

Wohnhaus "Sentupada" - Ilanz

Systematische Folgeuntersuchung der Wasseraufnahme von extrudierten Polystyrol-Dämmplatten im Umkehrdach

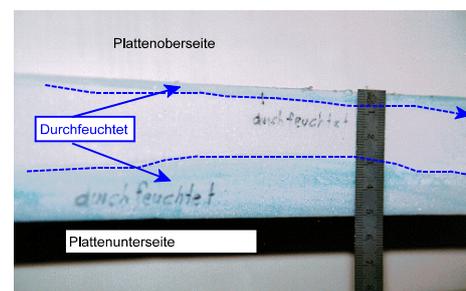
Weiterführende Untersuchungen zum Bericht 203100 vom 21.11.1997

Objekt: Wohnhaus "Sentupada"
CH-7130 Ilanz

Sachbearbeiter: Uwe Pernette
Dipl.-Ing.(FH), Bauphysiker



Bericht 203100 vom 21.11.1997



Inhalt	Seite
1. Ausgangssituation	3
2. Grundlagen	3
3. Konstruktive Ausgangssituation	4
4. Systematische Untersuchungen an drei Dämmplatten	5
4.1 Zusätzliche Entnahme von Stichproben auf dem gesamten Dach	5
4.2 Untersuchung der Feuchteverteilung in den Dämmplatten	6
4.3 Bestimmung der Feuchteverteilung	8
4.3.1 Wertebereich der Randzonenbreite	8
4.3.2 Vertikale Feuchteverteilung in der Randzone	8
4.4 Entnahmegewicht und zu erwartender Feuchtegehalt	9
5. Auswirkungen auf den Wärmeschutz des Daches	9
5.1 Massgebliche Wärmeleitfähigkeit beim Einbau der Dämmplatten	10
5.2 Einfluss der Feuchtigkeitsaufnahme auf die Wärmeleitfähigkeit	10
5.3 Resultierende Wärmeleitfähigkeiten	10
5.4 Einfluss auf den k-Wert des Daches	11
6. Ausgeführte Sanierung des untersuchten Flachdaches	12
7. Bewertung von Wärmedämmstoffen im Umkehrdach	13
7.1 Aktuelle Ergebnisse im Vergleich mit anderen Veröffentlichungen	13
8. Abschliessende Zusammenfassung und Empfehlungen	14
9. Literatur	16
Anhang A - Grafische Auswertungen und Tabellen	17

1. Ausgangssituation

Bei der Erarbeitung eines Konzeptes zur wärmetechnischen Sanierung der Gebäudehülle des Wohnhauses "Sentupada" in Ilanz wurde eine Beurteilung des Flachdachzustandes durchgeführt. Es ergab sich ein stark erhöhter Feuchtegehalt der im Jahre 1981 aufgebrachten Hartschaumplatten aus extrudierten Polystyrol. Im Jahr 1997 wurden an drei Dämmplatten die Feuchtegehalte verschiedener Proben bestimmt. Die Untersuchungsergebnisse sind im Bericht 203100 /1/ vom 21.11.1997 dargelegt. Im Rahmen der Qualitätssicherung der PWI erfolgte eine systematische Nachuntersuchung, um das Ausmass der vorgefundenen Feuchteaufnahme besser beurteilen zu können. Die vorliegenden Abklärungen beschäftigen sich daher mit folgenden weiterführenden Fragestellungen, die durch eine vertiefende, systematische Untersuchung der Dämmplatten vor der definitiven Sanierung des Flachdaches, abgeklärt werden konnten:

- ☛ Welches Ausmass haben die Randzonendurchfeuchtungen ?
- ☛ Wie hoch ist die wärmetechnische Relevanz der Durchfeuchtungen ?
- ☛ Liegen auf der gesamten Dachfläche die selben Verhältnisse vor ?
- ☛ Welche Schlussfolgerungen hinsichtlich des Langzeitverhaltens unter Feuchteaufnahme ergeben sich für die Anwendung von extrudierten Polystyrol-Dämmplatten im Umkehrdach.

2. Grundlagen

- 3 Probenentnahmen am Gebäude am 23.04.98.
- Gewichtsbestimmung der Stichprobe direkt nach Entnahme. Volumenbestimmung und Wägung im Labor.
- Lagerung und Trocknung der entnommenen Proben nach SIA 279 im Labor der PWI
- Volumenbestimmung der Proben im Labor der PWI.
- Systematische Entnahme und Wägung von 23 Dämmplatten vor der Sanierung im Juni 1998.
- SIA 279 - Wärmedämmstoffe (Materialprüfung, Toleranzen, Rechenwerte), A 1988.
- Prüfbericht P.2-17/87 zur Wasseraufnahme von Roofmate SL (Treibmittel FCKW) vom Forschungsinstitut für Wärmeschutz in München vom 21.12.87.
- Firmenschriften CH 291-003-G/CH/95 (1995) und EU4620-G-1179 (1979) der Dow Europe SA zum Dämmstoff Roofmate SL
- Diverse Fachliteratur (s.d. Kapitel 8)

3. Konstruktive Ausgangssituation

Der folgende Abschnitt ist der Vollständigkeit halber aus Bericht 203100 vom 21.11.1997 unverändert übernommen:

Das im Jahr 1974 erstellte Gebäude weist ein Flachdach von 430 m² über dem 4. Obergeschoss auf. Die Wärmedämmung wurde mit einer sehr geringen, zum Zeitpunkt der Erstellung üblichen, Dämmstoffdicke von 40 mm auf der Basis von Korkdämmplatten mit bituminöser Schwarzabdichtung erstellt. Im Jahr 1981 wurde das Dach wärmetechnisch durch Aufbringen einer Umkehrdachdämmung mit 50mm Roofmate SL verbessert. Der Umkehrdachaufbau wies zum Zeitpunkt der Untersuchung ein Alter von 17 Jahren auf. Den gesamten Dachaufbau gibt Tabelle 1 wieder.

Schicht	Bezeichnung	Dicke	Bemerkungen
[-]	[-]	[mm]	[-]
1	Kiesschüttung	40-80	Variabel
2	Vlies (ca 200 g/m ²)	-	
3	Roofmate SL	50	Sanierung im Jahr 1981
4	3-lagige Bituminöse Abdichtung	10	Ursprünglicher Dachaufbau
5	Korkdämmung	40	Korkdämmung völlig trocken
6	V-60 Bitumenbahn	3	Erstellt im Jahr 1974
7	Stahlbetondecke	160	

Tabelle 1: Dachaufbau Wohnhaus "Sentupada" - Ilanz

4. Systematische Untersuchungen an drei Dämmplatten

Am 23.04.1998 wurden drei Dämmplatten Roofmate SL (Lot Nr. 810526) auf dem untersuchten Flachdach entnommen. Abb. A1 im Anhang A zeigt die Entnahmeorte auf dem Dach. Die Platten wurden direkt nach der Entnahme gereinigt und gewogen. Tabelle A1 im Anhang A zeigt einen Vergleich der Entnahmegewichte und die daraus resultierenden, mittleren Feuchtegehalte der Dämmplatten. Die festgestellten, hohen Entnahmegewichte entsprachen dem bereits 1997 bei der ersten Untersuchung (Bericht 203100) festgestellten Wertebereich.

Aus den Feststellungen bei der Entnahme und den anschliessenden Laboruntersuchungen lassen sich folgende, wichtige Erkenntnisse zusammenfassen:

- Die Dämmplatte Nr. 1 mit dem höchsten Feuchtegehalt war mit einer stark bemoosten Kiesschicht (siehe Foto 1) bedeckt. Die Schichtdicke lag mit ca 8 cm Kiesschüttung über dem Mittelwert von 5 cm in der Dachfläche.
- Die Dämmplatte Nr. 2 mit dem mittleren, festgestellten Entnahmegewicht befand sich in der Nähe eines Dachablaufes und war erhöhten, ablaufenden Feuchtemengen ausgesetzt. Die Oberfläche wies eine mässige Moosbildung auf.



Foto 1: Entnahmestelle Dämmplatte Nr. 1

- Die Dämmplatte Nr. 3, die das geringste Gewicht aufwies, war zu ca 40% mit der bituminösen Abdichtung verklebt, so dass in diesem Bereich kein Unterströmen der Dämmplatte vorlag. Die Moosbildung war hingegen mit derjenigen der Dämmplatte Nr. 1 vergleichbar.
- Die über die Dämmplatten gemittelten, volumenbezogenen Feuchtegehalte liegen zwischen 2.5 und 10.2 Vol-%.
- Die bereits bei der ersten Entnahme festgestellte starke Randdurchfeuchtung bestätigte sich bei allen Dämmplatten.
- Bei der Dämmplatte Nr. 1 mit dem höchsten Gewicht lag ausserdem eine massive Durchfeuchtung über gesamte untere Plattenhälfte und unmittelbar unter der Schäumhaut an der Plattenoberseite vor (s. Foto Nr. 9 auf Seite 7).

4.1 Zusätzliche Entnahme von Stichproben auf dem gesamten Dach

Da alle bisher, entnommenen Dämmplatten grundsätzlich eine vergleichbare Feuchteaufnahme aufwiesen, wurden am 10.06.1998 zusätzlich weitere 23 Dämmplatten vom Dach entnommen und gewogen. Zielsetzung dieser Zusatzuntersuchung war eine Überprüfung, ob eine über das ganze Dach systematisch, vorliegende Erhöhung des Feuchtegehaltes vorliegt. In Abb. A2 - Anhang A sind die Entnahmeorte auf dem Dach dargestellt. Die festgestellten Dämmplattengewichte und mittleren Feuchtegehalte zeigt die zugehörige Tabelle A2.

Aus den festgestellten Gewichten der Platten dürfen folgende Schlüsse gezogen werden:

- Es ist davon auszugehen, dass grundsätzlich alle Dämmplatten auf dem Dach eine

stark erhöhte Feuchteaufnahme aufweisen.

- Der Wertebereich des **mittleren, volumenbezogenen Feuchtegehalts** der Dämmplatten auf dem untersuchten Dach ergibt sich zu:

Minimal: > 2.5 Vol-%
 Mittel: 5.0 Vol-%.
 Maximal: > 10.0 Vol-%

- Im Bereich von Dämmplatten mit den höchsten Feuchtegehalten wurde in der Regel eine starke Moosbildung (Foto1) im Kies über der Dämmplatte festgestellt. Dies deutet darauf hin, dass hier durch eine entsprechend behinderte Austrocknung ein wichtiger Einfluss besteht. Dieser Umstand wird auch in den Veröffentlichungen /2/ und /5/ als entscheidendes Kriterium für die langfristige Feuchteaufnahme angeführt.



