

Wärmeschutz von Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten aus Dachbegrünungen, Gehwegplatten und Ort-betonbelägen

Einführung eines $\Delta\lambda$ -Zuschlags und Quantifizierung des ΔU_r -Zuschlags

Thermal insulation for inverted roofs with closed coverings as green roofs, pavings and concrete slabs

Introduction of a $\Delta\lambda$ -correction and quantification of the ΔU_r correction



SLX D200 P1 R4	SLA 120 P1 R3
SLX D200 P1 R5	SLA 180 P1 R4
SLX D200 P1 R6	SLA 150 P1 R5
SLX D200 P1 R4	SLA 180 P1 R6
SLX D200 P1 R6	SLA 180 P1 R4
SLX D200 P2 R3	SLA 180 P2 R3
SLX D200 P2 R4	SLA 150 P2 R4
	SLA 180 P2 R5
SLX D200 P2 R6	SLA 180 P2 R6
SLX D200 P2 R7	SLA 180 P2 R7
SLX D200 P2 R8	SLA 180 P2 R7
SLX D200 P3 R3	SLA 180 P3-R3
	SLA 180 P3-R4

Aktualisierter Stand vom: 04.01.2006

Textteil: Seiten 3 bis 35
Literatur: Anhang A - Seiten 36 - 38
Tabellen: Anhang B - Seiten 39 - 55
Bilder: Anhang C - Seiten 56 - 67

Autor: Uwe Pernette
 Dipl.Ing(FH), Bauphysiker

Inhaltsverzeichnis	Seite
0. Einleitung	4
0. Introduction	5
1. Ausgangssituation	6
1.1 ΔU_r -Zuschlag für unter der XPS-Dämmung abfließendes Niederschlagswasser	6
1.2 $\Delta\lambda$ -Zuschlag für die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung infolge Feuchteinlagerung durch Diffusion	6
1.3 Bestimmung der langfristigen Feuchteeinlagerung in XPS nach EN 12088	7
1.4 Bekannte Modellrechnungen und Praxisuntersuchungen zur Feuchteaufnahme in XPS-Dämmstoffen in Umkehrdächern	8
1.5 Auswirkungen zukünftiger Massnahmen zum Klimaschutz auf XPS-Dämmstoffe	8
1.6 Zielsetzungen der vorliegenden Untersuchung	9
2. Langbewertungsbasis und Praxisuntersuchungen	10
2.1 Wahl des Bewertungszeitpunktes zur Ermittlung des $\Delta\lambda$ -Zuschlags	10
2.3 Einheitliche Langzeitbewertung publizierter Untersuchungsergebnisse	10
3. Aktueller Wissensstand zum Wasserdampfdiffusionsverhalten von XPS	13
3.1 Neue Erkenntnisse zum Wasserdampfdiffusionsverhalten von XPS	14
4. Angepasstes Modell für XPS-Dämmstoffe in WUFI	16
4.1 Feuchtespeicherfunktion für XPS	16
4.2 Schichtenmodell des Wasserdampfdiffusionswiderstands für XPS-Dämmstoffe	16
4.3 Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von XPS	17
4.4 Modellverifizierung am Beispiel eines Diffusionsversuchs	18
5. Modellierung von Umkehrdachsystemen mit geschlossenen Deckschichten	19
5.1 Allgemeine Randbedingungen der Modellbildung zur Bestimmung des $\Delta\lambda$ -Zuschlags ..	19
5.2 Spezielle Randbedingungen für Deckschichten auf Umkehrdächern	20
5.3 Materialkennwerte für die Deckschichtmodelle	20
5.4 Klimadaten und Standortfaktor S	21
5.5 Basismodelle für Umkehrdächer mit geschlossenen Deckschichten	21
5.6 Nachberechnungen bekannter Sondierungsergebnisse	22
5.7 Mittlere Wärmeleitfähigkeit der Dämmplatten nach Feuchteaufnahme	22
6. $\Delta\lambda$ -Zuschläge der untersuchten Umkehrdachsysteme	23
6.2 Standort- und deckschichtbezogenes Verhalten des $\Delta\lambda$ -Zuschlags	24
6.3 Auswirkungen der Soll-Raumlufttemperatur $\theta_{i,m,SOLL}$ auf den $\Delta\lambda$ -Zuschlag	25
6.4 Auswirkungen reduzierter Absorption von Solarstrahlung auf den $\Delta\lambda$ -Zuschlag	25
6.5 Anwendung der Korrekturfaktoren k_T und k_S auf den $\Delta\lambda$ -Zuschlag	25
6.6 Beurteilung nutzungsbedingt geschlossener Deckschichten	26
7. ΔU_r -Zuschläge, Entwässerungsfaktoren und mittlere Niederschlagsmengen	27
7.1 Der Faktor $f \times x$ nach EN ISO 6946	27
7.2 Entwässerungsfaktoren für Umkehrdächer	27
7.3 Mittlere Niederschlagsmenge in der Heizperiode	29
7.4 Erforderlicher ΔU_r -Zuschlag und resultierende Anforderungen an die XPS-Dämmung	30
8. Erreichbarer Wärmeschutz bei Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten unter Berücksichtigung von $\Delta\lambda$ und ΔU_r	31
9. Fazit und Empfehlung zur Ausgestaltung des Anhangs D.4 der EN ISO 6946	33

9.1	Einführung Entwässerungsfaktoren in EN ISO 6946 - Abschnitt D.4.3	33
9.2	Mittlere Niederschlagsmengen in der Heizperiode EN ISO 6946 - Abschnitt D.4.3	33
9.3	Einführung eines $\Delta\lambda$ -Zuschlags in EN ISO 6946 - Abschnitt D.4.4	33
9.3.1	Nutzungsdauer und Bewertungszeitpunkt	34
9.3.2	Standortklima	34
9.3.3	Deckschichtart	34
9.3.4	Innenklima	35
9.3.5	Dachexposition	35
9.3.6	Nichterfasste Einflüsse	35
9.3.7	Näherungsansätze zur Bestimmung eines produkteneutralen $\Delta\lambda$ -Zuschlags	35
Anhang A - Literatur		36
Anhang B - Tabellen 1-24		39
Anhang C - Bilder 1-16		56

