

Bearbeitungs-Nr.: 20.5.08

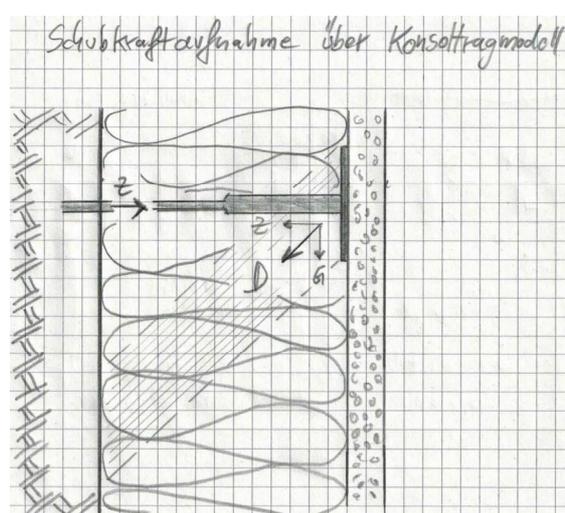
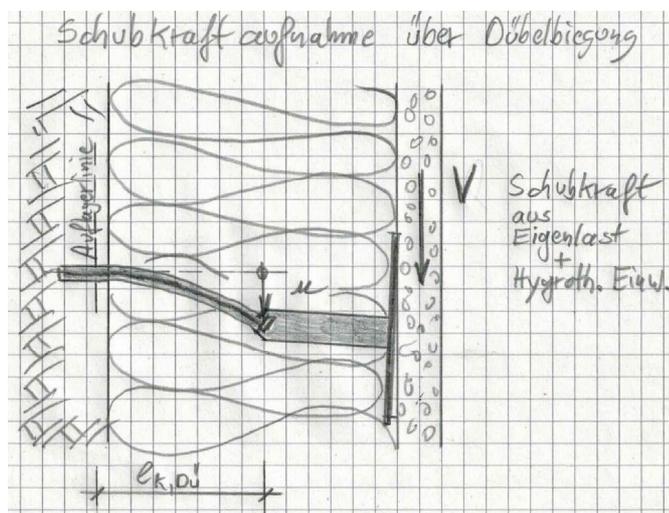
Bearbeitungs-Datum: 03.03.2021

Gutachtliche Stellungnahme Nr. 20.5.082 – Fassung 1.0 – 03-03-2021 Funktionstüchtigkeit der Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) – Grundlagen und Strukturen der Nachweisführung –

Bauarten: WDVS auf Massivuntergründen mit ausschließlicher Klebung;
WDVS auf Massivuntergründen mit Klebung + Verankerung;
WDVS auf Massivuntergründen mit ausschließlicher Verankerung.

Gegenstand: Diskussion der Regelwerke und Prüfnomen.

Hier: **Beispiel einer Fassade mit Mineralwolle-Dämmplatten**



Diese Gutachtliche Stellungnahme umfasst 16 Seiten Text.

Sie darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Eine auszugsweise Vervielfältigung bedarf der Genehmigung der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis, Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen		Seite
1	BEISPIEL DER FASSADE	3
2	BETRACHTUNG <u>FALL 1</u> : DER <u>UNTERGRUND</u> IST " <u>EINGESCHRÄNKT SICHER</u> "	3
2.2	STANDSICHERHEITSBETRACHTUNG IM LASTFALL WIND	3
2.2	STANDSICHERHEITSBETRACHTUNG IN DER LASTFALLKOMBINATION EIGENLAST UND HYGROTHERMISCHE EINWIRKUNGEN	3
	Tabelle 2.1: Bettungssteifigkeiten der Systeme und Schubtragfähigkeiten bzw. Schubverformbarkeiten der schubfest verklebten MW-Dämmplatten:	6
	Tabelle 2.2: Ansatz für die Materialkennwerte der mineralischen Putzsysteme die Putz-Rissdehnung wurde aus Erfahrungswerten geschätzt:	6
	Tabelle 2.3a: Fassadenrand- u. -eckverformungen " u_x , u_y (Rand)" und " u_{diag} (Ecke)", MW-Platten $d = 200$ mm / <u>dickschichtiges</u> Putzsystem – <u>8+12</u>	7
	Tabelle 2.3b: Fassadenrand- u. -eckverformungen " u_x , u_y (Rand)" und " u_{diag} (Ecke)", MW-Platten $d = 200$ mm / <u>dünnschichtiges</u> Putzsystem – <u>5+2</u>	7
	Abbildung 2.1: WDVS-Fassadenfläche (Scheibe, der linke Teil ist dargestellt) und maßgebliche Verschiebungen in der Ecke (oben links)	8
3	BETRACHTUNG <u>FALL 2</u> : DER <u>UNTERGRUND</u> IST " <u>UNSICHER</u> "	8
	Abbildung 3.1: WDVS mit Klebung und Verdübelung: „Konsoltragwirkung“ mit Dübel als „Zugband“, Dämmstoff als „Druckstrebe“ und „Schubverzahnung“ des Kleb mortels auf dem rauen Untergrund	9
	Abbildung 3.2: Versuchsaufbau zur Messung der Dübelzugkräfte	9
	Abbildung 3.3: Schematischer Versuchsaufbau Schubversuch	10
	Tabelle 3.1: Zusammenstellung der Ergebnisse des Dämmstoffes WLG 035	10
	Tabelle 3.2a: Fassadenrand- u. -eckverformungen " u_x , u_y (Rand)" und " u_{diag} (Ecke)", System nicht tragfähig verklebt MW-Platten $d = 200$ mm / <u>dickschichtiges</u> Putzsystem – <u>8+12</u>	11
	Tabelle 3.2b: Fassadenrand- u. -eckverformungen " u_x , u_y (Rand)" und " u_{diag} (Ecke)", System nicht tragfähig verklebt MW-Platten $d = 200$ mm / <u>dünnschichtiges</u> Putzsystem – <u>5+2</u>	11
	Abbildung 3.4: WDVS-Fassadenfläche (Scheibe, der rechte Teil ist dargestellt) und maßgebliche Verschiebungen in der Ecke (oben rechts)	12
	Abbildung 3.5: Schubkraftaufnahme über Dübelbiegung	13
	Abbildung 3.6: Schubkraftaufnahme über Konsoltragmodell	13
	Abbildung 3.7: Staffelung der erforderlichen Dübelmengen umlaufend (aus Schubkräften gestaffelt, aus Wind einheitlich angenommen)	14
4	ZUSAMMENFASSUNG	15
	Abbildung 4.1: WDVS-Fassadenfläche - maßgebliche Verschiebungen in den Ecken;	15
	Abbildung 4.2: <u>Ergebnis Fall 2</u> : Staffelung der erforderlichen Dübelmengen umlaufend (aus Schubkräften gestaffelt, aus Wind einheitlich angenommen)	16

ANLAGEN: KEINE

1 Beispiel der Fassade

Die Beispielbetrachtung soll dazu dienen, den Lastabtrag für verschiedenen Ansätze zu beschreiben.

Es wird folgende Fassade betrachtet:

- WDVS mit **Mineralwolle-Dämmplatten** der Dicke **200 mm**, geklebt und gedübelt
- **Länge 30 m, Höhe 15 m**
- **Putzsystem** mineralisch dünn "**5+2**" und mineralisch dick "**8+12**"
- Dübel EJOT ejothem STR-U (2G) mit Teller Ø 90 mm (VT 90) oder Ø 112,5 mm (VT 2G)
- Windzone II, Mischgebiet II+III, vereinfachter Windnachweis $w_e = 1,18 / 0,88 \text{ kN/m}^2$
- Untergrund Porenbeton-Mauerwerk oder Hochlochziegel, $N_{Rk} = 0,75 \text{ kN}$
- Mineralwolle-Dämmplatten $R_{\text{Fläche}} = 0,770 \text{ kN}$, $R_{\text{Fuge}} = 0,560 \text{ kN}$
Alle Dübel werden auf die Plattenflächen gesetzt; $N_{Rk,WDVS} = 0,77 \text{ kN}$
- **Fall 1: Der Untergrund ist "eingeschränkt sicher"**
– Es wird angenommen, dass die Klebung die Schubkräfte aus Eigenlast und hygrothermischen Einwirkungen aufnehmen kann. Es können Teilflächen mit Ablösung des Klebers vom Untergrund entstehen.
- **Fall 2: Der Untergrund ist "unsicher"**
– Es wird angenommen, dass die Dübel – im Zusammenspiel mit dem Dämmstoff – alle Kräfte aufnehmen. Der Kleber bleibt unberücksichtigt.

2 Betrachtung Fall 1: Der Untergrund ist "eingeschränkt sicher"

2.2 Standsicherheitsbetrachtung im Lastfall Wind

Sicherheitsbeiwerte $\gamma_L = 1,5$ und $\gamma_M = 2,0$

Dübelmengen: $N_{Rd} = 0,75 \text{ kN} / 2,0 = 0,375 \text{ kN}$
 $N_{Ed} = 1,18 \text{ kN/m}^2 * 1,5 = 1,77 \text{ kN/m}^2$
erf. $n = 1,77 / 0,375 = 4,7 \text{ Dü/m}^2$ (Bereich "A")

2.2 Standsicherheitsbetrachtung in der Lastfallkombination Eigenlast und hygrothermische Einwirkungen

Im Folgenden werden die Überlegungen der Projektgruppe „MW-Lamellen > 200 mm“ (Sitzung am 16.07.2014) berücksichtigt.