Foto 2:
Entnahmestellen mit lokal verklebter Dämmplatte. Die Reste sind sichtbar.

- Bei Dämmplatten mit den geringsten Gewichten wurde festgestellt, dass diese in der Regel stellenweise mit der bituminösen Abdichtung verklebt waren, und so ein vollflächiges Unterströmen nicht stattfinden konnten, was die Möglichkeit zur Feuchtigkeitsaufnahme grundsätzlich reduziert. Dies gilt, wie Dämmplatte Nr. 3 zeigt, auch bei starker Moosbildung und behinderte Austrocknung.
- Praktisch auf dem ganzen Dach war das Filtervlies verschlamm.

4.2 Untersuchung der Feuchteverteilung in den Dämmplatten

Um die Verteilung der aufgenommenen Feuchtigkeit in den Dämmplatten zu untersuchen wurden die Dämmplatten ausgehend von den Ecken in kleinformartige Proben aufgeteilt. Sämtliche Proben wurden vor dem Trocknen auf einer Präzisionswaage gewogen und danach im Trockenschrank (Foto 4) bis zur Gewichtskonstanz analog SIA 279 bei 40°C gelagert. Nach Erreichen der Gewichtskonstanz wurden die Probekörper im Normklima von 23°C und 50% Luftfeuchtigkeit gelagert und anschließend einer Endwägung unterzogen. Die Probenaufteilung ist im Anhang A - Abb. A3 bis A5 im Detail zusammengestellt. Foto 3 zeigt die Dämmplatte Nr. 1 bei der Zerlegung in Proben.



Foto 3:
Dämmplatte Nr. 1 bei der Zerlegung in Proben



Foto 4:
Dämmplattenproben im Trockenschrank

In den Tabellen A3 bis A5 sind die Entnahmegewichte, das Trockengewicht und der resultierende Feuchtegehalt zusammengestellt. Aus den Erkenntnissen der durchgeführten Voruntersuchungen hinsichtlich der anzunehmenden Feuchteverteilung wurden die Proben in folgende Hauptzonen aufgeteilt:

Falz: Der Stufenfalz wurde von den Randproben abgetrennt und separat getrocknet. Foto 5 zeigt dies am Beispiel der Probe 3 der Dämmplatte Nr.1.

Rand: Die Randproben wurden jeweils mit einer Breite von 3 cm, der Dicke von 5 cm und variablen Längen zwischen 3cm und 15 cm abgetrennt.

Mitte: Die Proben zum Mittenbereich hin wurden ausgehend vom Rand mit Längen von 10 cm und variablen Breiten zwischen 3 cm und 15 cm erstellt. Die Fotos 6+7 zeigen die Proben Nr. 11,12 und 17 aus Dämmplatte Nr. 1 zu Zeitpunkt einer Kontrollwägung. Deutlich sichtbar sind die beim Trocknen im Trockenschrank aufgetretenen irreversiblen Verformungen der

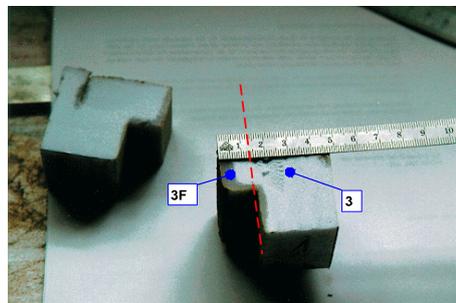


Foto 5:
Probe 3 und 3f von Dämmplatte Nr. 1



Foto 6:
Proben 11,12 und 17 aus Dämmplatte Nr.1 bei einer Kontrollwägung

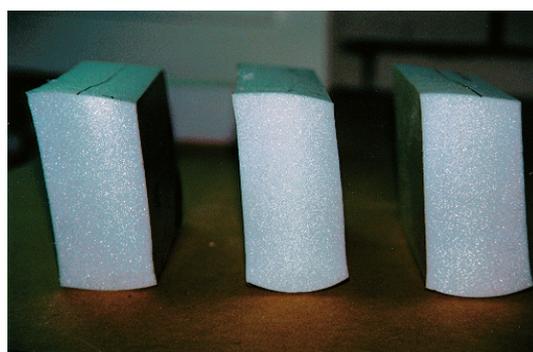


Foto 7:
Proben 11,12 und 17 aus Dämmplatte Nr.1 bei einer Kontrollwägung

Dämmplatten.

Vertikal: Auf Grund der festgestellten, starken Durchfeuchtung im unteren Plattenbereich (Foto Nr.9) der Dämmplatte Nr. 1 wurde an je einer Probe aus den Dämmplatten eine Probenteilung in vertikaler Richtung vorgenommen. Die Teilung erfolgte basierend auf der festgestellten Durchfeuchtungszone jeweils in Plattenmitte (Höhe 2.5 cm). Foto 8 zeigt die Probe Nr. 9 aus Dämmplatte Nr. 1 nach der Teilung bei der Wägung. Deutlich sichtbar der schmale Durchfeuchtungsbereich unmittelbar unter der Schäumhaut der Plattenoberseite



Foto 8:
Vertikale Teilung und Wägung der Probe 9

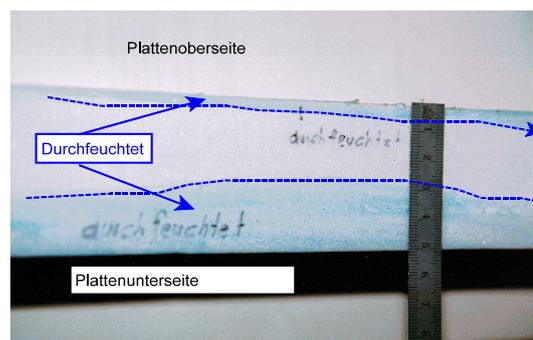


Foto 9:
Durchfeuchtung der Dämmplatte Nr. 1 im unteren und oberen Plattenbereich

4.3 Bestimmung der Feuchteverteilung

Der volumenbezogene Feuchtegehalt der entnommenen Proben zum Entnahmezeitpunkt wurde nach Abschluss der Vorlagerung und der Volumenbestimmung ermittelt. Die Volumenbestimmung wurde wegen der geometrischen Unregelmässigkeiten und der teilweise kleinen Abmessungen der Proben auf der Basis der Nennrohddichte gemäss Prüfbericht P.2-17/87 des FIW rechnerisch durchgeführt. Die resultierenden Ergebnisse sind im Anhang A in den Tabellen A3 bis A5 im Detail angegeben. Die ermittelten Feuchtegehalte wurden für jede Dämmplatte über die Hauptbereiche (Falz, Rand und Mittenzone) über die Volumen gewichtet gemittelt. Hieraus ergeben sich die Verhältnisse nach Tabelle 2 (Grafische Darstellung im Anhang A6).

Dämmplatte	Gewicht Entnahme [g]	Mittlerer Feuchtegehalt [Vol-%]			Randzonenbreite [cm]	Feuchteverteilung in Plattenmitte vertikal ¹⁾ [oben / unten]
		Falz	Rand	Mitte		
1	4900	45.5	14.4	7.5	3 - 5	15% / 85%
2	3480	19.0	11.0	5.1	2 - 4	35% / 65%
3	2710	20.9	4.4	2.5	1 - 3	40% / 60%

Tabelle 2: Mittlerer, volumenbezogener Feuchtegehalt in den untersuchten Dämmplattenzonen und Randzonenbreiten in Abhängigkeit vom Entnahmegewicht.

1) Die Feuchteverteilung vertikal gibt an wie viel Prozent der eingelagerten Feuchtigkeit in der Plattenmittenzone (ab ca 3 bis 4 cm Randabstand) in der oberen und unteren Plattenhälfte anzunehmen sind.

In den Randbereichen liegt eine weitgehend gleichmässige Verteilung in vertikaler Richtung vor.

4.3.1 Wertebereich der Randzonenbreite

- Der Wertebereich für die anzunehmende Randzonenbreite wurde durch eine Rückrechnung des Entnahmegewichtes der Dämmplatten mit den mittleren, gemessenen Feuchtegehalten in den unterschiedlichen Zonen und dem Abgleich mit den Laboruntersuchungen durchgeführt.
- Der angegebene Wertebereich beruht auf einer Parametervariation und deckt die mögliche Streuung bei den Dämmplatten ab.
- In Abb. A7 sind die festgestellten Randzonenbreiten schematisch dargestellt.

4.3.2 Vertikale Feuchteverteilung in der Randzone

- Auf Grund der Laboruntersuchungen darf darauf geschlossen werden, dass bei den gewählten Randprobenabmessungen eine weitgehend gleichmässige Verteilung der aufgenommenen Feuchtigkeit in vertikaler Richtung vorliegt.
- Eine deutliche Konzentration der aufgenommenen Feuchtigkeit, wie dies in der Plattenmitte bei Dämmplatten mit sehr hohem Feuchtegehalt festgestellt wurde, lag in den Randzonen nicht vor.

4.4 Entnahmegewicht und zu erwartender Feuchtegehalt

Aus den durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnissen gehen wir bei den Dämmplatten von einer näherungsweisen Beziehung der anzunehmenden Feuchtegehalte und Randzonenbreiten zum Entnahmegewicht der Dämmplatten aus. Tabelle 3 zeigt hierzu eine Klassifizierung nach dem mittleren Entnahmefeuchtegehalt der gesamten Dämmplatten und den zu erwartenden Feuchteverteilungen. Die Klasseneinteilung beruht auf den rechnerischen Parameterstudien auf der Basis der Untersuchungsergebnisse der Dämmplatte 1 bis 3. Die Feuchtegehalte für Rand und Mitte wurden aus den Ergebnissen der Dämmplatten 1 bis 3 der Tabelle 2 linear interpoliert. Für den Falz wurden die Ergebnisse der Probenentnahmen mit Ausnahme der Dämmplatte Nr. 1 direkt übernommen.

Klasse	Mittlerer Feuchtegehalt der gesamten Dämmplatte bei Entnahme [Vol-%] (Mittleres Plattengewicht)	Mittlerer Feuchtegehalt [Vol-%]			Randzonenbreite [cm]
		Falz	Rand	Mitte	
1	> 8.0% (4500 g)	35.0	13.5	6.7	4
2	5.0 - 8.0 % (3500 g)	20.0	11.0	5.1	3
3	< 5.0% (2500 g)	20.0	2.6	1.8	2

Tabelle 3: Anzunehmende Wertebereiche für die Feuchtegehalte und Randzonenbreiten in Abhängigkeit vom mittleren Feuchtegehalt der Dämmplatten bei der Entnahme am Objekt.