0. Einleitung

Die Bewertung des Wärmeschutzes von Umkehrdächern (Flachdachaufbauten, bei denen Wärmedämmstoffe aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum (kurz XPS) über der Wasserabdichtung angeordnet sind) erfährt im Rahmen der Harmonisierung der Europeanormen in der EN ISO 6946 /1/ eine differenziertere Betrachtungsweise, als dies bislang üblich war. Insbesondere soll eine einheitliche Berechnungsgrundlage geschaffen werden, mit der die bisherige, zwischen den einzelnen Ländern stark differierende Bewertungspraxis vereinheitlicht wird. Zur Berücksichtigung des zusätzlichen Wärmeverlustes durch unter der Wärmedämmung abfließendes Niederschlagswasser ist zwar ein Bewertungsverfahren im Anhang D4.3 der EN ISO 6946 /1/ spezifiziert, jedoch fehlen die erforderlichen Entwässerungsfaktoren f zur Anwendung bei Umkehrdachaufbauten mit geschlossenen Deckschichten. Aus Untersuchungen an ausgeführten Umkehrdächern ist hinlänglich bekannt, dass abhängig von den konstruktiven und klimatischen Randbedingungen eine über die Nutzungsdauer sukzessiv zunehmende Feuchteeinlagerung infolge Wasserdampfdiffusionsvorgängen in den XPS-Dämmstoffen auftritt, welche zu einer Erhöhung deren Wärmeleitfähigkeit führt. Zur Bewertung der fallspezifisch zu erwartenden Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit in Form eines $\Delta\lambda$ -Zuschlags liegen bis heute keine befriedigenden Verfahren vor. Anstrengungen zum Klimaschutz der Atmosphäre lassen mittelfristig eine vollständige Umstellung der Schäumgase für XPS-Dämmstoffe vom gegenwärtig noch häufig eingesetzten HFCKW auf CO_2 erwarten. Neben der deutlich höheren Wärmeleitfähigkeit von CO_2 -geschäumten XPS-Dämmstoffen zeigen messtechnische Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit auch eine signifikante Reduktion des Wasserdampfdiffusionswiderstands auf. Hierdurch sind gegenüber den bekannten Verhältnissen der Feuchteeinlagerung durch Wasserdampfdiffusion in Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten bei HFCKW-geschäumten Produkten (sowie deren Vorgänger mit den Schäumgasen HFCKW sowie FCKW) deutliche Verschlechterungen im Langzeitverhalten zu erwarten. Insbesondere lassen die Resultate aus Felduntersuchungen an Umkehrdächern mit FCKW, HFCKW und HFCKW-geschäumten XPS-Dämmstoffen keine quantitativen Schlussfolgerungen auf das zukünftige Langzeitverhalten der ökologisch zu bevorzugenden CO_2 -geschäumten XPS-Dämmstoffe zu. Auf der Basis von detaillierten Modellrechnungen wird eine Bewertung der erforderlichen $\Delta\lambda$ -Zuschläge abgeleitet. Zur Umsetzung einer einheitlichen Beurteilung des über die Nutzungsdauer erreichbaren Wärmeschutzes von Umkehrdachsystemen mit geschlossenen Deckschichten sind im Rahmen der definitiven Ausgestaltung des Anhangs D.4 der EN ISO 6946 /1/ die Einführung eines $\Delta\lambda$ -Zuschlags in Abschnitt D.4.4 /1/ und Anpassungen im Abschnitt D.4.3 /1/ zur Ermittlung des ΔU_r -Zuschlags notwendig.

0. Introduction

Within the scope of the harmonisation of the European standards the performance of the thermal insulation for inverted roofs in the EN ISO 6946 /1/ (flat roof build-ups where the insulation layer of extruded polystyrene (XPS) is placed above the waterproof layer) will get a more differentiated consideration as it was usual up to now. In particular a uniform calculation basis should be created which allows to standardize the present strongly differing evaluation practise in European countries. Annex D4.3 of EN ISO 6946 /1/ defines already a ΔU_r -correction procedure to consider the additional heat loss of inverted roofs due to the water flow between the thermal insulation and the waterproofing layer. However the drainage factor f has not yet been specified for inverted roofs with closed coverings. Field studies on inverted roofs with closed coverings show clearly the occurrence of an accumulation of humidity in the XPS-insulation layer due to condensation of water vapour by diffusion during the heating period. Depending on climatic and constructive border conditions the humidity content rises over the working lifetime of the roof and causes a successive increase of the thermal conductivity of the XPS-insulation. Until now there is a lack of satisfying corrections procedures to consider the case specific deterioration of the thermal conductivity in form of a $\Delta\lambda$ -correction. Environmental efforts for the climatic protection of the atmosphere will lead to a change of the currently often used blowing-agent HFC to CO_2 in the medium-term. Measurements on CO_2 -blown XPS-materials within the scope of this paper show clearly a significant worsening of the water vapour diffusion properties. Combined with the higher thermal conductivity of CO_2 -blown XPS will result a worsening in the long-term behaviour concerning the accumulation of humidity due to condensation of water vapour by diffusion in inverted roofs with closed coverings compared with the known proportions of HFC-blown XPS (or former blowing-agents as HCFC or CFC). In particular results from field studies of inverted roofs with HFC, HCFC and CFC-blown XPS can not be used for predictions on the long-term behaviour of the ecologically preferable CO_2 -blown material. Based on detailed model calculations the necessary $\Delta\lambda$ -corrections has been determined. To realize an uniform evaluation of the thermal insulation of inverted roofs with closed coverings during the working lifetime the introduction of a $\Delta\lambda$ -correction in annex D.4.4 and adaptations on the ΔU_r -correction in the annex D.4.3 of EN ISO 6946 /1/ are necessary.

1. Ausgangssituation

Grundsätzlich müssen in Umkehrdachsystemen zwei, in Ursache und Wirkung unterschiedliche Einflussgrößen (ΔU_r und $\Delta \lambda$ -Zuschlag) erfasst und bewertet werden, die zu einer Verschlechterung des erreichbaren Wärmeschutzes führen.