Nachstehend werden Annahmen zum Nassgewicht sowie Trockengewicht der Mörtel zusammengestellt und auch die Trockenmörtelverbräuche, die dazu benötigt werden, angegeben:

Unterputz und Strukturputz: Die Frischmörtel-Rohdichte beträgt 1700 kg/m^3 , der Frischmörtel enthält ca. 1350 kg Trockenmörtel und 350 kg Wasser. Die Festmörtel-Rohdichte beträgt 1500 kg/m^3 und enthält somit nur noch 150 kg gebundenes Wasser. Bei 5 mm Schichtdicke sind das ca. $7,5 \text{ kg/m}^2$ Festmörtel und ca. 7 kg/m^2 Trockenmörtelverbrauch. Die vorgenannten Daten gelten für einen handelsüblichen Unterputz.

Edelkratzputz: Die Frischmörtel-Rohdichte beträgt 1800 - 1850 kg/m³, der Frischmörtel enthält 1500 - 1550 kg Trockenmörtel und ca. 300 kg Wasser. Die Festmörtel-Rohdichte beträgt ca. 1600 kg/m³ und enthält somit nur noch 50 – 100 kg gebundenes Wasser. Bei 10 mm Schichtdicke sind das 16 kg/m² Festmörtel und rund 15 kg/m² Trockenmörtel.

Standardsystem mit Strukturputz (5+2): Bei mittlerer Unterputzdicke 5 mm und rechnerischer Oberputzdicke 2 mm (Korn 2 - 4 mm) werden folgende Gewichte erreicht:

Festmörtelgewichte: Unterputz 7,5 kg/m², Oberputz 3,2 kg/m²

Nassmörtelgewichte: Unterputz 8,5 kg/m², Oberputz 3,7 kg/m²

Das gesamte Nassgewicht beträgt somit ca. 12,2 kg/m², das gesamte Putzsystem im ausgehärteten Zustand wiegt ca. **10,7 kg/m²**.

Edelkratzputzsystem (8+12): Bei mittlerer Unterputzdicke 8 mm und mittlerer Oberputzdicke 12 mm werden folgende Gewichte erreicht:

Festmörtelgewichte: Unterputz 12,0 kg/m², Oberputz 19,2 kg/m²

Nassmörtelgewichte: Unterputz 13,6 kg/m², Oberputz 22,0 kg/m²

Das gesamte Nassgewicht beträgt somit ca. 35,6 kg/m², das gesamte Putzsystem im ausgehärteten Zustand wiegt ca. **31,2 kg/m²**.

Die Eigengewichtslast des Dämmstoffs beträgt (120 kg/m³): **24 kg/m²**

Nachfolgend wird eine Berechnung von Fassadenrandverformungen in Scheibenebene für ein WDVS mit folgenden Putzsystemen durchgeführt.

- **Unterputz**, Eigenschaften aus Erfahrungswerten

Mittlere Dicke	d = 5 - 8	mm	
E-Modul	E = 7000	N/mm ²	
Schwindmaß	$\varepsilon_{s,\infty} = -0,95$	%	
Wärmedehnkoeffizient	$\alpha_T = 8,0 * 10^{-6}$	1/K	
Rissdehnung	$\varepsilon_R = 0,15 - 0,25$	%	im Mittel 0,20 %

- **Strukturputz als Oberputz** = Werte wie Unterputz

- **Oberputz 6 bis 12 mm, Kratzputz**, Eigenschaften aus Erfahrungswerten

Mittlere Dicke	d = 12	mm	
E-Modul	E = 3500	N/mm ²	
Schwindmaß	$\varepsilon_{s,\infty} = -0,5$	%	
Wärmedehnkoeffizient	$\alpha_T = 8,0 * 10^{-6}$	1/K	
Rissdehnung	$\varepsilon_R = 0,10 - 0,20$	%	im Mittel 0,15 %

Das Schwindmaß des Unterputzes wird in der Verformungsberechnung zu $-\varepsilon_{s,\infty} = 0,95$ ‰ zugrunde gelegt, auch wenn es sich in experimentellen Untersuchungen als größer erweisen sollte, weil mit diesem Schwindmaß bereits die Rissdehnung erreicht wird. Der Wärmedehnkoeffizient wird zu $\alpha_T = 8,0 * 10^{-6}$ 1/K zugrunde gelegt. Für den Strukturputz wird von denselben Eigenschaften ausgegangen. Dessen Dicke wird zu effektiv d = 2 mm zugrunde gelegt, damit ist der Auftrag in Kornstärke bis Größtkorn 4 mm abgedeckt.

Das Schwindmaß des dickschichtigeren Oberputzes wird in der Verformungsberechnung zu $-\varepsilon_{s,\infty} = 0,5$ ‰ zugrunde gelegt, auch wenn es sich in experimentellen Untersuchungen als größer erweisen sollte, weil mit diesem Schwindmaß bereits die

Rissdehnung erreicht wird. Der Wärmedehnkoeffizient wird zu $\alpha_T = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ zugrunde gelegt.

In die Berechnung der Verformung in Scheibenebene fließen die hygrothermischen Eigenschaften sowie die Dehnsteifigkeit des Putzsystems (Unter- und Oberputz) ein. Die Dehnsteifigkeit ist definiert als das Produkt aus Elastizitätsmodul E und Schichtdicke d , bei mehrschichtigen Bekleidungen/Putzsystemen ergibt sich die Gesamt-Dehnsteifigkeit aus der Summe der Einzelsteifigkeiten, vgl. auch die Ausführungen in Anlage 2, Abs. A2.3 (Stellungnahme 20.5.080).

Für ein WDVS mit mineralischem Putzsystem wird gemäß Erfahrungswerten der größte E-Modul des Unterputzes zu $E \cong 7.000 \text{ N/mm}^2$ angenommen (Prüfung im Kurzzeit-Zugversuch). Der E-Modul des Edelkratzputzes wird zu $E \cong 3.500 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Im Lastfall Temperaturschwankungen kann nach Grundlagenversuchen an Putzen zur Erfassung gleichzeitig wirkender hygrischer Effekte und zeitabhängiger Einflüsse bei Temperaturschwankung mit der effektiven Steifigkeit $E_{\text{eff.}} = 0,4 E$ (40 % der experimentell ermittelten Steifigkeit) gerechnet werden. Temperaturerhöhung führt i.d.R. nicht zur maßgebenden Lastfallkombination, insoweit wird näherungsweise mit denselben abgeminderten E-Moduln gerechnet.

Gemäß [1] und [2] ist das Erstschrinden des Putzes erheblich größeren Relaxationseffekten unterworfen (Spannungen des „grünen“ Putzes, wie Schäfer in [1] schreibt; es entsteht ein „Wettlauf“ zwischen der schwindbedingten Zugspannung im Putz und der Putz-Zugfestigkeit). Dies kann durch den rechnerisch verminderten E-Modul $E_{\text{eff.}} = E/9$ erfasst werden.

Mit der größten Schwindverkürzung entstehen bei Überlagerung mit Temperaturabsenkung die größten Zugspannungen bzw. Verkürzungen der Fassade. Auf der sicheren Seite liegend wird in der Lastfallkombination Schwinden und Temperaturerhöhung das Erstschrinden nur zu einem Drittel des jeweils größten Schwindmaßes $-\varepsilon_{s,\infty} = 0,317 \text{ ‰}$ (Unterputz und Strukturputz) bzw. $-\varepsilon_{s,\infty} = 0,167 \text{ ‰}$ (Edelkratzputz) zugrunde gelegt. Die insgesamt zugrunde gelegten hygrothermischen Einwirkungen ergeben sich durch die vorstehenden Ansätze und die Begrenzung durch die Putz-Zugfestigkeit gemäß Tab. 2.1.

Mit diesem rechnerischen Ansatz wird das Putzsystem mit Strukturputz durch hygrothermische Einwirkungen durch Zwängung in einer Höhe beansprucht, die einer Dehnung von ca. 0,20 ‰ entspricht. Dies ist vergleichsweise hoch, nämlich in der Höhe der mittleren Rissdehnung mineralischer Unterputze von WDVS. Daher ist der rechnerische Ansatz als auf der sicheren Seite liegend anzusehen.

Mit den vorstehend aufgeführten bzw. rechnerisch hergeleiteten System- und Putzeigenschaften werden nachfolgend die Fassadenrandverformungen berechnet.

Für hier behandelte WDVS mit 200 mm dicken MW-Dämmplatten werden Bettungssteifigkeiten und Schubtragfähigkeiten gemäß Tab. 2.1 zu Grunde gelegt.

-
- [1] Schäfer, H. G.: Zum Standsicherheitsnachweis von Wärmedämm-Verbundsystemen mit Klebung und Verdübelung. *Bauphysik* 12 (1990), H. 4, S. 97 - 103.
- [2] Oberhaus, H.: Zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit mineralischer Wärmedämm-Verbundsysteme. Dissertation Dortmund 1993/94. Forschungsbericht aus dem Fachgebiet Betonbau, Universität Dortmund, Heft Nr. 17, August 1994. Verlag Förderkreis Dortmunder Modell Bauwesen e.V., Prof. Dr.-Ing. H. G. Schäfer.