5. Auswirkungen auf den Wärmeschutz des Daches

Die vom Dach entnommenen Dämmplatten wurden nach ihrem mittleren Entnahmefeuchtegehalte in Anlehnung der Klasseneinteilung in Tabelle 3 ausgewertet. Demnach war auf dem Dach zu Zeitpunkt der Untersuchungen von den Verhältnissen der Tabelle 4 auszugehen. Für mehr als die Hälfte der Dämmplatten ein mittlerer Feuchtegehalt von unter 5 Vol-% bei der Entnahme anzunehmen (Mittelwert: 4.2 Vol-%). Ein kleiner Teil der Dämmplatten weist mittlere Feuchtegehalte über 8.0 Vol-% bei der Entnahme auf.

Klasse	Mittlerer Feuchtegehalt bei Entnahme [Vol-%]	Anteil Dämmplatten auf dem Dach [%]
1	> 8.0%	7
2	5.0 - 8.0 %	38
3	< 5.0%	55

Tabelle 4: Verteilung der Dämmplatten mit unterschiedlichem, mittlerem Feuchtigkeitsgehalt bei der Entnahme.

Zur Bestimmung der Auswirkungen auf den verbleibenden Wärmeschutz wurden zunächst die mittleren, flächengewichteten Wärmeleitfähigkeiten für die verschiedenen Fälle nach den Tabelle 3 und 4 bestimmt. Die physikalischen Kennwerte für die Berechnungen wurden nach den im folgenden erläuterten Gesichtspunkten gewählt.

5.1 Massgebliche Wärmeleitfähigkeit beim Einbau der Dämmplatten

Für die massgebliche Wärmeleitfähigkeit λ_{10tr} der untersuchten Dämmplatten wurde die Angabe

aus der Firmenschrift EU 4620-G-1179 der DOW-Chemical aus dem Jahre 1979 von $\lambda_{10tr} = 0.028 \text{ W/mK}$ übernommen. Es existieren hierzu auch andere Angaben (z.B Firmenschrift DOW-Chemical CH 291-003-G/CH-03/95 mit $\lambda_{10tr} = 0.027 \text{ W/mK}$ aus dem Jahre 1995). Da die untersuchten Dämmplatten jedoch im Jahre 1981 eingebaut wurden, erscheint die Verwendung der Veröffentlichung aus dem Jahre 1979 sinnvoller, da für abweichende Angaben jüngeren Datums neben Messtoleranzen auch Produktionsänderungen verantwortlich sein können und im Hinblick auf die untersuchten Platten eine falsche Ausgangslage betrachtet würde.

Da die untersuchten Dämmplatten ein ausreichendes Alter (17 Jahre) aufweisen, wurde für den Zuschlagswert Z nach SIA 279 - Wärmedämmstoffe, Ausgabe 1988 der minimale Wert von 5% angesetzt. Diese Annahme darf näherungsweise einer Vernachlässigung der im Zuschlagswert Z normalerweise mit berücksichtigten Gleichgewichtsfeuchte bei der Anwendung der Dämstoffplatten gleichgesetzt werden.

Hieraus ergibt sich die rechnerische Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda_{rech}^* = 0.0294 \text{ W/mK}$$

die für die weiterführenden Betrachtungen als Ausgangsbasis angesetzt wird.

5.2 Einfluss der Feuchtigkeitsaufnahme auf die Wärmeleitfähigkeit

Über die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit durch Feuchteeinlagerung für extrudierte Polystyrol-Dämmstoffe existieren zahlreiche Veröffentlichungen und Untersuchungen. Bis zu einem volumenbezogenen Feuchtegehalt von 25% bewegen sich die Angaben zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit in Folge Feuchteeinlagerung im Dämmstoff in einem begrenzten Rahmen und weisen einen leicht progressiven Verlauf. Messwerte sind bis zu einem volumenbezogenen Feuchtegehalt von 20% bekannt. In der Untersuchung /2/ wurde basierend der Untersuchung von C. Hay /3/ eine polynomiale Näherungskurve abgeleitet. Oberhalb von 20% verwenden die Autoren aus /2/ wegen fehlender weiterer Angaben eine exponentielle Annäherung, die keine messtechnischen Basiswerte aufweist. Da sich die mittleren, volumenbezogenen Feuchtehalte der untersuchten Dämmplatten (Ausnahme Falzzonen in stark durchfeuchteten Dämmplatten) unterhalb von 25% bewegen wird für die Betrachtungen ausschliesslich die polynomiale Näherung nach den Messwerten von Hay /3/ verwendet:

$$\lambda_{Hays}(U) = \lambda_o (1 + U \times 3.792 + U^2 \times 11.043)$$

5.3 Resultierende Wärmeleitfähigkeiten

Die resultierenden Wärmeleitfähigkeiten wurden für die 3 Entnahmefeuchteklassen mit den mittleren, volumenbezogenen Feuchtegehalten der Tabelle bestimmt. Es ergibt sich die Situation nach Tabelle 5. Für Dämmplatten mit sehr hohen Feuchtegehalten bei der Entnahme ist demnach mit einer feuchtigkeitsbedingten, mittleren Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von über 46 % zu rechnen. Diese Art von Platten stellt beim vorliegenden Dach einen kleinen Anteil mit ca 7% nach Tabelle 4 dar. Für den bereits wesentlich grösseren Anteil von rund 38% des Dachs tritt immer noch eine Steigerung von über 30% auf. Bei dem grössten Teil des Daches ist von einer gut 11%igen Zunahme auszugehen.

Feuchte Klasse [-]	Wärmeleitfähigkeit Resultierend in Zonen			Wärmeleitfähigkeit Dämmplatte		Abweichung zu Plattenmitte
	Falz [W/mK]	Rand [W/mK]	Mitte [W/mK]	Mittel [W/mK]	Zuwachs [%]	Fehler [%]

Trocken				0.0294	0.00%	0.00%
1	0.1082	0.0504	0.0383	0.0431	46.69%	12.52%
2	0.0647	0.0456	0.0359	0.0383	30.43%	6.72%
3	0.0647	0.0325	0.0315	0.0328	11.65%	4.17%

Tabelle 5: Resultierende Wärmeleitfähigkeit abhängig von der Entnahmefeuchteklasse und den untersuchten Zonen der Dämmplatten.

Die Ergebnisse sind im Anhang Abb A8 bis A8b grafisch ausgewertet und zusammengestellt. Aus den festgestellten Verhältnissen sind folgende Schlussfolgerungen zu ziehen:

- Bei Dämmplatten mit Entnahmefeuchtegehalten der Klasse 1+2 (ca 45% der Dachfläche) liegt der Mittelwert für die Wärmeleitfähigkeit der Dämmplatten deutlich über 0.035 W/mK. (Damit wird z.B. der ehemals zulässige Rechenwert für FCKW-geschäumte Umkehrdachdämmstoffe in Deutschland überschritten).
- Bei Dämmplatten mit Entnahmefeuchtegehalten der Klasse 3 (ca 55% der Dachfläche) liegt der Mittelwert für die Wärmeleitfähigkeit der Dämmplatten noch unter 0.035 W/mK. (Damit z.B. wird ehemals zulässige Rechenwert für FCKW-geschäumte Umkehrdachdämmstoffe in Deutschland derzeit noch eingehalten).
- Die letzte Spalte der Tabelle 5 weist aus, dass bereits bei der Entnahmeklasse 3 mit Entnahmefeuchtegehalten unter 5.0% eine Erhöhung um mehr als 4% gegenüber der in allein der Plattenmitte zu erwartenden Wärmeleitfähigkeit vorliegt.

Unabhängig vom Entnahmefeuchtegehalt der Dämmplatten wird dadurch deutlich, dass eine alleinige Beurteilung der Wärmeleitfähigkeit aus Plattenproben, die aus der Plattenmitte entnommen werden, zu Fehlbeurteilungen führt. Das Ausmass des Fehlers ist abhängig vom Entnahmefeuchtegehalt der Dämmplatten. Bei Dämmplatten der Entnahmefeuchteklassen 1+2 ist eine zunehmende Bedeutung des Randeinflusses (Zonenverbreiterung und höhere Feuchteinlagerung) festzustellen.

5.4 Einfluss auf den k-Wert des Daches

Mit den in Tabelle 4 ausgewiesenen Anteilen von Dämmplatten mit unterschiedlichem Entnahmefeuchtegehalten wurde die resultierende, mittlere k-Wertzunahme für das Dach ermittelt. Tabelle 6 zeigt eine Zusammenfassung der Situation.

Es sind folgende Feststellungen dazu zu machen:

- Bei 55% der Dämmplatten (Entnahmefeuchteklasse 3) tritt durch die Feuchteaufnahme eine Verschlechterung des k-Wertes um 5.9% des Ausgangswertes auf.
- Bei 38% der Dämmplatten (Entnahmefeuchteklasse 2) tritt durch die Feuchteaufnahme eine Verschlechterung des k-Wertes um 15.3% des Ausgangswertes auf.
- Bei 7% der Dämmplatten (Entnahmefeuchteklasse 1) tritt durch die Feuchteaufnahme eine Verschlechterung des k-Wertes um 22.5% des Ausgangswertes auf.
- Im Mittel wurde der k-Wert des Daches durch die Feuchtigkeitsaufnahme um 10.7% bis zu Durchführung der Sanierung verschlechtert. Dies ist gleichzusetzen mit einer durchschnittlichen, jährlichen Verschlechterung von ca 0.63 % des ursprünglichen k-Wertes

beim Einbau.

Entnahmefeuchte [-]	Anteil [%]	Fläche [m ²]	k-Wert [W/m ² K]	Zunahme [%]
Klasse 1	7.00%	28	0.429	22.5%
Klasse 2	38.00%	152	0.404	15.3%
Klasse 3	55.00%	220	0.371	5.9%
Mittel Ist			0.387	10.7%
Mittel Trocken			0.35	

Tabelle 6: Auswirkungen der durchfeuchteten Dämmplatten auf den k-Wert des Dachs.