1.1 ΔU_r -Zuschlag für unter der XPS-Dämmung abfließendes Niederschlagswasser

Die Berücksichtigung erfolgt über den U-Wertzuschlag ΔU_r , der dem zusätzlichen Wärmeabfluss infolge des zwischen der XPS-Wärmedämmung und der Wasserabdichtung abfließenden Niederschlagswassers Rechnung trägt. Korrekturen in Form eines ΔU_r -Werts werden in zahlreichen europäischen Ländern (A, B, CH, D, DK, F, GB, N, NL, S) bereits langjährig angewandt. Dies erfolgt bislang mit unterschiedlichen Korrekturansätzen wie z.B. unter Verwendung des Zuschlags ΔU_r (D, DK, F, N, NL, S) auf den rechnerisch ermittelten Wärmedurchlasskoeffizienten eines Umkehrdachaufbaus oder durch Dickenzuschläge auf die Wärmedämmplatten (A, B, CH, GB). Im Anhang D.4 der EN ISO 6946 /1/ wurde mit der Ausgabe vom Mai 2003 zur Ermittlung des ΔU_r -Werts ein neues, einheitliches Korrekturverfahren (Gleichung (5) Abschnitt 7) definiert, in dem der Standorteinfluss in Form des Niederschlags in der Heizperiode, die Auswirkungen der Deckschicht (Bekiesung, Begrünung, Platten oder spezielle Schutzbeläge) auf den effektiven Wasserabfluss unter den XPS-Dämmplatten in Form eines Entwässerungsfaktors f und der Anteil der Wärmedämmung unter der Wasserabdichtung Berücksichtigung finden. Das neue Verfahren sollte bis November 2003 in den Unterzeichnerländern eingeführt werden. Die Umsetzung ist jedoch bis heute noch hängig.

1.2 $\Delta \lambda$ -Zuschlag für die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung infolge Feuchteinlagerung durch Diffusion

XPS-Dämmstoffe nehmen wegen ihrer Geschlossenenzelligkeit im Regelquerschnitt kapillar kein Wasser auf. Hingegen unterliegt die Wärmedämmung in Umkehrdachaufbauten mit geschlossenen (diffusionsdichten und/oder wasserspeichernden) Deckschichten (Begrünungen, Gehwegplatten, Ortbetonplatten, etc) praktisch ganzjährig einem Temperaturgradienten bei gleichzeitig andauernder, hoher relativer Luftfeuchtigkeit zu beiden Seiten der XPS-Dämmplatten. Hierdurch kommt es, abhängig von den Eigenschaften der Deckschichten und den Klimarandbedingungen, zu einer über die Nutzungsdauer stetigen Zunahme der Feuchteinlagerung durch Kondensationsvorgänge infolge Wasserdampfdiffusion durch den Dämmstoffquerschnitt. Mit der Erhöhung der Feuchteinlagerung einher geht die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der XPS-Dämmstoffe. Die Berücksichtigung hat durch einen Zuschlag $\Delta \lambda$ auf den Nennwert der Wärmeleitfähigkeit λ_D zu erfolgen, der, wegen der stetigen Feuchtezunahme, auch die Nutzungsdauer des Dachsystems berücksichtigen muss.

Korrekturen in Form eines $\Delta \lambda$ -Zuschlags auf den Nennwert der Wärmeleitfähigkeit sind bislang nur in einigen Ländern bekannt (DK, F, N, NL, S). Zur Anwendung kommen deckschichtabhängige (Bekiest, Begrünt, Plattenbeläge) Zuschläge zwischen 0.01 und 0.08 W/mK. Einen Überblick der angewandten Korrekturen gibt Hector in /29/. Zur Berücksichtigung der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit durch Feuchteinlagerung infolge Wasserdampfdiffusion existiert noch kein allgemein applizierbares Bewertungsverfahren. EN ISO 6949 /1/ verweist im Annex D4.4 /1/ lediglich auf die Notwendigkeit einer Korrektur, die in Anlehnung an ISO 10456 /11/ auszuführen sei. ISO 10456 /11/ definiert zwar einen Zuschlagsfaktor F_m für den Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit, jedoch fehlt eine Regelung, wie die effektiv anzusetzende Feuchteinlagerung durch Kondensation bei Wasserdampfdiffusion in XPS-Dämmstoffen in Umkehrdachaufbauten zu bewerten ist. Der in ISO 10456 - Anhang A.3 definierte Hochrechnungsfaktor f_w ist zudem auf einen Wertebereich bis 10 vol% Feuchtegehaltserhöhung eingeschränkt, wohingegen Praxiserfahrungen mit Umkehrdachaufbauten (Tabellen 1+2 und Bild 2) zeigen, dass abhängig von der Art der Deckschichten und der äusseren Randbedingungen (Standortklima, Exposition) auch deutlich höhere Feuchtegehaltserhöhungen auftreten. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass die in ISO 10456 ausgewiesene Steigerung der Wärmeleitfähigkeit mit 2.53 % je Volumenprozent Feuchtezunahme gegenüber publizierten Untersuchungsergebnissen (z.B in /13/, /14/, /27/, /37/, /38/,

/39/, /46/) mit Wertebereichen von 3.10 bis 4.80 %, abhängig von der Höhe bereits bestehender Feuchteeinlagerungen und des verwendeten Schäumgases zur Herstellung der XPS-Dämmstoffe, deutlich zu tief liegt und für eine Beurteilung nicht geeignet ist. Eine realistischere Wiedergabe der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Feuchteeinlagerung, im Vergleich zu bekannten Messergebnissen an durchfeuchteten XPS-Dämmplatten, sind die von Hay in /13/ publizierten Zusammenhänge, die im Abschnitt 4.4 näher betrachtet werden.