Tabelle 2.1: Bettungssteifigkeiten der Systeme und Schubtragfähigkeiten bzw. Schubverformbarkeiten der schubfest verklebten MW-Dämmplatten:

Dicke der Mineralwolle-Dämmplatten:	[mm]	200
Bettungssteifigkeit WDVS c_v (vertikal)	[N/mm ³]	0,00161
Bettungssteifigkeit WDVS c_x (horizontal)	[N/mm ³]	0,00161
Bruchverschiebung des Systems (Ecke Fassadenfeld):	[mm]	5,69
Zulässige Verschiebung des Systems (Ecke Fassadenfeld)	[mm]	2,84

Wenn bei der grundlegenden Untersuchung zum Schubtragverhalten der WDVS nicht-konditionierte Proben berücksichtigt wurden, sollte hier der notwendige Sicherheitsfaktor zu $\gamma_{\text{global}} = \gamma_L \cdot \gamma_M = 2,0$ festgelegt werden, dies trifft hier auf den Systemaufbau mit Mineralwolle-Dämmplatten zu.

Tabelle 2.2: Ansatz für die Materialkennwerte der mineralischen Putzsysteme die Putz-Rissdehnung wurde aus Erfahrungswerten geschätzt:

	Eingangswerte	Unterputz	Kratzputz	
Putz-Zugfestigkeit, ermittelt aus der im Zugversuch festgestellten Rissdehnung: $\beta_{P,Z} = \epsilon_{P,R} \cdot E_P$	Putz-E-Modul E, geprüft im Kurzzeitversuch	[N/mm ²]	7000	3500
	Putz-Rissdehnung, geprüft im Kurzzeitversuch	[mm/m]	0,200	0,150
	größtes rechnerisches Schwindmaß	[mm/m]	-0,950	-0,500
	kleinstes rechnerisches Schwindmaß	[mm/m]	-0,317	-0,167
	zum Schwinden zugeh. E-Modul E_{eff} .	[N/mm ²]	778	389
Putzspannung aus Schwinden: $\sigma_{P,S} = \text{cal } \epsilon_{S,\infty} \cdot E_{\text{eff},S}$	Wärmedehnzahl	[1/K]	8,00E-06	8,00E-06
	Temperaturabsenkung	[K]	-30	-30
	zur Temperaturabsenkung zugeh. E-Modul E_{eff} .	[N/mm ²]	2800	1400
	Temperaturerhöhung	[K]	60	60
	zur Temperaturerhöhung zugeh. E-Modul E_{eff} .	[N/mm ²]	7000	3500
Putzspannung aus Temperatur: $\sigma_{P,\vartheta} = \alpha_{T,P} \cdot \vartheta \cdot E_{\text{eff},\vartheta}$	Vorwert			
	Putz-Zugfestigkeit, ermittelt aus Putz-Rissdehnung	[N/mm ²]	1,400	0,525
Putzspannung gesamt: $\sigma_P = \sigma_{P,S} + \sigma_{P,\vartheta}$	LF Schwinden + Temperaturabsenkung			
	Putz-Zugspannung aus Erstswinden	[N/mm ²]	0,739	0,194
	Putz-Zugspannung aus Temperaturabsenkung	[N/mm ²]	0,672	0,336
	Putz-Zugspannung gesamt	[N/mm ²]	1,411	0,530
	zugeh. rechn. Dehnung, bezogen auf Kurzzeitversuch	[mm/m]	0,202	0,152
zugehörige rechnerische Dehnung, bezogen auf Kurzzeitversuch: $\epsilon_P = \sigma_P / E$	LF Schwinden + Temperaturerhöhung			
	Putz-Zugspannung aus Erstswinden	[N/mm ²]	0,246	0,065
	Putz-Druckspannung aus Temperaturerhöhung	[N/mm ²]	-3,360	-1,680
	Putz-Druckspannung gesamt	[N/mm ²]	-3,114	-1,615
	zugeh. rechn. Dehnung, bezogen auf Kurzzeitversuch	[mm/m]	-0,445	-0,461

Es wird eine Berechnung zu Spannungen und Verformungen in Scheibenebene aufgestellt, wobei die Dämmstoffdicken 200 mm und ein Fassadenfeld der Maximalabmessungen Länge L = 30 m und Höhe H = 15 m betrachtet werden.

Es werden folgende Lastfälle berücksichtigt:

- LF 1: Schwinden Erstswinden des Putzsystems.
- LF 2: Temperaturschw. $\vartheta = +60 / -30$ für das Putzsystem, (farbig: HBW min. 20 %)
- LF 3: Eigenlasten siehe obige Angaben.

Quellen und Schwinden des Putzes aus Feuchteschwankungen wird damit als hinreichend erfasst angesehen. Verformungen aus dem erhärtungsbedingten

Schwinden des Putzes werden erheblich durch Relaxation abgebaut. Dies wird in physikalisch korrekter Weise durch einen verminderten E-Modul des Putzes im LF Schwinden berücksichtigt.

Der Zusammenhang von Rand- und Eckverschiebungen wird in der Anlage 2 in Abs. A2.3 (Stellungnahme 20.5.080) analytisch und grafisch dargestellt.

Als **maßgebendes Ergebnis** werden nicht die Verformungen unmittelbar am Fassadenrand sondern mit einem gewissen Abstand von diesem angesehen, da bei den Versuchen die Verformungen auch in Probenmitte gemessen / beurteilt werden.

Betrachtet wird nun auch die Stelle x_0, y_0 – hier 1,5 m vom Rand entfernt.

Die für die Verformung u_{Ecke} maßgebliche Lastfallkombination kann sein:

- 1.) *Eigenlast, kleinstes Schwinden und Temperaturerhöhung* und
- 2.) *Eigenlast, größtes Schwinden und Temperaturabsenkung*

Im hier vorliegenden Fall liefert Fall 2 die betragsmäßig größten Verformungen.

Mit diesen Grundlagen werden nachstehend die maximal auftretenden Verschiebungen genannt (Tab. 2.3);

Tabelle 2.3a: Fassadenrand- u. -eckverformungen " u_x, u_y (Rand)" und " u_{diag} (Ecke)", MW-Platten $d = 200$ mm / dickschichtiges Putzsystem – **8+12**

Überlagerung Fassadenrandverschiebung L / H [mm] =		30000	15000
		x-Richtung für c_x min/max	
max u_r [mm]		1,36	1,36
min u_r [mm]		-3,28	-3,28
		y-Richtung für c_y min/max	
		1,55	1,55
		-3,48	-3,48
Überlagerung Fassadenverschiebung an den Stellen x_0 und y_0			
		x-Richtung für c_x min/max	
max $u_x(x_0), u_y(y_0)$	$x_0 = [mm]$ 13500	1,13	1,13
min $u_x(x_0), u_y(y_0)$	$y_0 = [mm]$ 6000	-1,92	-1,92
		y-Richtung für c_y min/max	
		1,31	1,31
		-2,12	-2,12
Überlagerung resultierende Fassadeneckverschiebung		Stelle I_x, I_y (Außenecke)	
		Schräg für c_x, c_y min/max	
max $u_{Ecke}, \max u_{diag}$ [mm]		2,06	2,06
min $u_{Ecke}, \min u_{diag}$ [mm]		-4,78	-4,78
		Stelle x_0, y_0	
		Schräg für c_x, c_y min/max	
		1,73	1,73
		-2,86	-2,86

Tabelle 2.3b: Fassadenrand- u. -eckverformungen " u_x, u_y (Rand)" und " u_{diag} (Ecke)", MW-Platten $d = 200$ mm / dünnschichtiges Putzsystem – **5+2**

Überlagerung Fassadenrandverschiebung L / H [mm] =		30000	15000
		x-Richtung für c_x min/max	
max u_r [mm]		0,96	0,96
min u_r [mm]		-2,51	-2,51
		y-Richtung für c_y min/max	
		1,14	1,14
		-2,68	-2,68
Überlagerung Fassadenverschiebung an den Stellen x_0 und y_0			
		x-Richtung für c_x min/max	
max $u_x(x_0), u_y(y_0)$	$x_0 = [mm]$ 13500	0,72	0,72
min $u_x(x_0), u_y(y_0)$	$y_0 = [mm]$ 6000	-1,25	-1,25
		y-Richtung für c_y min/max	
		0,90	0,90
		-1,42	-1,42
Überlagerung resultierende Fassadeneckverschiebung		Stelle I_x, I_y (Außenecke)	
		Schräg für c_x, c_y min/max	
max $u_{Ecke}, \max u_{diag}$ [mm]		1,49	1,49
min $u_{Ecke}, \min u_{diag}$ [mm]		-3,67	-3,67
		Stelle x_0, y_0	
		Schräg für c_x, c_y min/max	
		1,16	1,16
		-1,89	-1,89

Dickputzsystem: Rechnerisch entsteht eine Überschreitung der zulässigen Verformung in einer maximal 1,5 m breiten / hohen Rand- bzw. Eckzone, dies kann akzeptiert werden vgl. Abb. 2.1.