6. Ausgeführte Sanierung des untersuchten Flachdaches

Die noch offenen Fragestellungen hinsichtlich des Sanierungssystems aus der Voruntersuchung(Bericht 203100) konnten mit der aktuellen Untersuchung wie folgt beantwortet werden:

-  Die in der Voruntersuchung aus dem Jahre 1997 festgestellten Randzonendurchfeuchtungen der extrudierten Polystyrolämmplatten konnten mit den vorliegenden Ergebnissen vollumfänglich bestätigt werden.
-  Auf Grund der erweiterten Probenentnahmen erwies sich, dass auf dem gesamten Dach eine teilweise massive Durchfeuchtung der Dämmplatten vorlag.

Beim Entscheid zur Wahl des Wärmedämmsystems wurden neben den technischen Aspekten seitens der Bauherrschaft die Investitionskosten als wesentliche Einflussgrösse zur Entscheidungsfindung angeführt. Als Sanierungssystem wurde, trotz der bauphysikalischen Langzeitnachteile, wieder ein Umkehrdachsystem gewählt. Gründe dafür waren:

- Die bestehende Dachabdichtung auf der ursprünglichen Korkdämmung auf dem Flachdach war in einem sehr guten Zustand. Beschädigungen mit Wassereinbrüchen waren nie aufgetreten.
- Die Sanierungsdurchführung konnte optimal überwacht werden, um Beschädigungen der Dachhaut zu vermeiden. Sichtbare Schwachstellen in der bituminösen Dachhaut konnten lokal instand gesetzt werden.
- Der möglichen deutlichen Verschlechterung der Wärmedämmeigenschaften des Umkehrdachsystems im Laufe der Zeit wurde durch die Wahl einer 2 cm höheren Dämmschichtdicke (Einbau von 14 cm statt 12 cm) begegnet. Hierdurch können Langzeiteffekte, wie sie beim untersuchten Dachaufbau festgestellt wurden, für einen Zeitraum von ca 20 Jahren kompensiert werden.

7. Bewertung von Wärmedämmstoffen im Umkehrdach

In den letzten Jahren wurden intensive Diskussionen über die Bewertung des tatsächlichen, langfristig realisierbaren Wärmeschutzes der Umkehrdachsysteme geführt. Die Diskussionen befassen sich schwerpunktmässig mit folgenden Fragestellungen:

-  Wie ist der Zuschlag für den Wärmeverlust durch Unterströmen der Dämmplatten - Δk -

Wert - in zukünftigen Regelwerken neu zu bewerten. Veröffentlichungen (z.B /4/) zu diesem Thema geben Anlass zur Annahme, dass Zuschläge, die bislang in verschiedenen Regelwerken zur Anwendung kommen, häufig zu gering ausfallen.

- ☛ Wie verändert sich die Wärmeleitfähigkeit der Umkehrdachdämmstoffe infolge Feuchteaufnahme in der Langzeitbetrachtung. Hierzu bieten verschiedene Veröffentlichungen /2/, /5/ Ansätze zur Beurteilung.
- ☛ Wie wirkt sich die Verwendung des Schäumgases CO₂ für extrudierte Polystyrol-Hartschaumdämmstoffe mit Zellgas Luft auf die Änderung der Wärmeleitfähigkeit im Langzeitverhalten der Dämmplatten aus /2/.

7.1 Aktuelle Ergebnisse im Vergleich mit anderen Veröffentlichungen

- Zieht man die Ergebnisse der Untersuchungen /2/ und /5/ für die zu erwartenden Feuchtegehalte von extrudierten Polystyrol-Dämmplatten im untersuchten Dachaufbau zu einem Vergleich heran, wird deutlich, dass einige der dort aufgezeigten Wertebereiche als realistisch einzuschätzen sind. Es lässt sich unter anderem der entscheidende Einfluss der oberen Nutzschicht auf die Feuchteaufnahme nachvollziehen.
- Die von Eggenberger in /2/ für den Regelquerschnitt ausgewiesenen Zunahmen im Feuchtegehalte der Dämmplatten erscheinen uns, angesichts der am untersuchten Dach festgestellten Verhältnisse, als sehr realistisch und praxisnah. Das dort verwendete Rechenmodell berücksichtigt den eminent wichtigen Einfluss der oberen Nutzschicht auf den Feuchthaushalt der Dämmplatte offensichtlich in ausreichendem und richtigem Masse.
- In den Berechnungen von Künzel /5/ ist festzustellen, dass die Modelle für "normal" funktionierende obere Nutzschichten im Hinblick auf die Praxis eine deutlich zu günstige Einschätzung ergeben. Die Angaben zur Feuchteaufnahme in der Veröffentlichung /5/ basieren auf Modellrechnungen und Freilandversuchen. Die dort ausgewiesenen Verhältnisse legen nahe, dass die angesetzten Austrocknungsmöglichkeiten in den zugehörigen Modellrechnungen wesentlich zu günstig im Hinblick auf die praktischen Verhältnisse bei Umkehrdach zu bewerten sind. Im Regelfall darf hier weder von einem regelmässigen Unterhalt zur Vermeidung ungewollten Pflanzenwachstums noch von einer dauerhaften Vermeidung der Filtervliesverschlämmung ausgegangen werden. Praxisnahe Beurteilungen mit dem in /5/ verwendeten Modell sind bei einer dichten, langfristig nassen Nutzschicht auf der Dachoberseite anzusetzen.
- Aus den aktuellen Untersuchungen ist zu ergänzen, dass eine verhältnismässig geringe Feuchteaufnahme auch dann stattfindet, wenn die Dämmplatten bei bituminösen Dachabdichtungsebene mit der wasserführenden Ebene lokal verklebt sind (Auflast). Hier kann trotz ungünstiger Verhältnisse eine unerwartet tiefe Feuchteaufnahme stattfinden.

8. Abschliessende Zusammenfassung und Empfehlungen

Die vorliegende Untersuchung ergab Beurteilungskriterien, die bei der zukünftigen Bewertung und Neugestaltung von Regelwerken hinsichtlich des Langzeitverhaltens von Umkehrdachwärmedämmsystemen mit berücksichtigt werden sollten:

- In der Rand- und Falzzone von extrudierten Dämmplatten im Umkehrdach sind gegenüber der Mittenzone deutlich höhere Feuchtegehalte zu erwarten. Die Ursache dafür ist ein verstärktes Eindringen an den Schnittkanten der Plattenstösse. Bei Dämmplatten mit Schäumhaut kommt zu dem verstärkten Eindringen eine stark behinderte Austrocknungsmöglichkeit infolge des erhöhten Diffusionswiderstandes zur Plattenoberseite hin dazu.

- Die mittlere, effektive Wärmeleitfähigkeit der Dämmplatten hängt stark von der aufgenommen Feuchtigkeit in den Randzonen und im Falz ab. Die alleinige Überprüfung von Proben aus der Plattenmitte oder die Betrachtung mit eindimensionalen Modellrechnungen ist nicht ausreichend.

Beim untersuchten Dach ergibt sich, selbst bei Dämmplatten mit geringer Feuchteaufnahme, eine Steigerung der effektiven, mittleren Wärmeleitfähigkeit für eine Dämmplatte um mehr als 4% gegenüber dem Wert in der Plattenmitte.

- Die Randzone mit erhöhter Feuchtigkeitseinlagerung kann Werte zwischen 1 bis 5 cm, gemessen vom Plattenrand ohne Falz aufweisen. Die festgestellten, volumenbezogenen Feuchtegehalte liegen dort 1.5 bis 2 mal höher als in der Plattenmitte.

- Die zusätzlichen Wärmeverluste, die aus einer erhöhten Feuchteeinlagerung im Falz- und Randzonenbereich resultieren, können bei einem Umkehrdach mehr als 10% des normalerweise über Plattenmitte auftretenden Wärmeverlustes betragen.

- Die Bereiche der Stufenfälze müssen bei der Beurteilung der mittleren Wärmeleitfähigkeit einer Dämmplatte grundsätzlich mit einem volumenbezogenen Feuchtegehalt über 20% angesetzt werden.

- Auf Grund der festgestellten Unterschiede im Feuchtegehalt der Dämmplatten und der vorgefundenen Entnahmebedingungen wird erneut deutlich, dass die Berücksichtigung der verwendeten, oberen Nutz- und Schutzschichten bei der Beurteilung des langfristigen realisierbaren Wärmeschutzes im Umkehrdach in differenziertem Masse notwendig ist.

- Die beim vorliegenden Dachaufbau im System eines DUO-Dachs festgestellten Feuchteaufnahmen dürfen grundsätzlich auf ein konventionelles, reines Umkehrdachsystem übertragen werden. Auf Grund des, beim konventionellen Umkehrdach, vorliegenden höheren Dampfdruckgefälles, sind, bei sonst gleichen Randbedingungen, sogar noch höhere Feuchteeinlagerungen in der Praxis zu erwarten.

Berücksichtigt man die aus der vorliegenden Untersuchung gewonnenen, ergänzenden Einflüsse der zusätzlichen Feuchtaufnahme von extrudierten Hartschaumdämmplatten in den Plattenrandbereichen, so sind folgende, allgemeine Feststellungen zu machen:

- ☛ Die derzeit geltenden Regelungen für die Zuschläge auf die Wärmeleitfähigkeit zur Korrektur der zu erwartenden Feuchtaufnahme von extrudiertem Hartschaum in Umkehrdächern sind bei weitem zu undifferenziert. Es ist zu fordern, dass zukünftig eine klare Zuordnung der Höhe der Zuschläge und der verwendeten, oberen Nutz- und Schutzschichten erfolgt. Dabei muss auch einer anzunehmenden, inhomogenen Feuchteverteilung in den Dämmplatten Rechnung getragen werden.
- ☛ Die feststellbaren Größenordnungen für die Verschlechterung des tatsächlichen, langfristig realisierbaren Wärmeschutzes von Umkehrdächern mit extrudiertem Hartschaum und gleichzeitig, fehlende Regelungen für den unterschiedlichen Einfluss der Schutz- und Nutzschichten (wie z.B. in deutschen bauaufsichtlichen Zulassungsbescheiden) führen in der Praxis zu Fehlentscheidungen hinsichtlich der Beurteilung des erreichbaren Wärmeschutzniveaus.
- ☛ Neben Fehleinschätzungen des erreichbaren, langfristigen Wärmeschutzes von Umkehrdachsystemen, werden hierdurch Wettbewerbsverzerrungen zu Ungunsten des Warmdachaufbaus verursacht. Erst wenn die Verschlechterung der Wärmedämmeigenschaften der eingesetzten extrudierten Hartschaumdämmstoffe in Folge Feuchtaufnahmen systemgerecht in den entsprechenden Zulassungen und Regelwerken berücksichtigt werden, kann diesem Umstand zielführend begegnet werden.
- ☛ Im Rahmen der Harmonisierung der europäischen Normen sollte dringend die Gelegenheit genutzt werden, die heutigen Unstimmigkeiten bei der Beurteilung des Umkehrdaches zu beseitigen.
- ☛ Eine Größenordnung für einen Zuschlag Z_F auf die Wärmeleitfähigkeit λ_{10tr} von extrudiertem Hartschaum bei Anwendung im Umkehrdach in Folge Feuchtaufnahme unter Berücksichtigung der inhomogenen Feuchteverteilung in den Dämmplatten gibt Tabelle 7 wieder. Dabei ist zu beachten, dass der Basiszuschlag $Z_0 = 5\%$ für die Einflüsse aus der üblichen Anwendung, Alterung und Rohdichtetoleranzen noch zusätzlich zu berücksichtigen ist.