1.3 Bestimmung der langfristigen Feuchteeinlagerung in XPS nach EN 12088

Zur Bestimmung der langfristigen Wasseraufnahme durch Wasserdampfdiffusion in XPS-Dämmplatten wird heute die EN 12088 /20/ herangezogen. In dieser Prüfnorm soll in einem 28-tägigen Diffusionsversuch unter extremen Klimabedingungen das Langzeitverhalten von Wärmedämmstoffen, die beidseitig dauernd hoher relativer Luftfeuchtigkeit bei gleichzeitig anliegendem Temperatur- und damit Wasserdampfdruckgefälle ausgesetzt sind, simuliert werden. In der Produktnorm EN 13164 /50/, welche die Anforderungen für werkmässig hergestellte XPS-Produkte spezifiziert, werden die Grenzwerte der langzeitigen Wasseraufnahme im Diffusionsversuch nach EN 12088 definiert. Die zulässige Wassereinlagerung wird in zwei Stufen WD(V)3 und WD(V)5 mit den zulässigen Maximalwerten von $W_{dV} = 3$ bzw. 5 % definiert. In jeder Stufe erfolgt eine dickenabhängige Abstufung des zulässigen Grenzwertes. In jüngsten bauaufsichtlichen Zulassungen für XPS-Dämmstoffe zur Anwendung im Umkehrdach in Deutschland (z.B. /51/) wurde die Klassierung der Produktnorm EN 13164 /50/ erstmals übernommen. Für in der Praxis einsetzbare Dämmplattendicken ab 100 mm ist die Anforderungsstufe WD(V) 5 einzuhalten. Aus der Messpraxis ist hinlänglich bekannt, dass XPS-Dämmstoffe die geforderten Grenzwerte, unabhängig vom eingesetzten Schäumgas, problemlos erreichen. Wie hingegen zahlreiche Untersuchungen (z.B. /8/, /21/, /22/, /28/, /29/) an ausgeführten Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten zeigen, korrelieren die nach EN 12088 /20/ ermittelten Feuchteeinlagerungen in XPS-Dämmstoffen im Diffusionsversuch nur in wenigen Einzelfällen mit dem in der Praxis zu erwartenden Wertebereich. Je nach Aufbau und Art der verwendeten Deckschicht, der Wasserabflussverhältnisse unter den XPS-Dämmplatten und den Raumklimabedingungen ergibt sich ein in der Höhe und im zeitlichen Ablauf der Feuchteeinlagerungen breit gestreutes Spektrum. Das Messverfahren in EN 12088 /20/ kann daher lediglich zu einem Vergleich von Dämmstoffprodukten unter definierten Randbedingungen herangezogen werden. Eine Aussage im Hinblick auf die Berücksichtigung des Feuchteinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von XPS-Dämmstoffen in Umkehrdachanwendungen unter Langzeitgesichtspunkten nach EN ISO 10456 ist jedoch unmöglich. Die bislang in EN ISO 6946 /1/ und EN ISO 10456 /1/ integrierten Korrekturverfahren sind zur Berücksichtigung des Feuchteinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von XPS-Dämmstoffen bei der Anwendung in Umkehrdachsystemen ungeeignet.

Ungeachtet der Praxiserfahrungen mit der Feuchteeinlagerung in XPS-Dämmstoffe und der noch ausstehenden Regelungen im Rahmen der EN ISO 6946 /1/ wird in dem Entwurf der EOTA für eine Europäisch technische Zulassung von Wärmedämmstoffen für Umkehrdachsysteme aus dem Jahr 2003 /49/ noch immer auf die Prüfvorschrift der EN 12088 Bezug genommen. Darüber hinaus wird, in Widerspruch zur EN 13164 /51/, unabhängig von der Dämmplattendicke eine konstante, zulässige Wasseraufnahme von 3 vol% für XPS-Dämmstoffe gefordert. Zusätzlich wird erstmals ein Grenzwert für expandiertes Polystyrol (EPS) genannt, dessen Einsatz in Umkehrdächern wegen der deutlich höheren Feuchteaufnahme grundsätzlich nicht vorstellbar ist. Weiterhin verzichtet die EOTA bislang auf die Formulierung eines notwendigen $\Delta\lambda$ -Zuschlags.

Für eine richtige und praxisnahe Bewertung des tatsächlichen Wärmeschutzes vom Umkehrdachsystemen mit geschlossenen Deckschichten besteht daher erheblicher Handlungsbedarfs zur Entwicklung eines allgemein anerkannten und in der Praxis applizierbaren Korrekturverfahrens zur Bestimmung des $\Delta\lambda$ -Zuschlags, welches in den Abschnitt D.4.4 der EN 6946 /1/ einfließen kann.

1.4 Bekannte Modellrechnungen und Praxisuntersuchungen zur Feuchteaufnahme in XPS-Dämmstoffen in Umkehrdächern

Zu der Problemstellung existieren Untersuchungsergebnisse und grobe Bewertungsvorschläge in zahlreichen Veröffentlichungen (z.B. in /2/, /3/, /4/, /5/, /6/, /7/, /12/). Die Fachdiskussionen hinsichtlich der Größenordnung für eine praxismgerechte Bewertung des langfristigen Wärmeschutzes von Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten weisen jedoch, abhängig von der Untersuchungsmethodik und den angesetzten Bewertungskriterien, zum Teil erhebliche Diskrepanzen auf.

Von Künzel wurde in /2/ bis /4/ auf der Basis von Freilandversuchen und Modellrechnungen (z.B. mit dem Programm WUFI /9/) für Umkehrdächer mit geschlossener Struktur die Möglichkeit einer starken Feuchteeinlagerung prognostiziert. Abhängig von Dämmplattendicke, dem verwendeten Schäumgas (CO₂ oder HFKW) und den Eigenschaften der oberen Deckschichten über den XPS-Dämmplatten wird die zu erwartende Erhöhung des volumenbezogenen Feuchtegehalts u_v mit 7 - 25 vol-% innert 30 Jahren angegeben.

Künzel /3/ und Eggenberger /5/ diskutieren den Einfluss der Reduktion der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von XPS-Dämmplatten infolge der Umstellung des Schäumgases auf halogenfreie Treibmittel (CO₂). Die Erhöhung der zu erwartenden Feuchteeinlagerung durch Wasserdampfdiffusion gegenüber den konventionell (früher FCKW, HFCKW und heute HFKW) geschäumten XPS-Dämmplatten wird nach Untersuchungen in /3/ und /5/ zwischen 4 und 7% angegeben.

Andere Autoren kommen (z.B /6/,/8/) auf der Basis von Stichprobenuntersuchungen an ausgeführten Umkehrdächern mit Nutzungsdauern von 7 bis 18 Jahren zum Schluss, dass die hohen Prognosewerte der Modellrechnungen auf Grund der in der Praxis festgestellten Feuchteaufnahmen nicht zutreffen.

Weitere rechnerische Modelluntersuchungen mit dem Programm WUFI /9/ wurden von Van der Heiden in /7/ durchgeführt. Diese ergaben deutlich tiefere Feuchteeinlagerungen gegenüber den in /3/ und /5/ ermittelten Werten. In /7/ wird dies unter anderem mit einer unbefriedigenden Modellierung von XPS in WUFI begründet. In /7/ wird keine Reduktion der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl bei CO₂-geschäumten XPS-Dämmplatten berücksichtigt.