Dünnputzsystem: Rechnerisch entsteht eine geringfügige Überschreitung der zulässigen Verformung, dies ist auf die reine Eckzone beschränkt.

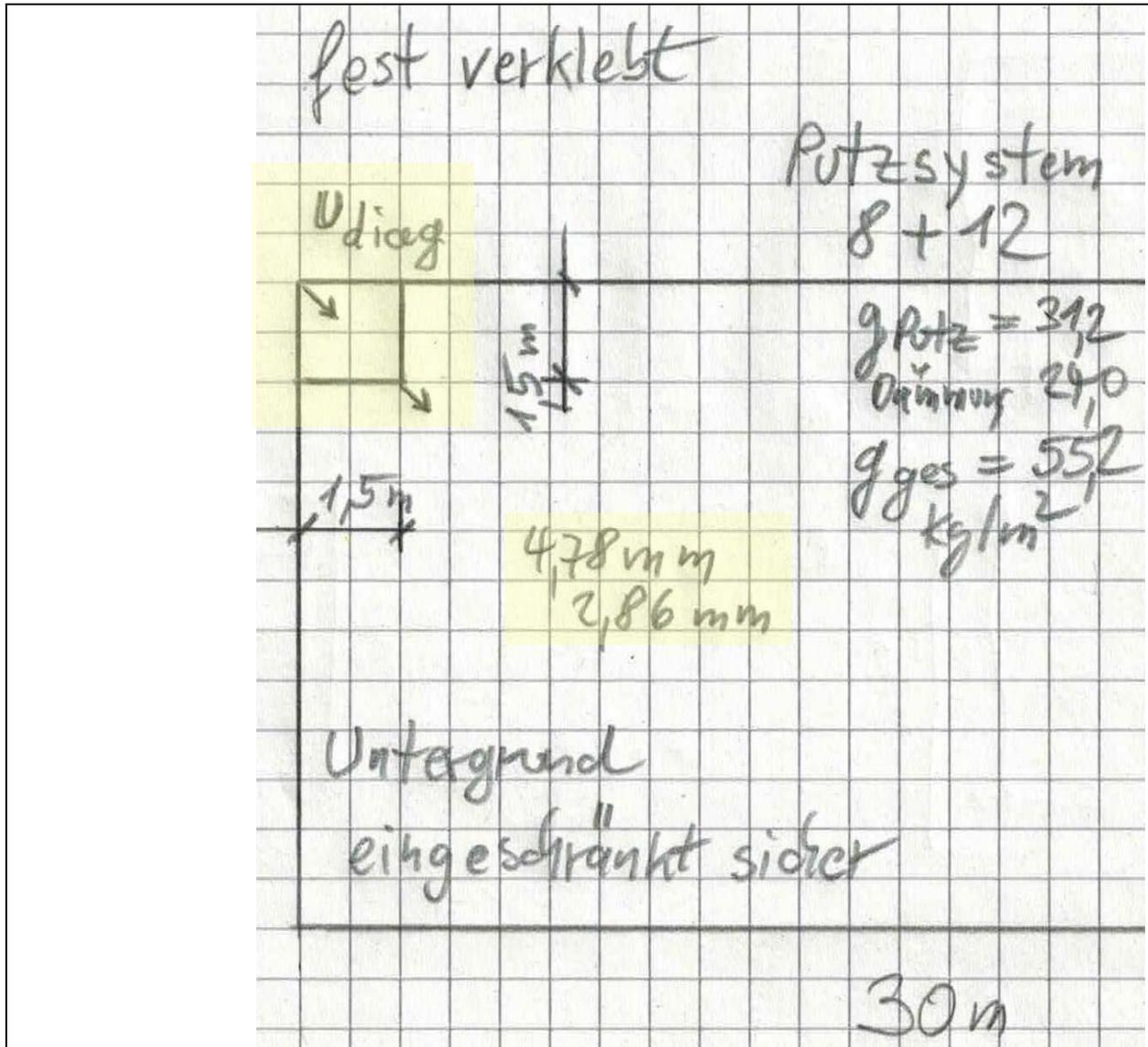


Abbildung 2.1: WDVS-Fassadenfläche (Scheibe, der linke Teil ist dargestellt) und maßgebliche Verschiebungen in der Ecke (oben links)

3 Betrachtung Fall 2: Der Untergrund ist "unsicher"

Im Rahmen der Diplomarbeit Armin Just haben wir gezielt das Tragverhalten des unverklebten Systems geprüft: Das "Konsoltragmodell" nach Abb. 3.1 wurde mit einem Pendelstab gemäß Abb. 3.2 nachgestellt.

Dieser "Ersatzdübel" wurde in das System nach Abb. 3.3 eingebaut, die dementsprechend aufgebauten Proben wurden schubkraftbelastet.

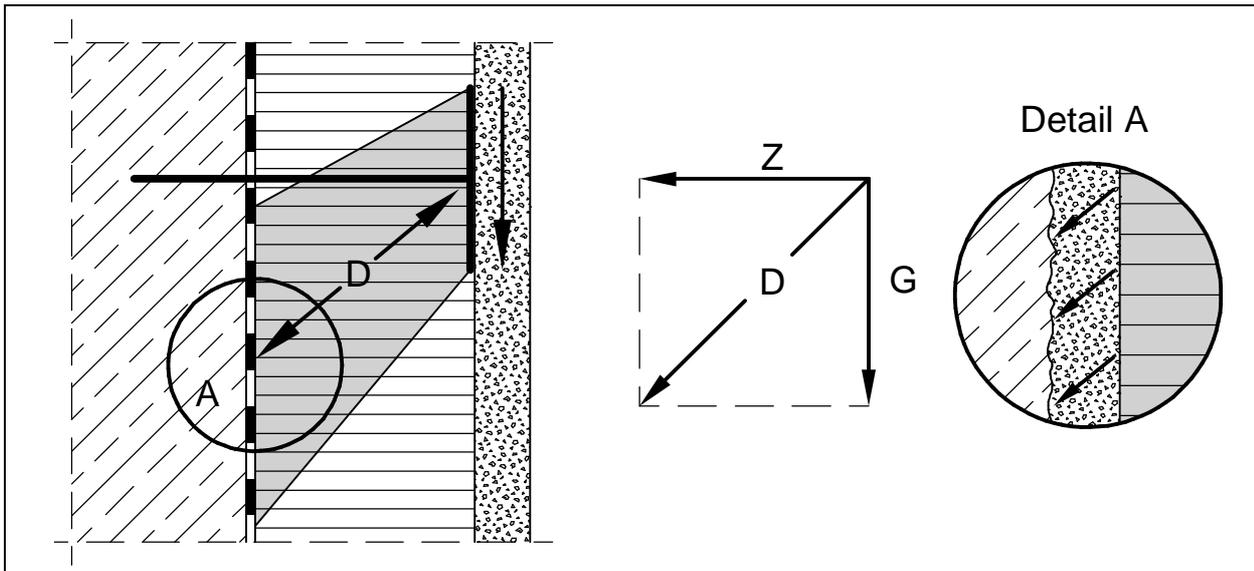


Abbildung 3.1: WDVS mit Klebung und Verdübelung: „Konsoltragwirkung“ mit Dübel als „Zugband“, Dämmstoff als „Druckstrebe“ und „Schubverzahnung“ des Klebemörtels auf dem rauhen Untergrund

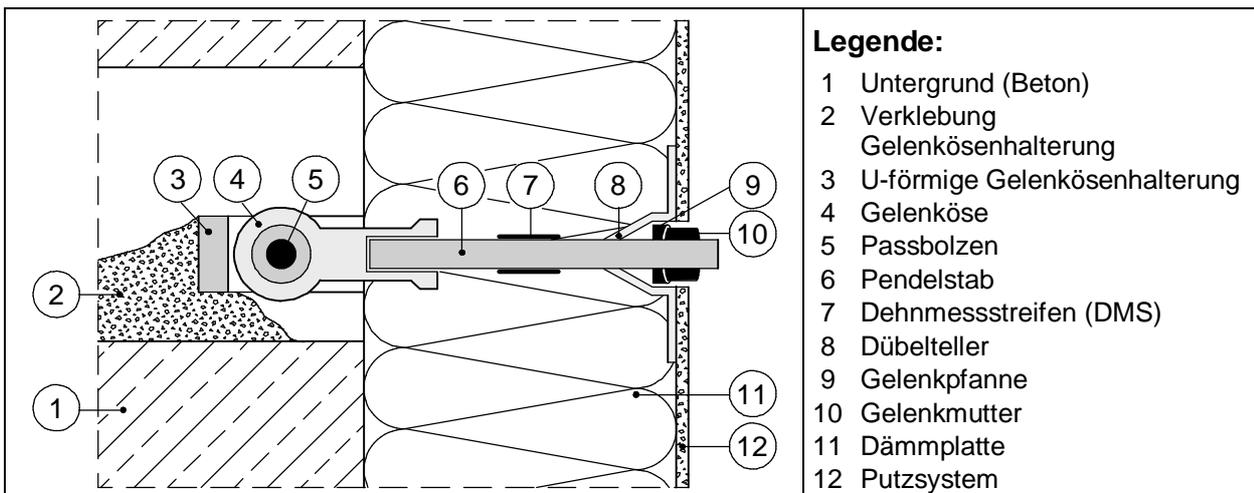


Abbildung 3.2: Versuchsaufbau zur Messung der Dübelzugkräfte

Die Versuche wurden mit Mineralwolle-Dämmplatten durchgeführt, die ohne Verklebung am Untergrund befestigt wurden, vgl. Abb. 3.3.