Obere Schutz- und Nutzschicht	Bekiest Platten auf Stelzlagern	Platten im Splittbett Extensiv begrünt	Befahrte Beläge Intensive Begrünung
Zuschlag Z_F	> 10%	>15%	>25%
Zuschlag Z_0	5%		
Zuschlag Z_{total}	>15%	>20%	>30%

Tabelle 7: Größenordnung für einen Zuschlag Z_{total} auf die Trockenwärmeleitfähigkeit λ_{10tr} von extrudierten Hartschaumdämmstoffen infolge Feuchtaufnahme und Feuchteverteilung, Alterung, Anwendung und Rohdichtetoleranz.

Maienfeld, 06.05.1999

Uwe Pernette, Dipl.-Ing.(FH), Bauphysiker

9. Literatur

- /1/ Pernette + Wilhelm Ingenieure
Wohnhaus "Sentupada" - Dok 203100
Wasseraufnahme extrudierter Poystyrolplatten
Maienfeld, 1997

- /2/ Eggenberger A.
Feuchtehaushalt des Umkehrdaches
Eggenberger Bauphysik AG, CH-3401 Burgdorf
September 1996

- /3/ Hay C.
Feuchtigkeitsaufnahme und ihre Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit der
extrudierten Polystyrol-Isolierungen
Universität von Alaska
Fairbanks, 1984

- /4/ Pernette-Heim U. , Diebold F.
Neubewertung des Δk -Wertes bei Umkehrdächern
Bauphysik Heft 6, 1995 und Heft 1, 1996

- /5/ Dr. Ing. Künzel Helmut
Zum heutigen Stand der Kenntnisse über das UK-Dach
Bauphysik Heft 17, 1995 Heft 1

A. Anhang - Grafische Dokumentation und Auswertung

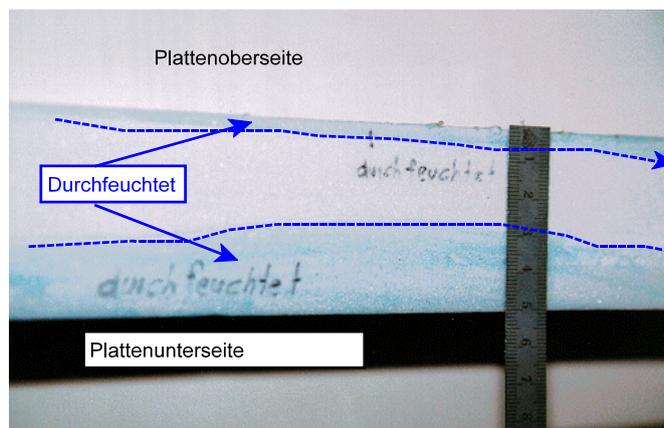
Wohnhaus "Sentupada" - Ilanz

Systematische Folgeuntersuchung der Wasseraufnahme von extrudierten Polystyrol-Dämmplatten im Umkehrdach

Anhang A

Objekt: Wohnhaus "Sentupada"
CH-7130 Ilanz

Sachbearbeiter: Uwe Pernette
Dipl.-Ing.(FH), Bauphysiker



<u>Inhalt</u>	<u>Seite</u>
A1 - Dachaufsicht und Entnahmeorte für Studien der Feuchteverteilung	A2
A2 - Entnahmeorte zusätzlicher Vergleichsplatten	A3
A3 - Systematische Untersuchungen der Dämmplatte Nr. 1	A4
A4 - Systematische Untersuchung der Dämmplatte Nr. 2	A5
A5 - Systematische Untersuchung der Dämmplatte Nr.3	A6
A6 - Grafische Ergebnisdarstellung zur Feuchteverteilung	A7
A7 - Feuchtigkeitszonen der Dämmplatten	A8
A8 - Auswirkungen auf die resultierende Wärmeleitfähigkeit	A9

A1 - Dachaufsicht und Entnahmeorte für Studien der Feuchteverteilung

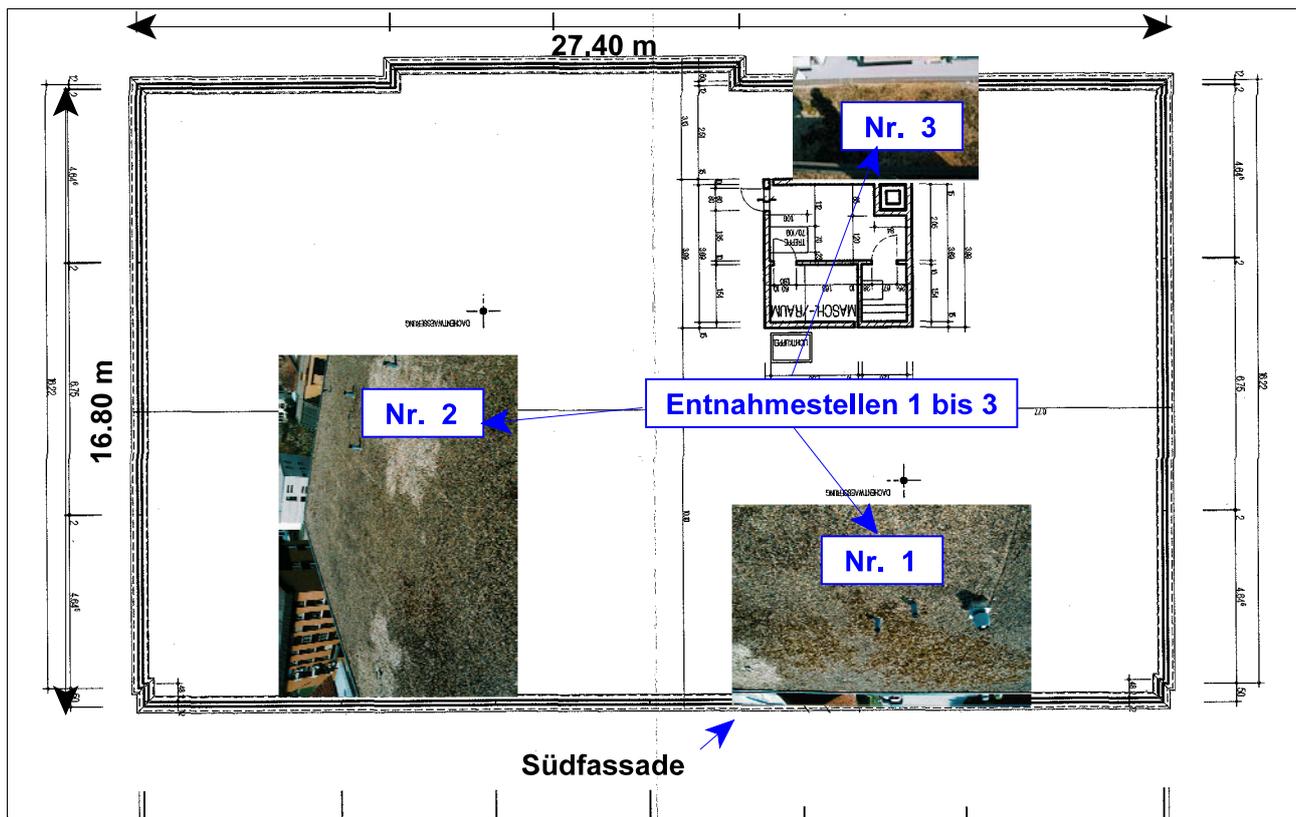


Abb A1: Dachdraufsicht mit den Entnahmestellen der Dämmplatten Nr. 1 bis 3.

Mittlerer Feuchtegehalt der Proben bei der Entnahme

Entnahmetag: 23.04.1998

Entnahmezeit: 10.00 bis 12.00 Uhr

Dämmplatte Nr.	Entnahmegewicht entstaubt [g]	Normalgewicht trocken ¹⁾ [g]	Rechnerischer Wasserinhalt [g]	Mittlerer rechnerischer Feuchtegehalt ¹⁾ [Vol-%]	
1	4900	1193	3707	10.2%	
2	3480		2287	6.3%	
3	2710		1517	4.2%	
Proben aus dem Jahr 1997					
1-1997	4190		2997	8.3%	
2-1997	2650		1457	4.0%	
3-1997	2100		907	2.5%	

Tabelle A1: Gesamtgewicht und Wasserinhalt der Dämmplatten Nr. 1 bis 3 bei der Entnahme am 23.04.1998. Zum Vergleich sind die Werte, der im Jahr 1997 entnommenen ersten drei Dämmplattenproben gemäss Bericht 203100 mit angegeben.