1.5 Auswirkungen zukünftiger Massnahmen zum Klimaschutz auf XPS-Dämmstoffe

Bedingt durch Anstrengungen zum Klimaschutz im Sinne des Protokolls von Kyoto /47/ haben in den letzten Jahren erste europäische Staaten Massnahmen ergriffen, die mittelfristig zu einem Verbot von HFKW-geschäumten XPS-Dämmstoffen führen werden. Österreich (gestaffelt bis 01.01.2008) /40/ und Dänemark (ab 01.01.2006) /42/ haben bereits konkrete Ausstiegsszenarien gesetzlich verankert. In der Schweiz wurde mit der neuen Stoffverordnung /43/ der Grundstein für die explizite Definition des Ausstiegs formuliert. Die jüngste Veröffentlichung des Umweltbundesamtes in Berlin zum Thema "Fluorierte Treibhausgase in Produkten und Verfahren" /41/ legt eine baldige Konkretisierung von Massnahmen auch in Deutschland nahe. Dies um so mehr, als bereits im Jahr 1999 in der vom Umweltbundesamt beauftragten Untersuchung /68/ zum Emissions- und Minderungspotential von fluorierten Verbindungen gezeigt wurde, dass ohne eine gezielte Reduktion des Einsatzes von HFKW bis zum Jahr 2010 eine Steigerung der freigesetzten CO₂-Äquivalente auf über 19 Mio. t zu erwarten ist, wobei allein der Anteil aus XPS-Dämmplatten mit 15% anzunehmen ist.

CO₂-geschäumte XPS-Dämmstoffe sind heute in ausreichender Dicke und mit den geforderten technischen Eigenschaften verfügbar, so dass grundsätzlich ein kompletter Verzicht im Bereich der Umkehrdachanwendungen möglich wäre. Einzelne Hersteller, wie die BASF AG, haben bereits 1999 ihre gesamte Produktion auf halogenfreie Treibmittel (CO₂) umgestellt. Sämtliche heute vorliegenden Stichprobenuntersuchungen an ausgeführten Flachdächern zum Verhalten von XPS-Dämmstoffen in Umkehrdachaufbauten hinsichtlich der Feuchteeinlagerung basieren hingegen auf Materialien mit den Treibgasen FCKW, HFCKW und vereinzelt HFKW, die sowohl hinsichtlich der Wärmedämmung als auch dem Dampfdiffusionsverhalten (siehe dazu Kap 3.1) deutlich bessere Eigenschaften gegenüber den aus ökologischer Sicht günstigeren CO₂-geschäumten Ersatzprodukten aufweisen.

Frühere Untersuchungen bieten daher im Hinblick auf eine zukunftsorientierte Bewertung von XPS-Dämmstoffen in Umkehrdachanwendungen lediglich wertvolle Informationen zum Abgleichen und Verifizieren von theoretischen Berechnungsmodellen. Sie lassen jedoch keine verallgemeinerbaren Schlüsse für den noch zu definierenden $\Delta\lambda$ -Zuschlag in Sinne der EN ISO 6946 /1/ zu.

1.6 Zielsetzungen der vorliegenden Untersuchung

Die Analyse publizierter Untersuchungsergebnisse und das mittelfristig zu erwartende Verbot von HFKW-geschäumten XPS-Dämmstoffen ergeben folgende Ausgangslage:

- Vorliegende Untersuchungsergebnisse aus Stichprobenuntersuchungen weisen keinen einheitlichen Bewertungszeitraum auf. Die vergleichende Bewertung von Modellrechnungen und Erkenntnissen aus Analysen bestehender Dachaufbauten setzt jedoch eine einheitliche Langzeitbewertungsbasis voraus.
- Modellrechnungen weisen teilweise Probleme bei der ausreichend präzisen Modellierung von XPS-Dämmstoffen auf. Sie wurden zu wenig differenziert durchgeführt, um eine systematische Beurteilung der wesentlichen Einflussgrößen zu erlauben, welche die Feuchteeinlagerung durch Wasserdampfdiffusion in XPS-Dämmstoffen bei der Anwendung in Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten beeinflussen.
- Der Wasserdampfdiffusionswiderstand von XPS-Dämmstoffen ist bislang nicht in ausreichend genauem Masse erfasst worden. Insbesondere das Verhalten von CO₂-geschäumte XPS-Dämmstoffen, die auf Grund der zukünftigen Massnahmen zum Klimaschutz zunehmend in den Anwendungsvordergrund rücken, wurde bislang nur stichprobenhaft hinsichtlich des Wasserdampfdiffusionsverhaltens untersucht.
- Geltende Prüfvorschriften und die daraus resultierende Bewertung der langfristigen Wasseraufnahmen durch Diffusion sowie die dadurch bedingte Verschlechterung der Wärmedämmeigenschaften von XPS-Dämmplatten in Umkehrdachaufbauten erweisen sich unter Berücksichtigung bekannter Untersuchungsergebnisse aus der Praxis nicht als zielführend.
- Konkrete Vorschläge für eine Regelung des erforderlichen $\Delta\lambda$ -Zuschlags im Sinne der EN ISO 6946 /1/ fehlen.

In der vorliegenden Untersuchung werden Interpretationslücken aus vorliegenden Publikationen geschlossen. Das Langzeitverhalten von XPS-Dämmstoffen wird auf der Basis von neuesten Messergebnissen zum Wasserdampfdiffusionsverhalten und einer realitätsnahen und fehlerbereinigten Modellierung von XPS-Dämmstoffen im Rechenprogramm WUFI /9/ neu systematisch bewertet. Aus den Berechnungsergebnissen werden Empfehlungen für eine angemessene Berücksichtigung der Verschlechterung der Wärmedämmeigenschaften im Sinne eines $\Delta\lambda$ -Zuschlags des Abschnitts D.4.4 der EN ISO 6946 abgeleitet und dessen Auswirkungen auf die Bewertung des Wärmeschutzes von Umkehrdachsystemen mit geschlossenen Deckschichten diskutiert.

2. Langbewertungsbasis und Praxisuntersuchungen

Eine wichtige Voraussetzung für eine vergleichende Interpretation von bekannten Untersuchungsergebnissen zum Langzeitverhalten von XPS-Dämmstoffen in Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten ist die Einigung auf eine gemeinsame Bewertungsgrundlage hinsichtlich der anzusetzenden Zeitdauer und des zeitlichen Verlaufs der zu Grunde gelegten Einflussgrößen im Alterungsprozess (lineare Zunahme, progressive Zunahme etc). In verschiedenen Veröffentlichungen (z.B. /2/, /3/, /29/) zu Umkehrdachsystemen wird bislang meist ein Bewertungszeitraum von 30 Jahren angesetzt. Im Abschnitt 7.4 der EN ISO 10456 /11/ wird als typischer Zeitraum T_N für die Langzeitbewertung 50 Jahre genannt. Für Umkehrdächer mit geschlossenen Deckschichten ist ein Langzeitbewertungszeitraum von $T_N=50$ Jahren aus konstruktiver Sicht als angemessen zu betrachten, da die wichtigsten Funktionsschichten im Dachaufbau, die Wasserabdichtung und die Wärmedämmung, vor schädlichen mechanischen, witterungsbedingten und strahlungsbedingten Einflüssen sehr gut geschützt sind. Kürzere Betrachtungsdauern sind aus ökologischer Sicht nur dann sinnvoll, wenn nutzungstechnische Aspekte (temporäre Gebäudekonstruktionen, gestaffelte Bauvorhaben, etc) für einen früheren Rückbau einer Dachkonstruktion sprechen.