Als Befestiger dienten beidseitig gelenkig angeschlossene Stahlstäbe, die mit Dehnmessstreifen versehen waren.

Es wird damit der Lastabtrag der Einwirkungen in Putzselebene über Pendelstäbe, d.h. biegemomentenfreier Lastabtrag beschrieben, vgl. Abb. 3.2.

Tab. 3.1 gibt einen Überblick über Versuchsvarianten und Ergebnisse der Schubversuche. Es wurde festgestellt, dass die Summe der Zugkräfte in den Dübeln ca. der eingeleiteten Schubkraft entspricht, d.h. es wurde eine **Druckstrebenneigung von ca. 45° festgestellt.**

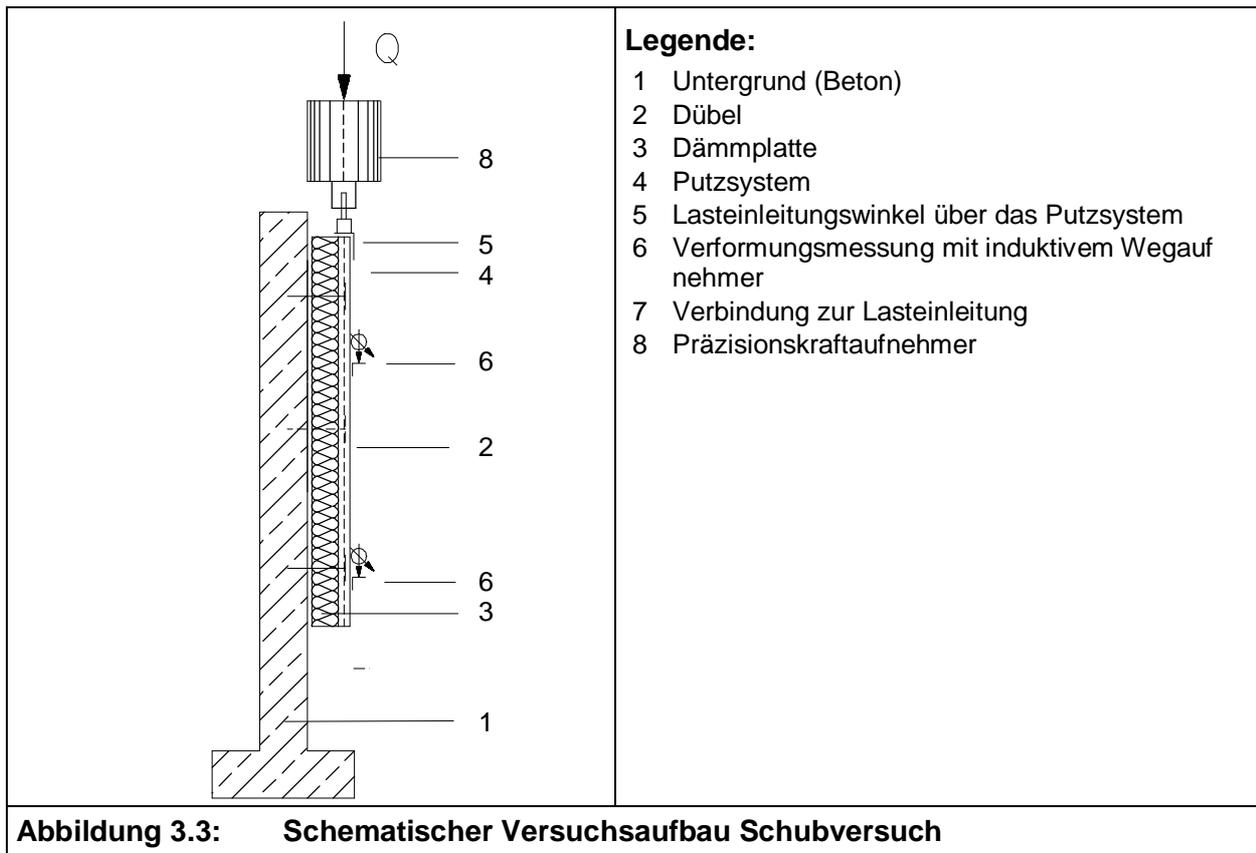


Abbildung 3.3: Schematischer Versuchsaufbau Schubversuch

Tabelle 3.1: Zusammenstellung der Ergebnisse des Dämmstoffes WLG 035

Dämmstoff		WLG 035					
Probennummer		035-1	035-2	035-3	035-13	035-9	035-11
Art der Befestigung		nur gedübelt		nur geklebt		gedübelt und geklebt	
Anfangssteifigkeit = max c [N/mm ³]		0,00276	0,00262	0,00949	0,00723	0,01112	0,00862
max Q [N]		2689	2284	-	-	-	-
zu max Q gehöriges u [mm]		21,845	21,845	-	-	-	-
Q _u [N]		-	-	3372	2298	4132	3372
zu Q _u gehöriges u _u [mm]		-	-	0,995	0,971	0,992	1,002
τ _u [N/mm ²]		-	-	0,00674	0,00460	0,00826	0,00674
c im relevanten Bereich u _{Ecke} [N/mm ³]	maximal/ beim Abscheren	0,00060	0,00067	0,00678	0,00474	0,00833	0,00673
	im Mittel	0,00054	0,00058	0,00416	0,00351	0,00630	0,00551

Schubtragverhalten ohne Verklebung: Im Zusammenhang mit der bauaufsichtlichen Zulassung von aufgedoppelten Systemen wurde Kombiversuche an Proben verschiedenen Aufbaus mit und ohne Windsogeinwirkung durchgeführt. Die Proben waren jeweils geklebt und gedübelt, die Verbundfähigkeit des Klebers war aber durch zwischengelegte Folien unterbunden worden.

Die Bettungssteifigkeiten nehmen eine große Bandbreite ein, für größere Dämmdicken (300 mm) kann von der Größenordnung $c = 0,00014$ bis $0,00028$ N/mm² ausgegangen werden.

Bei Proben mit Dämmstoffdicke 200 mm wird die Steifigkeit größer sein, bei einer Probe wurde die Bettungszahl zu $c = 0,0007$ festgestellt. Im folgenden wird von der Bandbreite $c = 0,0002$ bis $0,0007$ N/mm³ ausgegangen.

Mit den vorstehend aufgeführten Ansätzen der Putzeigenschaften werden die Ergebnisse nach Tab. 3.2 erreicht.

Tabelle 3.2a: Fassadenrand- u. -eckverformungen " u_x, u_y (Rand)" und " u_{diag} (Ecke)", System nicht tragfähig verklebt MW-Platten $d = 200$ mm / dickschichtiges Putzsystem – 8+12