1) Basierend auf einer mittleren Trockenrohichte von $\rho = 33 \text{ kg/m}^3$ gemäss Prüfbericht P.2-17/87 FIW München und Nennvolumen von $V = 36136 \text{ cm}^3$

A2 - Entnahmeorte zusätzlicher Vergleichsplatten

Zur Beurteilung der Verteilung der mittleren Wassergehalte in den Dämmplatten auf dem Dach wurden unmittelbar vor der Durchführung der wärmetechnischen Gebäudesanierung im Juni 1998 weitere 23 Dämmplatten direkt auf dem Dach gewogen. Abb. A2 zeigt die Lage der Dämmplatten. Tabelle A2 zeigt die festgestellten Gewichte und rechnerischen, mittleren Feuchtegehalte. Mittlerer Feuchtegehalt der Proben bei der Entnahme

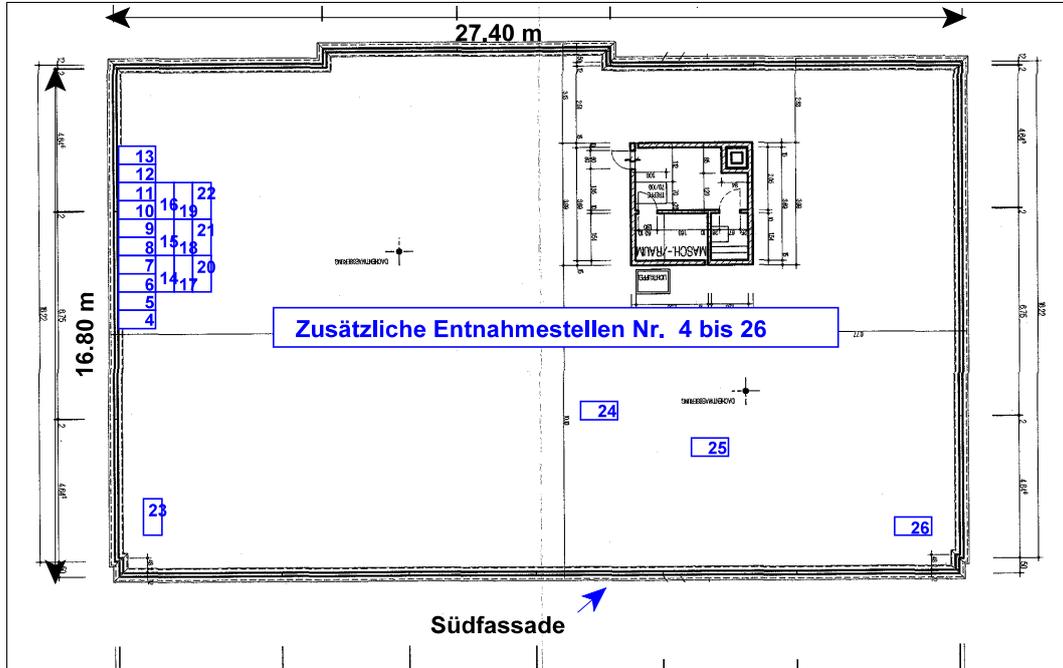


Abb A2: Dachdraufsicht mit Entnahmestellen der Dämmplatten Nr. 4 bis 26.

Entnahmetag: 10.06.1998

Entnahmezeit: 9.00 bis 12.00 Uhr

Dämmplatte Nr.	Entnahmegewicht entstaubt [g]	Normalgewicht trocken ¹⁾ [g]	Rechnerischer Wasserinhalt [g]	Mittlerer rechnerischer Feuchtegehalt ¹⁾ [Vol-%]
4	2100	1193	907	2,51%
5	2400		1207	3,34%
6	3150		1957	5,42%
7	3100		1907	5,28%
8	3400		2207	6,11%
9	2850		1657	4,59%
10	3600		2407	6,66%
11	3550		2357	6,52%
12	2850		1657	4,59%
13	3700		2507	6,94%
14	3800		2607	7,21%
15	2600		1407	3,89%
16	2100		907	2,51%
17	3650		2457	6,80%
18	2600		1407	3,89%
19	2600		1407	3,89%
20	2850		1657	4,59%
21	2800		1607	4,45%
22	2200		1007	2,79%
23	3200		2007	5,55%
24	2450		1257	3,48%
25	3150		1957	5,42%
26	2850		1657	4,59%

Tabelle A2: Gesamtgewicht und Wasserinhalt der Dämmplatten Nr. 4 bis 26 bei der Entnahme am 10.06.1998.

1) Basierend auf einer mittleren Trockenrohddichte von $\rho = 33 \text{ kg/m}^3$ gemäss Prüfbericht P.2-17/87 FIW München und Nennvolumen von $V = 36136 \text{ cm}^3$

A3 - Systematische Untersuchungen der Dämmplatte Nr. 1

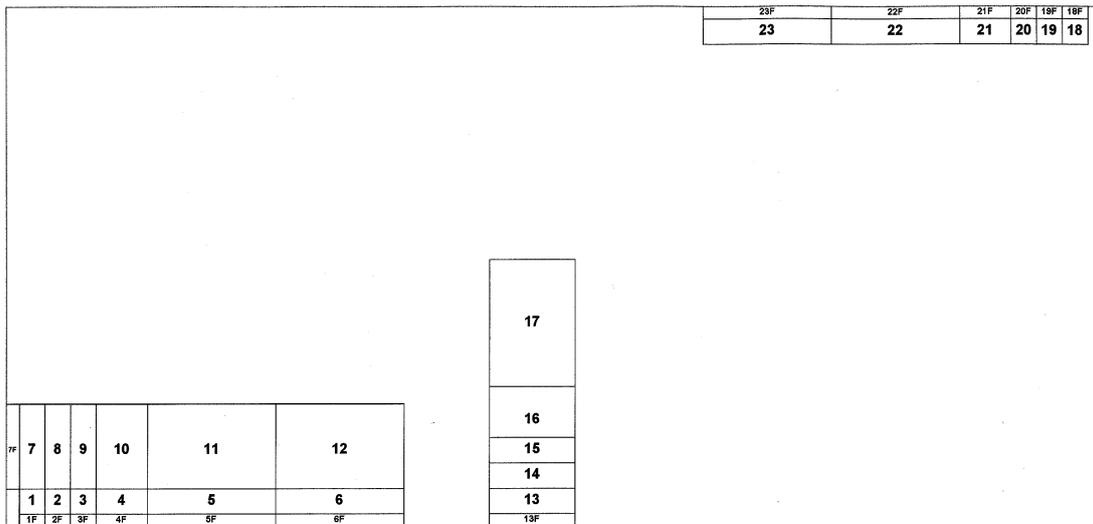


Abb. A3: Dämmplatte Nr. 1 - Systematische Aufteilung in Trocknungselemente

Probe	Volumen [cm ³]	Gewicht trocken [g]	Gewicht feucht [g]	Feuchtegehalt [Vol-%]
1-Falz	11.4	0.4	9.9	83.82%
1-Ecke	48.5	1.6	8.7	14.64%
2-Falz	9.8	0.3	4.9	46.45%
2-Ecke	51.5	1.7	10.7	17.47%
3-Falz	10.6	0.4	4.8	41.96%
3-Ecke	51.5	1.7	8	12.23%
4-Falz	23.5	0.8	9.8	38.43%
4-Ecke	100.0	3.3	14.5	11.20%
5-Falz	60.6	2.0	26.7	40.76%
5-Ecke	254.5	8.4	39.3	12.14%
6-Falz	66.7	2.2	27.3	37.65%
6-Ecke	248.5	8.2	36.3	11.31%
7-Falz	42.4	1.4	21.5	47.38%
7-Ecke	145.5	4.8	21.2	11.28%
8	157.6	5.2	18	8.12%
9oben	72.7	2.4	3.7	1.79%
9unten	72.7	2.4	13.6	15.40%
10	303.0	10.0	39.2	9.64%
11	760.6	25.1	98.3	9.62%
12	742.4	24.5	96.1	9.64%
13-Falz	43.9	1.5	17.7	36.98%
13-Ecke	151.5	5.0	23.6	12.28%
14	142.4	4.7	18.7	9.83%
15	148.5	4.9	19.8	10.03%
16	309.1	10.2	40.7	9.87%
17	760.6	25.1	89.8	8.51%
18-Falz	15.2	0.5	13.5	85.80%
18-Ecke	42.4	1.4	13	27.34%
19-Falz	10.6	0.4	4.8	41.96%
19-Ecke	37.9	1.3	6.8	14.65%
20-Falz	9.1	0.3	5.4	56.10%
20-Ecke	39.4	1.3	9	19.55%
21-Falz	19.7	0.7	9.5	44.93%
21-Ecke	83.3	2.8	20	20.70%
22-Falz	54.5	1.8	28.8	49.50%
22-Ecke	206.1	6.8	44.6	18.34%
23-Falz	53.0	1.8	25.7	45.16%
23-Ecke	212.1	7.0	41.2	16.12%

Tabelle A3: Dämmplatte Nr.1 mit Probenvolumen, Probengewicht vor und nach der Trocknung sowie resultierender, volumenbezogener Feuchtegehalt bei der Entnahme.

A4 - Systematische Untersuchung der Dämmplatte Nr. 2

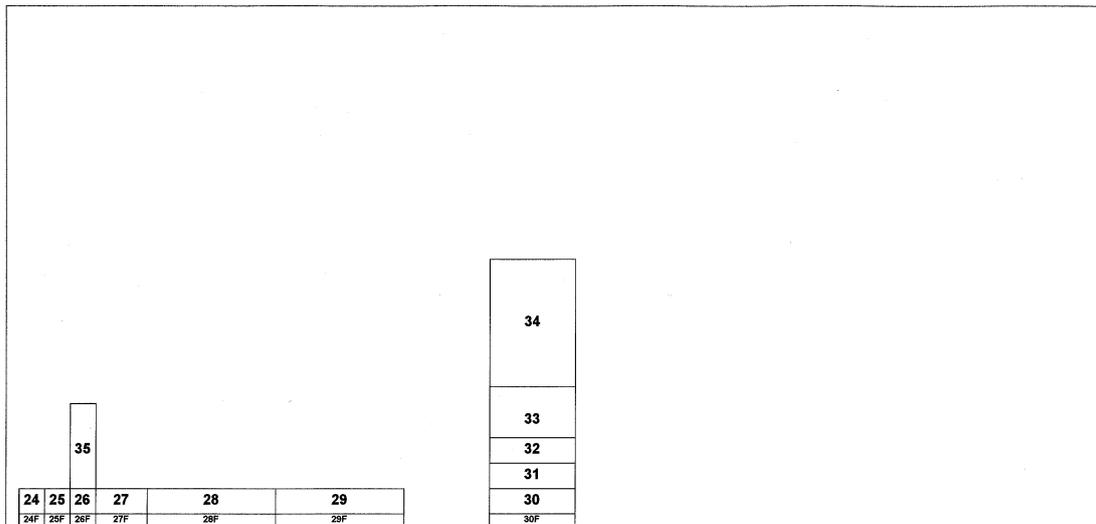


Abb. A4: Dämmplatte Nr.2 - Systematische Aufteilung in Trocknungselemente

Probe	Volumen [cm ³]	Gewicht trocken [g]	Gewicht feucht [g]	Feuchtegehalt [Vol-%]
24-Falz	3.8	0.1	0.9	20.46%
24-Ecke	39.4	1.3	5.4	10.41%
25-Ecke	39.4	1.3	5.2	9.90%
26-Falz	9.1	0.3	2.2	20.90%
26-Ecke	39.4	1.3	4.8	8.88%
27-Falz	23.5	0.8	4.8	17.14%
27-Ecke	81.8	2.7	10.2	9.17%
28-Falz	62.1	2.1	12.2	16.34%
28-Ecke	209.1	6.9	25.6	8.94%
29-Falz	57.6	1.9	14.3	21.54%
29-Ecke	193.9	6.4	32.4	13.41%
30-Falz	39.4	1.3	9.2	20.05%
30-Ecke	145.5	4.8	23	12.51%
31	139.4	4.6	30.1	18.29%
32oben	60.6	2.0	6.6	7.59%
32unten	72.7	2.4	11.1	11.96%
33	284.8	9.4	32.9	8.25%
34	715.2	23.6	64.1	5.66%
35oben	69.7	2.3	5.7	4.88%
35unten	72.7	2.4	8.2	7.98%

Tabelle A4: Dämmplatte Nr.2 mit Probenvolumen, Probengewicht vor und nach der Trocknung sowie resultierender, volumenbezogener Feuchtegehalt bei der Entnahme.