2.1 Wahl des Bewertungszeitpunktes zur Ermittlung des $\Delta\lambda$ -Zuschlags

Die Wahl des Bewertungszeitpunktes hängt vom Verlauf der Eigenschaftsänderung ab. Im vorliegenden Fall sind die Ursachen für die Eigenschaftsänderung (Feuchteeinlagerung) und die zu bewertende Eigenschaftsänderung selbst (Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit) unterschiedlichen Gesetzmässigkeiten unterworfen. Die langfristige Feuchteaufnahme in Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten verläuft nach /12/ in den ersten 25-30 Jahren nahezu linear. In der Untersuchung von Eggenberger in /5/ finden sich Hinweise darauf, dass oberhalb von 30 Jahren mit einer Reduktion der Geschwindigkeit der Feuchteeinlagerung zu rechnen ist. Die nachfolgend hier vorgestellten Modellrechnungen bestätigen dies. Zwischen 30 und 50 Jahren zeigt die Zunahme der Feuchteeinlagerung ein leicht degressives Verhalten.

Für die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist hingegen nach vorliegenden Untersuchungen (z.B. /13/, /14/) ein progressiver Verlauf mit zunehmendem Feuchtegehalt in XPS-Dämmstoffen anzunehmen. Durch das Zusammenwirken der beiden Einflüsse ergibt sich für die durchschnittliche, den Energieverlust der Umkehrdachkonstruktion über die Nutzungsdauer bestimmende Wärmeleitfähigkeit näherungsweise eine lineare Zunahme über die Zeit. Bild 1 zeigt beispielhaft die zu erwartende Entwicklung der Feuchteeinlagerung und Wärmeleitfähigkeit für einen Umkehrdachaufbau mit unterschiedlichen Deckschichten über einer Wärmedämmung aus 100 mm Roofmate SL-A (Schäumgas CO_2) am Standort Zürich. Für die Bewertung des durchschnittlich erzielbaren Wärmeschutzes von XPS-Dämmstoffen in Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten kann daher die nach der halben Nutzungsdauer von 25 Jahren erreichte Wärmeleitfähigkeit λ_{25} angesetzt werden. Die Umrechnung auf spezielle objektangepasste Nutzungsdauern im Wertebereich von 30 bis 50 Jahren ist näherungsweise durch eine lineare Interpolation möglich. Der $\Delta\lambda$ -Zuschlag definiert sich dann zu:

$$(1) \quad \Delta\lambda_{50} = \lambda_{25} - \lambda_D \quad (\text{Nutzungsdauer } T_N = 50 \text{ Jahre})$$

mit λ_{25} = Wärmeleitfähigkeit nach 25 Jahren im eingebauten Zustand
 λ_D = Nennwert der Wärmeleitfähigkeit nach EN ISO 10456 im trockenen Zustand

Umrechnungen auf andere Nutzungszeiträume von T_x Jahren ergeben sich näherungsweise zu:

$$(2) \quad \Delta\lambda_x = \Delta\lambda_{50} \times T_x / 50 \quad (\text{Für Nutzungsdauern von } 30 \leq T_x \leq 50 \text{ Jahren})$$

2.3 Einheitliche Langzeitbewertung publizierter Untersuchungsergebnisse

Die Tabellen 1+2 zeigen die Auswertung einer Hochrechnung von Untersuchungsergebnissen verschiedener Autoren (/8/, /21/, /22/, /28/, /29/) für 23 Umkehrdachaufbauten mit geschlossenen Deckschichten auf einen einheitlichen Langzeitbewertungszeitraum. Bei den Dächern 1 bis 10 handelt es sich um begrünte Umkehrdachaufbauten mit unterschiedlichen Substratarten und Deckschichthöhen.

Die Dächer 11 bis 23 geben Ergebnisse von Dächern mit Gehwegplatten, Ortbetonplatten und Betonverbundsteinen wieder. Bild 2 zeigt grafisch Auswertungen der Hochrechnungen für die zu erwartenden Werte der Feuchteeinlagerung, der resultierenden Wärmeleitfähigkeit und des resultierenden $\Delta\lambda$ -Zuschlags nach 25 und 15 Jahren. Mit Ausnahme von 2 Dächern liegen die Entnahmezeitpunkte immer zu Beginn der Heizperiode (September bis November). Bezüglich der durchschnittlich wirksamen Feuchteeinlagerung für die folgende Heizperiode werden dadurch zu tiefe Werte ermittelt. Die Entnahmefeuchtegehalte sind daher als untere Grenzwerte für das jeweilige Dachsystem, bezogen auf den Entnahmezeitpunkt, zu bewerten. Es ergeben sich folgende Feststellungen:

Begrünte Umkehrdächer

Die Hochrechnung auf einheitliche Bewertungszeiträume ergibt:

Volumenbezogene Feuchtaufnahme:

25 Jahre: 1.4 bis 20.8 % (Mittelwert: 9.4%)
15 Jahre: 0.9 bis 12.5 % (Mittelwert: 5.7%)

Zunahme der Wärmeleitfähigkeit gegenüber der Trockenwärmeleitfähigkeit:

25 Jahre: 5.1 bis 96.3 % (Mittelwert: 38.8%)
15 Jahre: 3.1 bis 57.8 % (Mittelwert: 23.2%)

$\Delta\lambda$ -Zuschlag für Nutzungsdauern von 50 und 30 Jahren:

$\Delta\lambda_{50} = 1.4$ bis 26.0 mW/mK (Mittelwert: 10.4 mW/mK)
 $\Delta\lambda_{30} = 0.9$ bis 15.6 mW/mK (Mittelwert: 6.3 mW/mK)