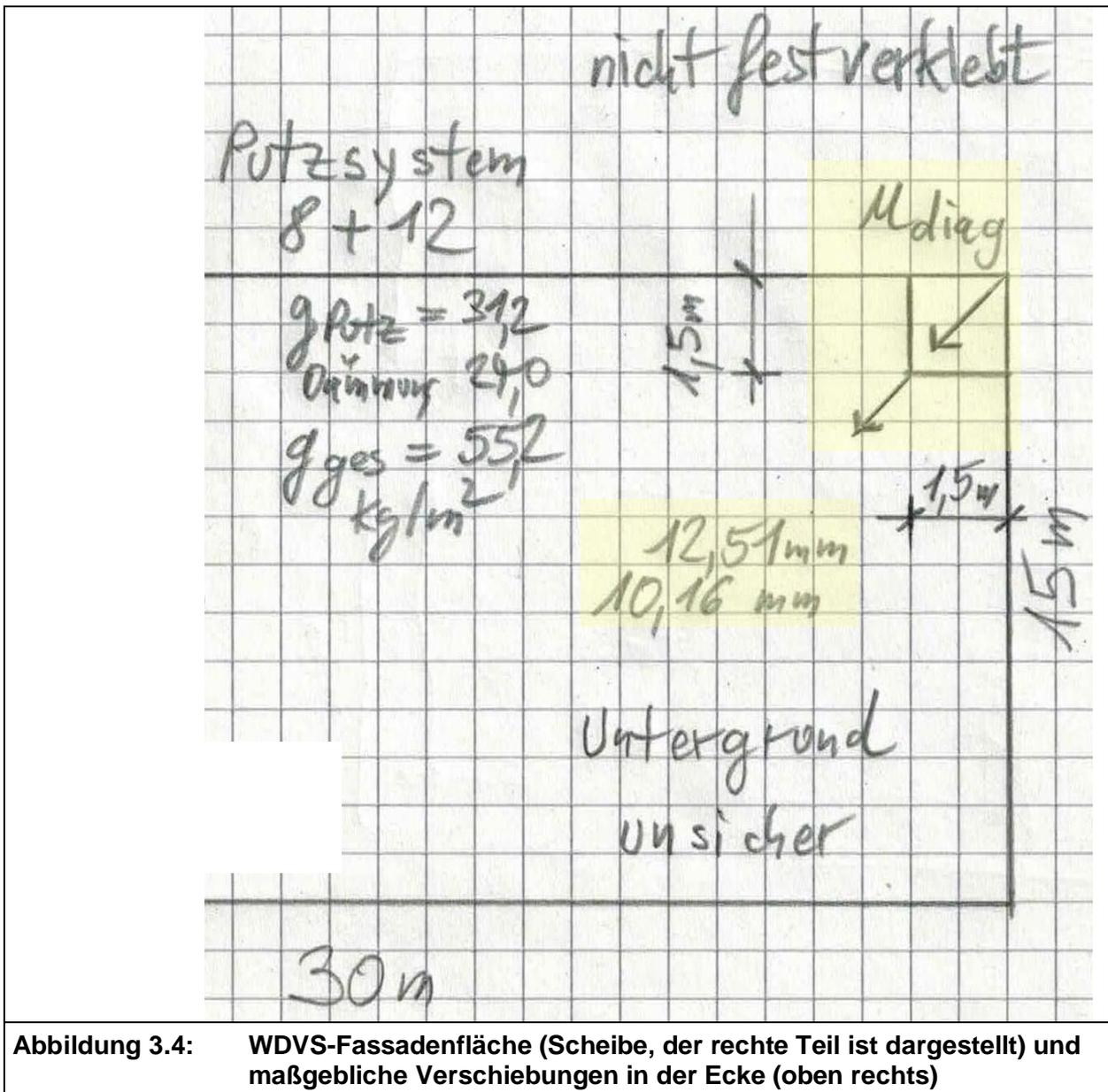
Überlagerung Fassadenrandverschiebung L / H [mm] =		30000	15000
		x-Richtung für c_x min/max	
max u_r [mm]		2,81	1,98
min u_r [mm]		-8,37	-4,89
		y-Richtung für c_y min/max	
		4,15	2,22
		-9,30	-5,19
Überlagerung Fassadenverschiebung an den Stellen x_0 und y_0			
		x-Richtung für c_x min/max	
max $u_x(x_0), u_y(y_0)$	$x_0 = [mm]$ 13500	2,59	1,75
min $u_x(x_0), u_y(y_0)$	$y_0 = [mm]$ 6000	-6,72	-3,39
		y-Richtung für c_y min/max	
		3,93	1,98
		-7,62	-3,68
Überlagerung resultierende Fassadeneckverschiebung		Stelle l_x, l_y (Außenecke)	
		Schräg für c_x, c_y min/max	
max $u_{Ecke}, \max u_{diag}$ [mm]		5,01	2,97
min $u_{Ecke}, \min u_{diag}$ [mm]		-12,51	-7,14
		Stelle x_0, y_0	
		Schräg für c_x, c_y min/max	
		4,71	2,64
		-10,16	-5,00

Tabelle 3.2b: Fassadenrand- u. -eckverformungen " u_x, u_y (Rand)" und " u_{diag} (Ecke)", System nicht tragfähig verklebt MW-Platten $d = 200$ mm / dünnschichtiges Putzsystem – 5+2

Überlagerung Fassadenrandverschiebung L / H [mm] =		30000	15000
		x-Richtung für c_x min/max	
max u_r [mm]		2,38	1,44
min u_r [mm]		-6,78	-3,78
		y-Richtung für c_y min/max	
		3,16	1,73
		-7,45	-4,08
Überlagerung Fassadenverschiebung an den Stellen x_0 und y_0			
		x-Richtung für c_x min/max	
max $u_x(x_0), u_y(y_0)$	$x_0 = [mm]$ 13500	2,15	1,21
min $u_x(x_0), u_y(y_0)$	$y_0 = [mm]$ 6000	-5,17	-2,36
		y-Richtung für c_y min/max	
		2,93	1,49
		-5,82	-2,65
Überlagerung resultierende Fassadeneckverschiebung		Stelle l_x, l_y (Außenecke)	
		Schräg für c_x, c_y min/max	
max $u_{Ecke}, \max u_{diag}$ [mm]		3,96	2,25
min $u_{Ecke}, \min u_{diag}$ [mm]		-10,07	-5,57
		Stelle x_0, y_0	
		Schräg für c_x, c_y min/max	
		3,63	1,92
		-7,79	-3,55

Im folgenden wird dieser Fall in Verbindung mit dem dickeren Putz näher betrachtet.

Im Fassadeneckbereich würde sich eine Diagonalverformung in Höhe von 7,14 bis 12,51 mm unmittelbar an der Ecke ergeben und in Höhe von 5,00 bis 10,16 mm waagrecht und senkrecht 1,50 m aus der Ecke entfernt; dies ist in Abb. 3.4 grafisch dargestellt.



Betrachtet man den Fall der nachgiebigen Bettung, dann ist von Diagonalverformung des Eckbereiches in Höhe von 10,2 / 12,5 mm (i.M. 11,4 mm) auszugehen.

Mit der zugehörigen Bettungszahl $c = 0,0002 \text{ N/mm}^2$ wird rechnerisch die Schubkraft $q = c \cdot u = 0,0002 \cdot 11,4 = 0,0023 \text{ N/mm}^2 = 2,3 \text{ kN/m}^2$ auftreten.

Schubkraftaufnahme über Dübelbiegung:

Die Dübelschraube endet etwa in der Mitte der Dämmschicht, vgl. Abb. 3.5.

Vor vielen Jahren haben wir in Biegeversuchen an Dübeln mit 8 mm Schaftdurchmesser und 5,1 mm Schraubendurchmesser (Stahl 5.8, galvanisch verzinkt) festgestellt, dass das seinerzeit zulässig Biegemoment in Höhe von 3450 Nmm bei einer "Kragarmlänge" ca. 125 mm und bei einer Auslenkung von ca. 4,0 mm erreicht wird.

Die Dübel würden somit diesbezüglich maximal zulässig belastet.