A5 - Systematische Untersuchung der Dämmplatte Nr.3

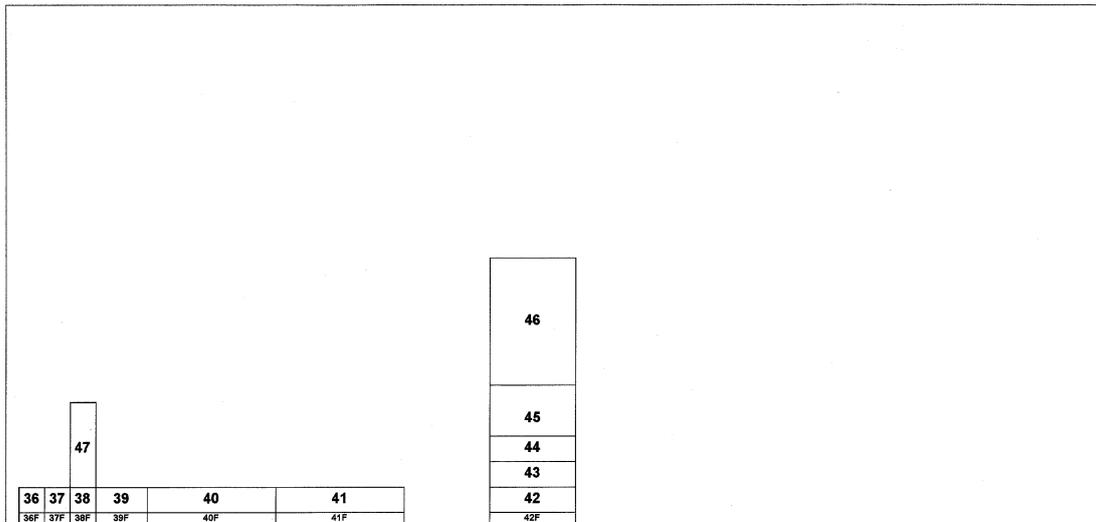


Abb. A5: Dämmplatte Nr. 3 - Systematische Aufteilung in Trocknungselemente

Probe	Volumen [cm ³]	Gewicht trocken [g]	Gewicht feucht [g]	Feuchtegehalt [Vol-%]
36-Falz	19.7	0.7	4.9	21.58%
36-Ecke	42.4	1.4	4.9	8.25%
37-Falz	12.1	0.4	2.4	16.50%
37-Ecke	40.0	1.3	2.6	3.20%
38-Falz	11.4	0.4	2.6	19.58%
38-Ecke	39.4	1.3	2.7	3.55%
39-Falz	24.2	0.8	6.2	22.28%
39-Ecke	80.3	2.7	6.1	4.30%
40-Falz	57.6	1.9	14.3	21.54%
40-Ecke	212.1	7.0	15.1	3.82%
41-Falz	56.1	1.9	15	23.46%
41-Ecke	218.2	7.2	14.9	3.53%
42-Falz	42.4	1.4	8.6	16.97%
42-Ecke	145.5	4.8	13.35	5.88%
43	160.6	5.3	9.3	2.49%
44oben	66.7	2.2	3.45	1.87%
44unten	66.7	2.2	4.05	2.78%
45	318.2	10.5	19.95	2.97%
46	736.4	24.3	41.4	2.32%
47oben	78.8	2.6	4.35	2.22%
47unten	69.7	2.3	4.65	3.37%

Tabelle A5: Dämmplatte Nr.3 mit Probenvolumen, Probengewicht vor und nach der Trocknung sowie resultierender, volumenbezogener Feuchtegehalt bei der Entnahme.

A6 - Grafische Ergebnisdarstellung zur Feuchteverteilung

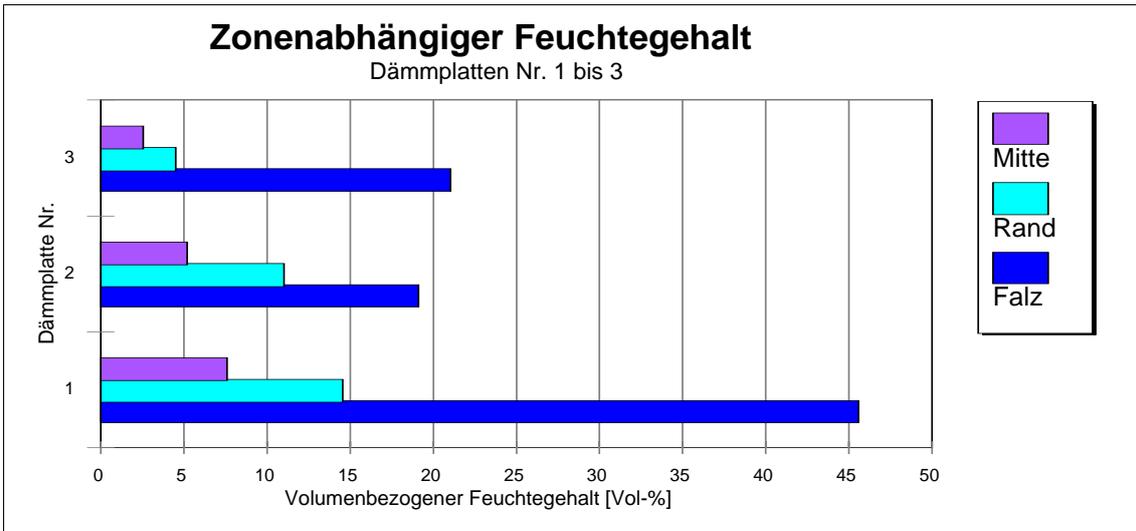


Abb. A6-1: Zonenabhängige Feuchteverteilung in den Dämmplatten Nr.1 bis 3

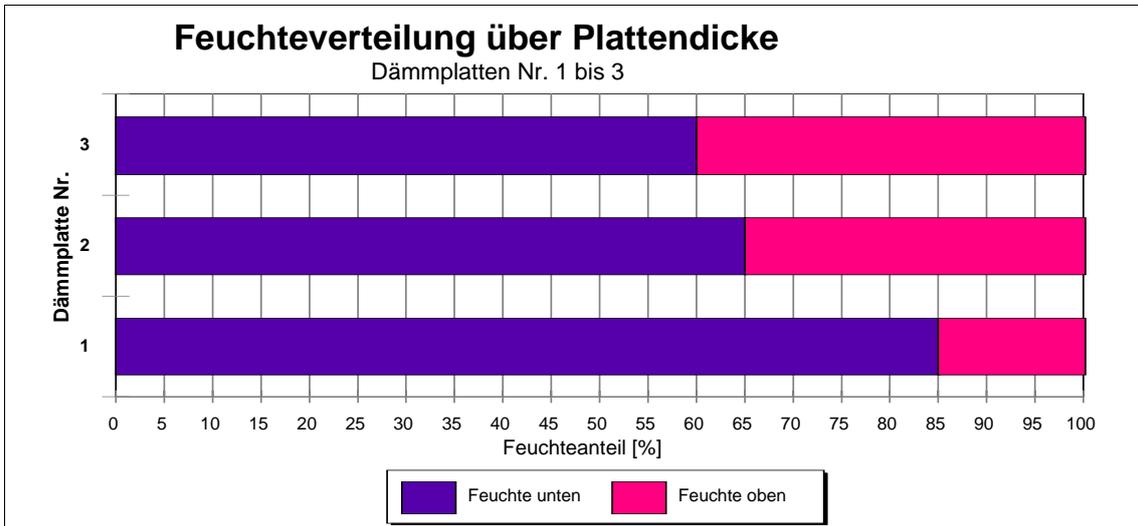


Abb. A6-2: Verteilung der Feuchte über die Plattendicke. Unten und Oben entsprechen jeweils der halben Dämmplattendicke

