhöhen-Funktion $b(h)$ angeben, die die Grenzstauhöhen von HOWA KIT in Abhängigkeit der System-Stützweite beschreibt.



Die zugehörige Gleichung für die Stauhöhe lautet:

$$b(h) = \frac{457}{\left(\frac{b}{100}\right)^2}$$

mit b = Stützweite in cm

h = berechnete maximal zulässige Stauhöhe in cm, bei der die Materialspannung

$\sigma = 123 \text{ N/mm}^2$ nicht überschritten wird.

Siegen, 18.04.2019

(Dipl.-Ing. (FH) J. Wieland)

HOWA KIT

AUFBAUANLEITUNG



INHALT:

- **U-SCHIENEN (WANDLEISTEN)** LÄNGE 1 m
- **ALUPROFILE** HÖHE 20 CM
- **BASISSATZ GUMMIPROFILE**
- **FLÜGELSCHRAUBEN**

BENÖTIGTES WERKZEUG / ZUBEHÖR

Bohrmaschine, Akkuschauber, Wasserwaage, Zollstock, Bleistift

ACHTUNG:

Befestigungsmaterialien sowie Gummi- oder Plastikelemente zur Wandbefestigung sind im Lieferumfang **nicht** enthalten, Bitte fragen Sie hierzu Ihren Fachberater.

Um eine optimale Anpassung der Gummiprofile gewährleisten zu können, sollten die Untergründe eben und staubfrei sein.

EINZELTEILE - AUFBAUANLEITUNG

Leichter Aufbau, einmal montiert, jederzeit einsatzbereit.

Schritt 1:
Gummi-Abschlusspad an der Wandleiste unten anbringen, einschneiden und nach innen umklappen. Für eine dauerhafte Befestigung zusätzlich mit Silikon fixieren.

Schritt 2:
Wandmontage der U-Schienen. Bitte beachten Sie die Breite Ihrer Profile. Bei Bedarf können Sie diese natürlich kürzen.

Schritt 3:
Lange Gummistreifen auf der Innenseite Ihrer U-Schiene aufkleben.

Achtung: Nicht unter Spannung aufkleben, die Gummistreifen sollten unten bündig mit der Schiene enden.

Schritt 4:
Abschlussgummi in das Aluprofil eindrücken.

Hinweis: Durch den Kleber lassen sich die Gummiprofile zusätzlich fixieren.

Schritt 5:
Zwischengummis in die beiden Profile eindrücken.

Schritt 6:
Aluprofil mit Abschlussgummi zuerst einführen und mit angemessenem Druck nach unten mit den Flügelmuttern fixieren. Diesen Vorgang für die Aluprofile mit den Zwischengummis wiederholen.

Schritt 7:
Kontrollieren Sie nochmals Ihre Verbindungen zum Boden und zur Wand ggfls. sind weitere Maßnahmen erforderlich um das Eindringen von Wasser fast vollständig zu verhindern.

Herzlichen Glückwunsch Sie haben den HOWA KIT erfolgreich montiert.

Hinweis: Bitte prüfen Sie Ihre Boden- und Wandoberflächen, bei größeren Unebenheiten benutzen Sie zusätzlich unser Zubehör wie Vorlegeband, Plastic-Fermit um diese auszugleichen oder glätten Sie den Bestand nach Ihrem Ermessen.