Umkehrdächer mit Gehwegplatten, Ortbetonplatten und Betonverbundsteinen

Die Hochrechnung auf einheitliche Bewertungszeiträume ergibt:

Volumenbezogene Feuchtaufnahme:

25 Jahre: 1.6 bis 50.9 % (Mittelwert: 18.1%)
15 Jahre: 1.0 bis 30.6 % (Mittelwert: 10.8%)

Zunahme der Wärmeleitfähigkeit gegenüber der Trockenwärmeleitfähigkeit:

25 Jahre: 6.3 bis 376.5 % (Mittelwert: 96.9%)
15 Jahre: 3.7 bis 225.9 % (Mittelwert: 58.1%)

$\Delta\lambda$ -Zuschlag für Nutzungsdauern von 50 und 30 Jahren:

$\Delta\lambda_{50} = 1.7$ bis 101.7 mW/mK (Mittelwert: 32.7 mW/mK)
 $\Delta\lambda_{15} = 1.0$ bis 61.0 mW/mK (Mittelwert: 19.6 mW/mK)

Zusammenfassend ergibt sich folgende Situation:

- Der Vergleich mit den heute in Schweden (8 mW/mK) und Frankreich (4 mW/mK) angewandten Korrekturzuschlägen in Bild 2 unten zeigt, dass ein erheblicher Anteil von untersuchten Dächern vorliegt, bei denen Überschreitungen aktuell applizierter $\Delta\lambda$ -Zuschläge unter Verwendung einer einheitlichen Langzeitbewertungsbasis zu erwarten sind. Bei Annahme eines Nutzungszeitraums von 50 Jahren sind davon 17 von 23 untersuchten Umkehrdächern nach den Tabellen 1+2 betroffen.

- Bei einem Betrachtungszeitraum von 25 Jahren liegen die zu erwartenden Feuchteinlagerungen bei begrüntem Umkehrdächern im Mittel im Bereich des von Künzel auf der Basis von Modellrechnungen in /4/ publizierten Wertebereichs (7 - 13 Vol-% nach 25 Jahren). Bei Umkehrdächern mit Deckschichten aus Gehwegplatten, Ortbetonplatten und Betonverbundsteinen übersteigt der zu erwartende Mittelwert nach 25 Jahren sogar den Prognosewertebereich (8 - 17 Vol-%) von Künzel in /3/.
- Ergebnisse aus Felduntersuchungen, die jeweils nur eine spezielle Einbausituation verbunden mit objektspezifischen Klimarandbedingungen beleuchten, eignen sich ohne eine fallspezifische Hochrechnung auf einheitliche Bewertungsgrundlagen nicht als Basis für eine Trendanalyse zur Ableitung der Größenordnung von $\Delta\lambda$ -Zuschlägen auf die Nennwärmeleitfähigkeit. Insbesondere kann der zeitliche Verlauf der Feuchteaufnahme in Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten nicht durch eine lineare Regression (wie z.B. in /72/) aus Felduntersuchungen an Dächern mit unterschiedlichem Alter, an unterschiedlichen Standorten und mit unterschiedlichen Systemaufbauten abgeleitet werden.
- Hingegen zeigen die festgestellten Feuchteinlagerungen bei Verwendung einer einheitlichen Zeitbasis im Vergleich mit bekannten Modellrechnungen /2/, /3/ und /4/ bereits eine gute Tendenz zur Übereinstimmung bezüglich des durchschnittlich zu erwartenden Wertebereichs der Feuchteaufnahme. Mit einer systematischen Parameterstudie auf Basis eines verfeinerten und verifizierten Rechenmodells, den entsprechend differenzierten Grundlagendaten zum feuchte- und wärmetechnischen Verhalten von XPS-Dämmstoffen und der Definition von durchschnittlichen Deckschichteigenschaften kann das Langzeitverhalten von Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten im Hinblick auf einen praxisnahen $\Delta\lambda$ -Zuschlag deutlich effizienter beurteilt werden. Insbesondere kann durch Modellrechnungen, im Gegensatz zu Sondierungen an ausgeführten Umkehrdächern, der alleinige Effekt der Feuchteinlagerung durch Wasserdampfdiffusion ermittelt werden. Die Tatsache, dass Prognosewerte aus Modellrechnungen in der Praxis teilweise auch deutlich überschritten werden (z.B. Dächer 21 bis 24), zeigt, dass in der Praxis noch zusätzliche Feuchteinlagerungen (z.B. über Ränder der Dämmplattenstöße ohne Schäumhaut, Rissen in der Schäumhautoberfläche durch mechanische Beanspruchungen bei der Verarbeitung etc.) auftreten können, die sich einer reproduzierbaren Analyse entziehen, und durch entsprechende zusätzliche Sicherheitszuschläge auf die Nennwärmeleitfähigkeit λ_D berücksichtigt werden müssen.

3. Aktueller Wissensstand zum Wasserdampfdiffusionsverhalten von XPS

Auf Grund der charakteristischen Eigenschaften von XPS als hydrophober und geschlossenzelliger Dämmstoff erfolgt ein Wassertransport lediglich in Form von Wasserdampfdiffusion. Kapillarer Wassertransport und nennenswerte Sorptionsvorgänge treten bei unbeschädigten Dämmplatten praktisch nicht auf. Feuchteinschlüsse in Form von flüssigem Wasser in XPS sind damit nur als Folge von Kondensationsvorgängen in den geschlossenen Zellstrukturen bei Taupunktunterschreitungen möglich. Zur richtigen Beurteilung der Feuchteaufnahme von XPS in bautechnischen Applikationen mit anliegenden Temperatur-/Feuchtegefällen sind daher genaue Kenntnisse des Wasserdampfdiffusionsverhaltens erforderlich.

In der einschlägigen Fachliteratur werden zu den Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen sehr unterschiedliche Angaben gemacht. Es unterscheiden sich die Wertebereiche, die lokale Zuordnung im Dämmplattenquerschnitt und die Beurteilung des Schäumgaseinflusses erheblich. In Tabelle 3 sind Angaben verschiedener Autoren, abhängig vom verwendeten Schäumgas zur Herstellung der XPS-Dämmplatten, einander gegenübergestellt. Die Werte wurden, soweit möglich, auf einheitliche Dämmplattenzonen umgerechnet. Ausgewiesene Wertebereiche beruhen auf unterschiedlichen Dämmplattentypen, die sich in Plattendicke und Rohdichte unterscheiden.