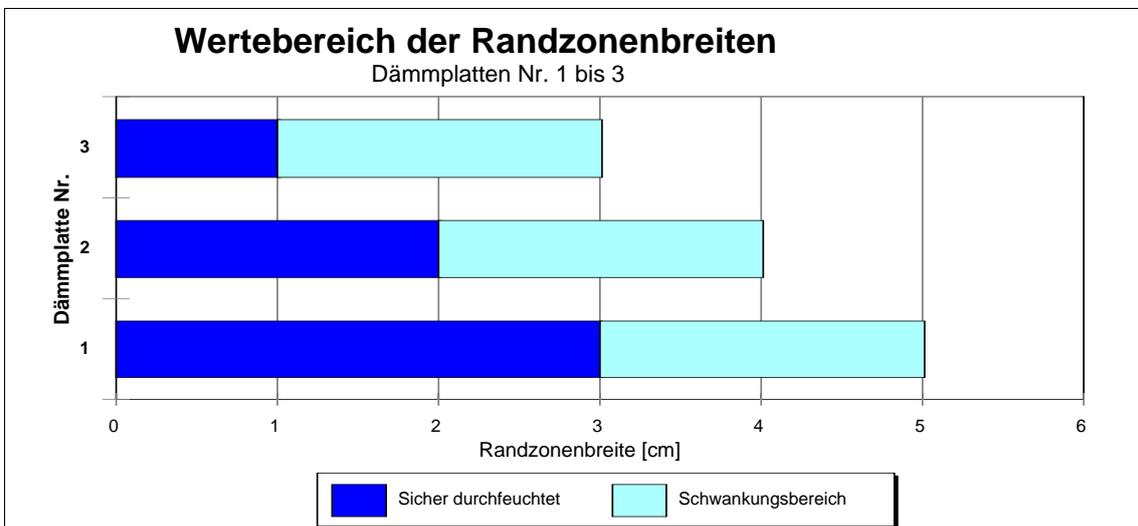


Abb. A6-3: Wertebereiche für Randzonenbreiten der Dämmplatte Nr. 1 bis 3

A7 - Feuchtigkeitszonen der Dämmplatten

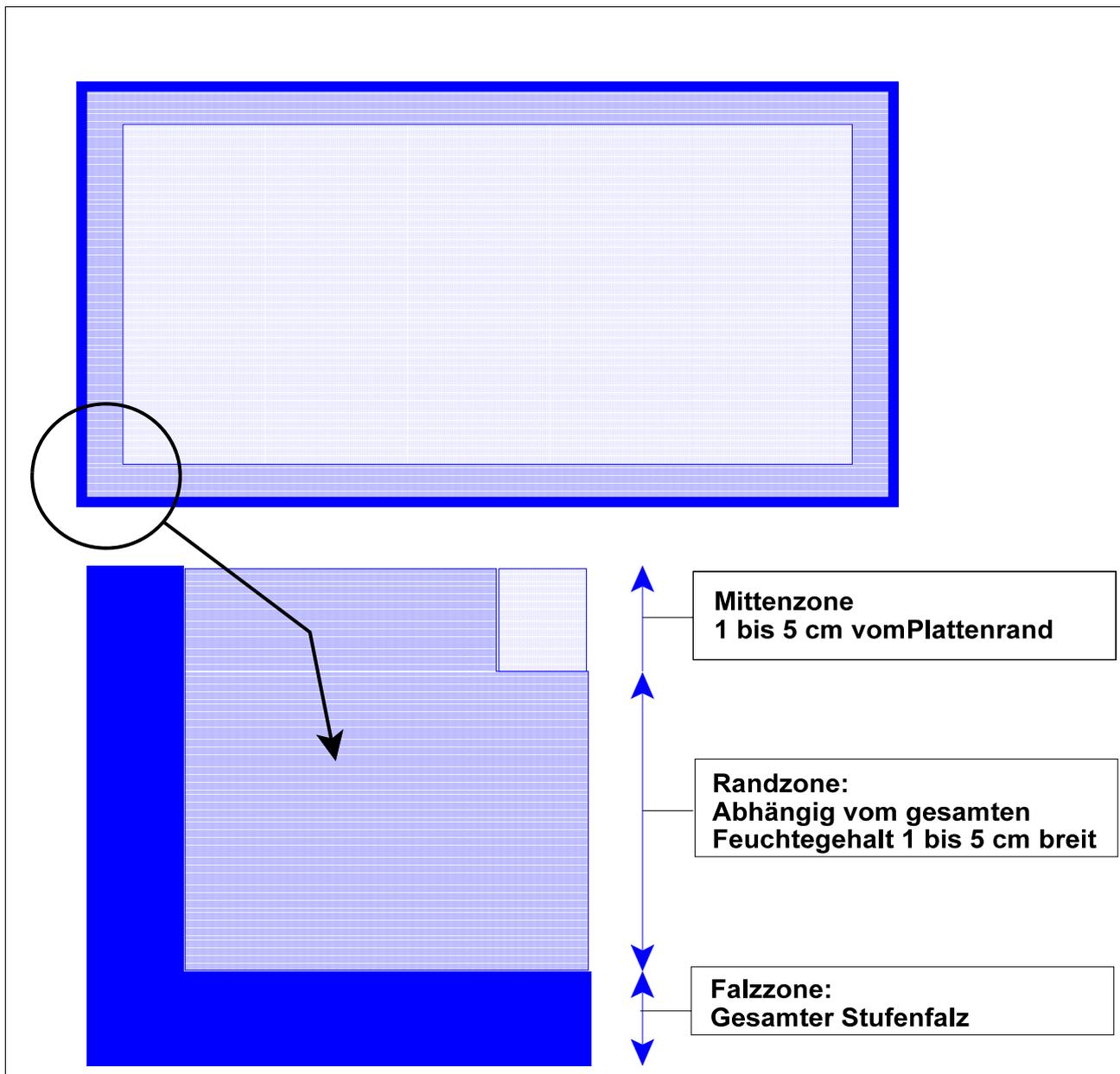


Abb. A7: Schematische Darstellung der festgestellten Feuchtigkeitszonen an den untersuchten Dämmplatten

A8 - Auswirkungen auf die resultierende Wärmeleitfähigkeit

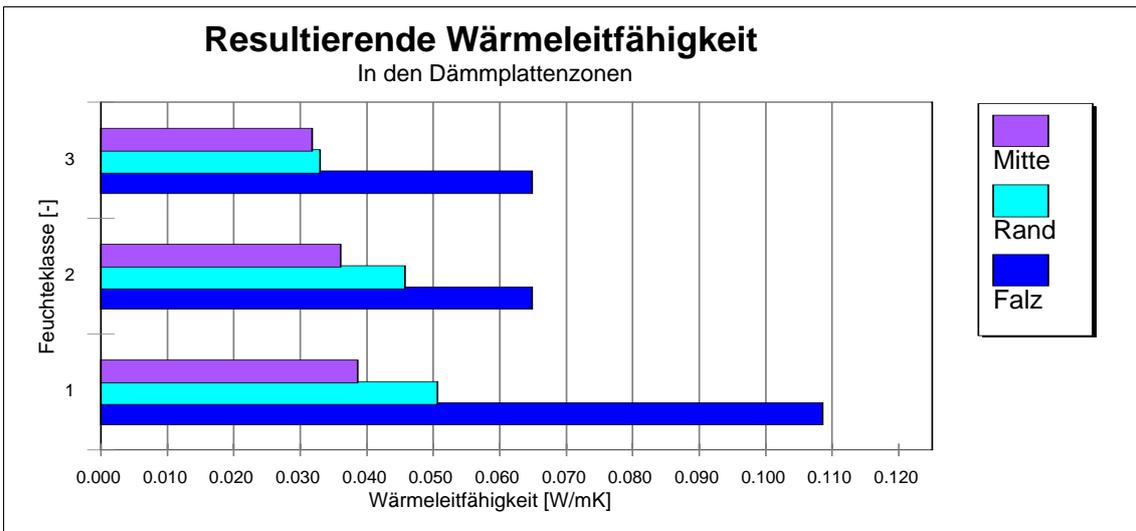


Abb A8: Resultierende Wärmeleitfähigkeit in den Dämmplattenzonen abhängig vom Entnahmefeuchtegehalt (Feuchtekategorie)

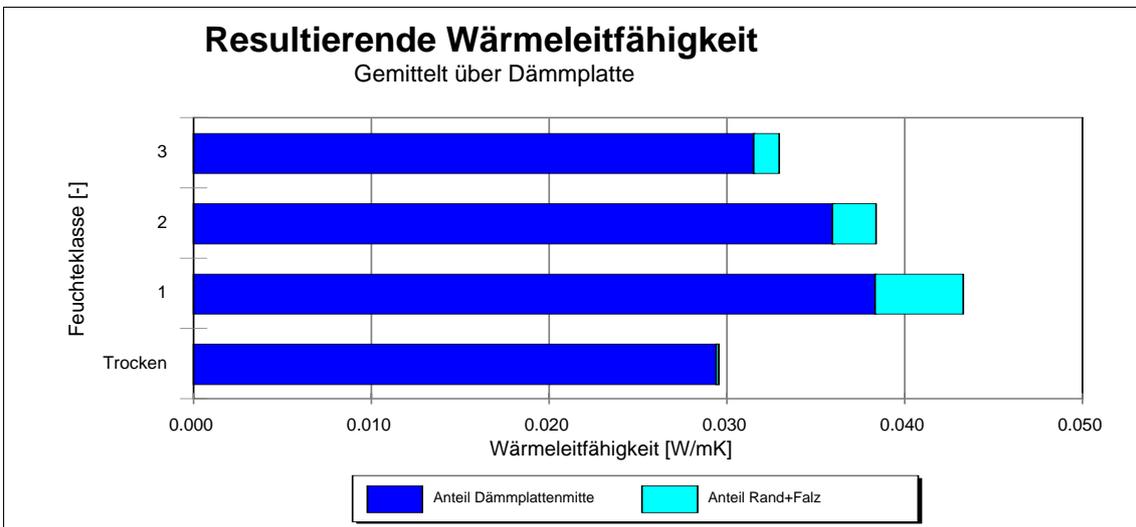


Abb A8a: Resultierende, mittlere Wärmeleitfähigkeit in den Dämmplattenzonen abhängig vom Entnahmefeuchtegehalt mit Anteil der Randzonen.

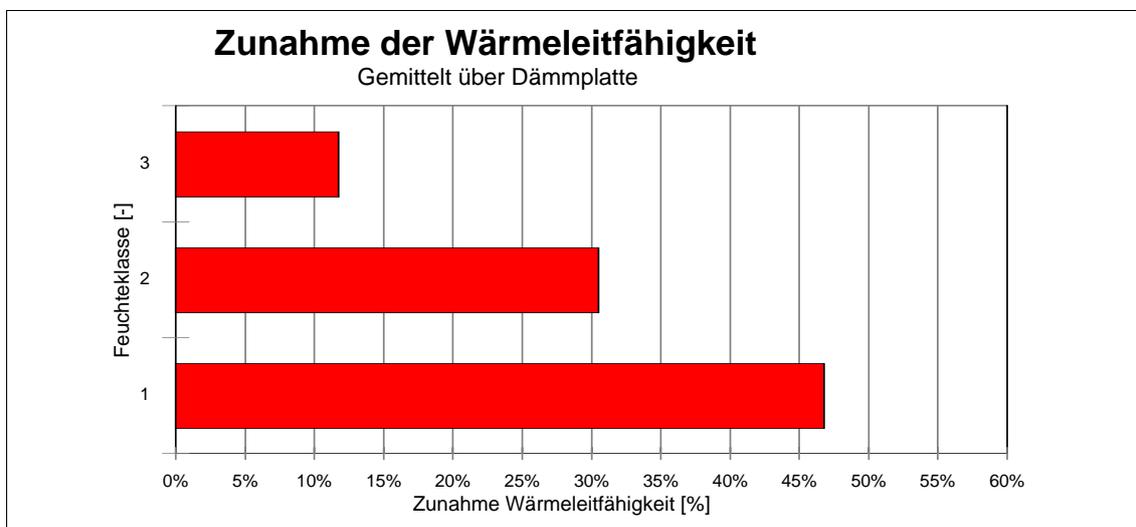


Abb A8b: Zunahme der mittleren Wärmeleitfähigkeit in den Dämmplattenzonen abhängig vom Entnahmefeuchtegehalt.