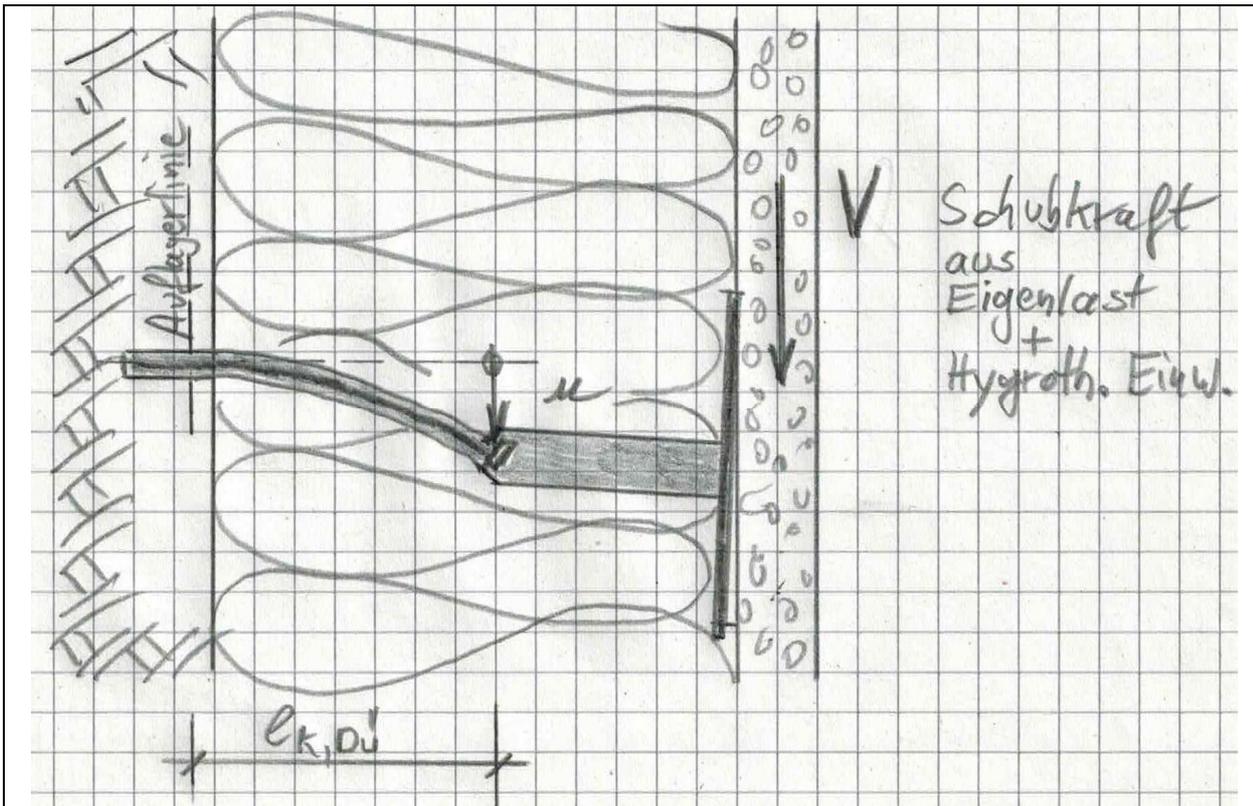


Abbildung 3.5: Schubkraftaufnahme über Dübelbiegung

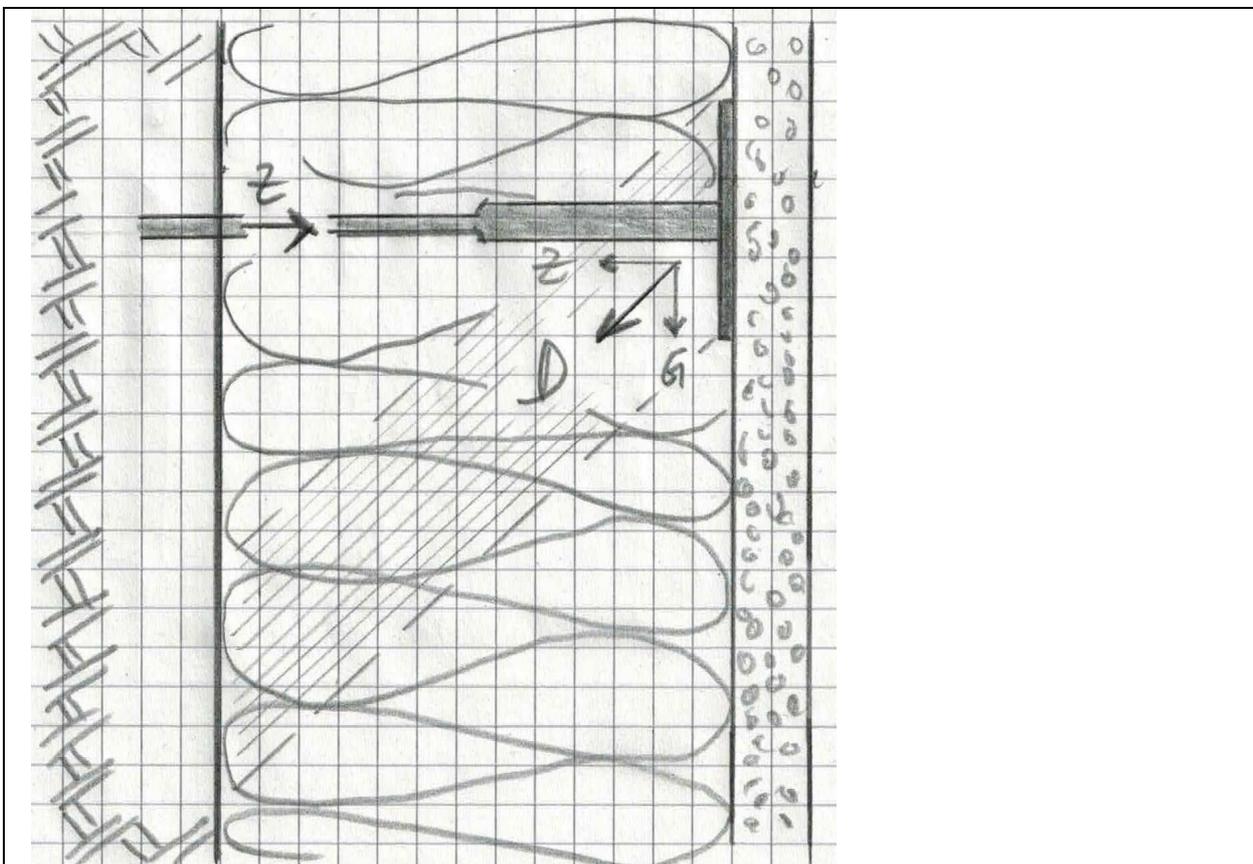


Abbildung 3.6: Schubkraftaufnahme über Konsoltragmodell

Hierbei würde man je Dübel eine Querkraft in Höhe von 28 N aufnehmen.

Selbst wenn man 10 Dübel/m² setzt, würde man nur die Schubkraft 280 N/m² = 0,28 kN/m² aufnehmen können. Dies entspräche ca. 50 % der Eigenlast (31,2 + 24 = 55,2 kg/m² = 0,552 kN/m²) aber nur 12 % der entstehenden Schubkraft.

Schubkraftaufnahme über Konsoltragmodell:

Aufzunehmen wäre eine "Restschubkraft" in Höhe von ca. 2,3 kN/m² - 0,28 = 2,0 kN/m².

Bei der Druckstrebenneigung 45° entspricht die Zugkraft im Dübel der Schubkraft, vgl. Abb. 3.6.

Sicherheitsbeiwerte $\gamma_L = 1,35$ (für Eigenlast und Zwang),
 $\gamma_M = 1,50$ (kein wesentlicher Alterungseffekt)

Dübelmengen: $N_{Rd} = 0,75 \text{ kN} / 1,5 = 0,50 \text{ kN}$
 $N_{Ed} = 2,0 \text{ kN/m}^2 * 1,35 = 2,70 \text{ kN/m}^2$
erf. $n = 2,70 / 0,50 = 5,4 \text{ Dü/m}^2$ (Eckzone)

Zur Aufnahme der Schubkräfte sind 5,4 Dübel/m² erforderlich (mehrere m breite Randzone)

Erforderlich Dübelung:

Zur Aufnahme der Windsogkräfte sind 4,7 Dübel/m² erforderlich (Bereich "A")

Zur Aufnahme der Schubkräfte sind in der äußeren Randzone ca. 5,4 Dübel/m² erforderlich. In einer mehrere m breiten Randzone werden somit insgesamt ca. 10 Dübel/m² benötigt.

Das Ergebnis einer genaueren Berechnung könnte eine Staffelung der Dübelmengen 10 / 8 / 6 Dü/m² sein, vgl. Abb. 3.7.

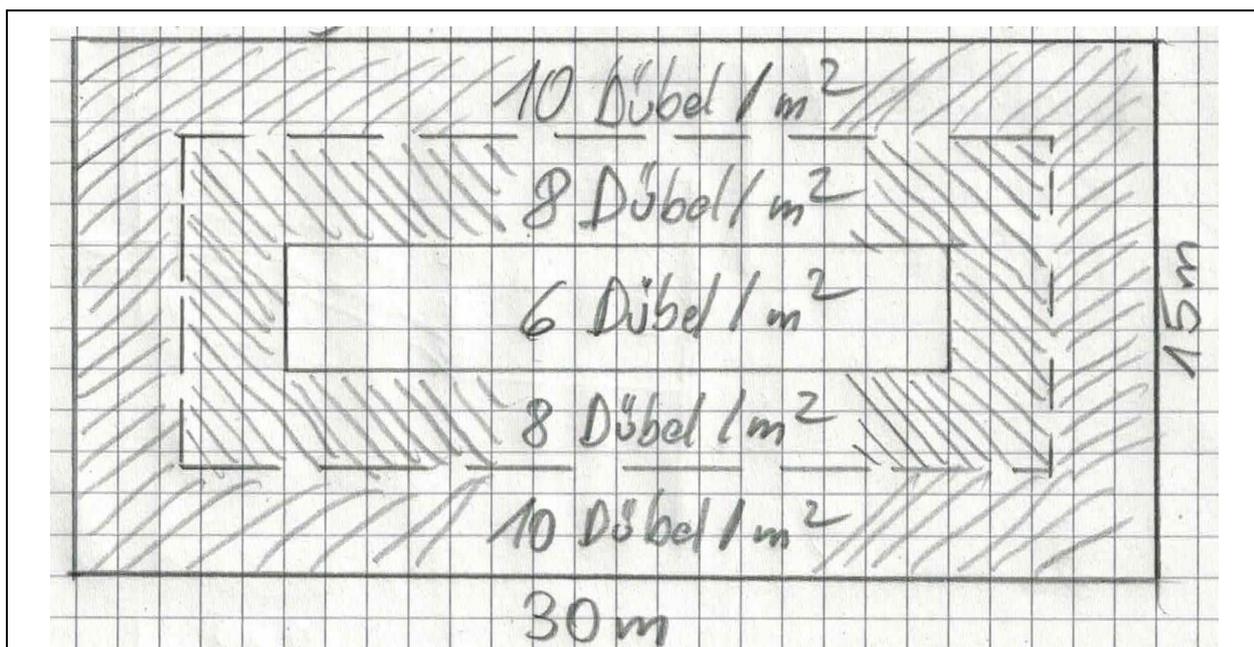


Abbildung 3.7: Staffelung der erforderlichen Dübelmengen umlaufend (aus Schubkräften gestaffelt, aus Wind einheitlich angenommen)

4 Zusammenfassung

Es wurde folgende Fassade betrachtet:

- WDVS mit **Mineralwolle-Dämmplatten** der Dicke **200 mm**, geklebt und gedübelt
- **Länge 30 m, Höhe 15 m**
- **Putzsystem** mineralisch dünn "5+2" und mineralisch dick "8+12"
- Dübel EJOT ejothem STR-U (2G) mit Teller Ø 90 mm oder Ø 112,5 mm
- Windzone II, Mischgebiet II+III, vereinfachter Windnachweis $w_e = 1,18 / 0,88 \text{ kN/m}^2$
- Untergrund Porenbeton-Mauerwerk oder Hochlochziegel, Dübel: $N_{Rk} = 0,75 \text{ kN}$
- Dübel auf die Plattenflächen gesetzt; $N_{Rk,WDVS} = 0,77 \text{ kN}$
- **Fall 1: Der Untergrund ist "eingeschränkt sicher"** – Es wird angenommen, dass die Klebung die Schubkräfte aus Eigenlast und hygrothermischen Einwirkungen aufnehmen kann. Es können Teilflächen mit Ablösung des Klebers vom Untergrund entstehen.
- **Fall 2: Der Untergrund ist "unsicher"** – Es wird angenommen, dass die Dübel – im Zusammenspiel mit dem Dämmstoff – alle Kräfte aufnehmen. Der Kleber bleibt unberücksichtigt.

Das sich rechnerisch ergebende Verformungsbild ist in Abb. 4.1 gezeigt.

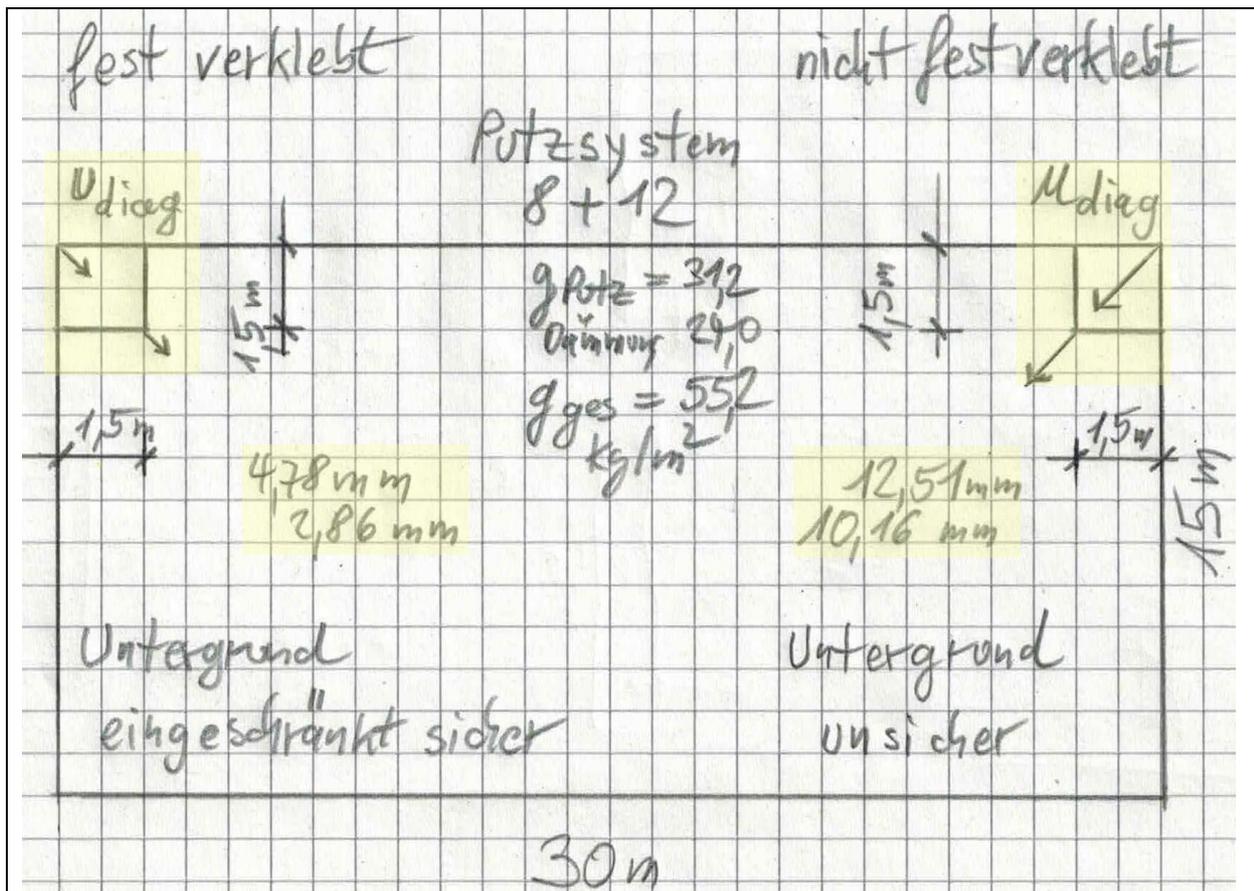


Abbildung 4.1: WDVS-Fassadenfläche - maßgebliche Verschiebungen in den Ecken;
oben links: System ist schubfest verklebt, Fehlstellen in der Verklebung ggfls. nur in kleinen Teilflächen; oben rechts: System ist nicht schubfest verklebt, es stellt sich eine große Verformung ein.

Im rechnerisch unverklebten System entstehen trotz der beiden angenommenen Schubtragmechanismen größere Verschiebungen, diese sind mit den Detaillösungen nicht kompatibel. Das System würde konstruktiv versagen.

Um die Schubkräfte aufnehmen zu können, bräuchte man in dem betrachteten Fall eines für die Dübel "schwachen" Untergrundes eine große Dübelmenge.

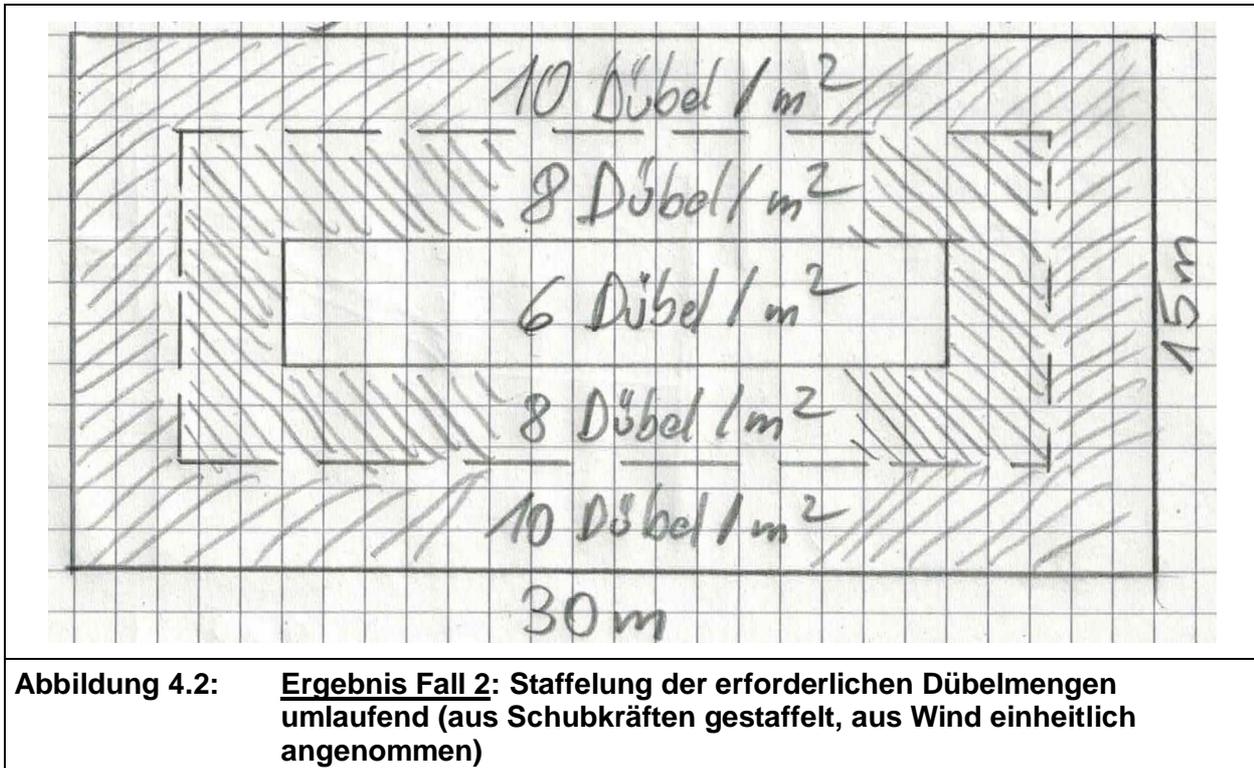


Abbildung 4.2: Ergebnis Fall 2: Staffelung der erforderlichen Dübelmengen umlaufend (aus Schubkräften gestaffelt, aus Wind einheitlich angenommen)

Diese Vorgehensweise ist untypisch, die Dübel sind für die entstehenden Lasten nicht zugelassen.

Für die gesamte Funktionstüchtigkeit des Systems – mit den gewählten Komponenten – ist es erforderlich, dass der Untergrund im wesentlichen einen ausreichend hohen Verbund ermöglicht.

Die im Rahmen der deutschen Zulassungen gestellten Anforderungen an den Untergrund (handwerklich zu prüfen und herzustellen: tragfähig, trocken, sauber, Oberfläche verträglich mit dem Kleber) scheinen notwendig, ausreichend und geeignet.

Dortmund, 03.03.2021

H. Oberhaus

Dr.-Ing. Heribert Oberhaus

Detlef Keßler

Dipl.-Ing. Detlef Keßler

ANLAGEN: keine