Seit dem 01.01.2002 gilt EU-weit (in der Schweiz bereits seit 01.01.2000) ein generelles Verbot der Herstellung und der Einfuhr von FCKW-geschäumten XPS-Dämmstoffen. Bereits in den 90iger Jahren begannen die namhaften Hersteller von XPS-Produkten mit der Umstellung auf Schäumgase mit HFKW oder CO₂. Mit der Umstellung des Schäumgases für XPS-Hartschaum stellte sich die Frage nach einer Änderung der technischen Eigenschaften. Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, insbesondere für CO₂-geschäumte Dämmstoffe, ist mit der in den einschlägigen Fachnormen deklarierten Wärmeleitfähigkeit λ_D nach EN ISO 10456 /11/ dokumentiert. Der Einfluss des Schäumgases auf den Wasserdampfdiffusionswiderstand wird hingegen kontrovers diskutiert. So weisen Künzel /3/ und Eggenberger /5/ auf eine anzunehmende, deutliche Reduktion des Wasserdampfdiffusionswiderstandes hin. Van der Heiden geht in /7/ dagegen von einem unveränderten Diffusionsverhalten für CO₂-geschäumte XPS-Dämmstoffe aus. Viele Hersteller verwenden neben CO₂ nichtchlorierte Fluorkohlenwasserstoffverbindungen (HFKW) als Schäumgas, um verbesserte Wärmedämmeigenschaften zu erreichen.

Unterschiede für den Wasserdampfdiffusionswiderstand bei HFKW und CO₂-geschäumten Produkten werden in heute publizierten Produkteunterlagen nicht gemacht. Tabelle 4 zeigt einen Vergleich der Produzentendeklarationen zum Wasserdampfdiffusionswiderstand zweier marktgängiger XPS-Dämmstoffe in dem SIA Merkblatt 2001 /15/ aus den Jahren 1990 und 2003. Der Vergleich der publizierten Kennwerte zeigt einen gegenüber HFCKW-geschäumten XPS-Dämmstoffen (Werte von 1990) grösseren, nach unten erweiterten Wertebereich der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen an. Es wird jedoch kein Unterschied zwischen Dämmplatten mit Schäumgas HFKW und CO₂ gemacht. Weiterhin fehlen verwertbare Angaben zur Abhängigkeit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von der Dämmplattendicke sowie der Streuung über den Dämmplattenquerschnitt. Hier findet sich herstellunabhängig lediglich der Hinweis, dass mit steigender Dämmplattendicke eine abnehmende Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl anzunehmen sei.

Modellrechnungen, die das Verhalten von XPS-Dämmstoffen hinsichtlich der Feuchteeinlagerung durch Diffusion beurteilen sollen, basieren bis heute auf rudimentären und teilweise widersprüchlichen Angaben zu deren Wasserdampfdiffusionsverhalten. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die bislang ermittelten und verwendeten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen in der Regel nach EN 12086 /16/ bestimmt wurden. Im Gegensatz zu der seit dem Jahr 2002 gültigen EN ISO 12572 /17/ basierten die Ermittlungen auf der Anwendung konstanter Dampfdruckdifferenzen entsprechend den vorgegebenen Prüfbedingungen. Für die Prüfkammer, in der die Probekörper zu lagern waren, wurde lediglich die Forderungen nach konstanten Klimabedingungen formuliert. In EN ISO 12572 hingegen wird die kontinuierliche, messtechnische Überwachung der Klimabedingungen in der Prüfkammer gefordert und für die Auswertung ist der Mittelwert der Dampfdruckdifferenz in der Messperiode einzusetzen. Hierdurch werden Fehlauswertungen durch nicht erfasste Klimaschwankungen eliminiert.

Um eine einheitliche Ausgangsbasis zu erhalten und bislang nicht publizierte Eigenschaften von XPS-

Dämmstoffen hinsichtlich der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen zu ermitteln, wurde für die hier vorgestellten Modellrechnungen zunächst eine systematische Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen an einer Auswahl marktgängiger XPS-Dämmstoffe durchgeführt. Auf Grund der zum Zeitpunkt der messtechnischen Untersuchungen publizierten (z.B. in SIA Merkblatt 2001 /15/) physikalischen Kennwerte (Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen, dämmplattendickeabhängige Nennwerte der Wärmeleitfähigkeit λ_D) für CO₂- und HFKW-geschäumte XPS-Dämmplatten fiel die Wahl auf Produkte der Typen Roofmate SL-A und SL-X (Produzent: DOW), welche die günstigste anzunehmende Materialkonfiguration im Hinblick auf die Größenordnung des $\Delta\lambda$ -Zuschlags erwarten liessen.

3.1 Neue Erkenntnisse zum Wasserdampfdiffusionsverhalten von XPS

Die systematische Untersuchung des Wasserdampfdiffusionsverhaltens erfolgte für 4 Dämmplatten des Typs Roofmate SL-A (Schäumgas CO₂) mit Dicken von 60, 100, 140 und 180 mm sowie 2 Dämmplatten des Typs Roofmate SL-X (Schäumgas HFKW - R134a) mit Dicken von 140 und 200 mm. Je Dämmplattentyp wurden aus einer Dämmplatte je 6 quadratische Probekörper mit einer Abmessung von 100 x 100 mm ausgeschnitten. Jeder Probekörper wurde in unterschiedlichen Bereichen über den Dämmplattenquerschnitt in planparallele Schichtproben zerschnitten. Insgesamt ergaben sich 28 unterschiedliche Schichtproben in jeweils dreifacher Ausfertigung. Die Auswahl der Prüfbedingungen orientierte sich an der EN ISO 12572 /17/. Um dem Einsatzbereich von XPS-Dämmstoffen im Umkehrdach gerecht zu werden, wurden neben den normalerweise verwendeten Prüfbedingungen des Dry-Cup-Verfahren (Satz A: 23°C, 0 / 50%) und C - Wet-Cup-Verfahren (Satz C: 23°C, 50 / 93%) die zusätzlichen Prüfbedingungen 23°C, 65/93%, und 23°C, 80/93%, im Bereich hoher relativer Luftfeuchtigkeiten in das Messprogramm integriert. Die Durchführung der Messungen erfolgte von April 2003 bis Februar 2004 am Fraunhoferinstitut für Bauphysik in Holzkirchen. Bild 3 zeigt einen Überblick der Probenkonfiguration und des Messprogramms.

Auf Grund der geschlossenzelligen Struktur von XPS-Dämmstoffen ist keine signifikante Abhängigkeit des Wasserdampfdiffusionswiderstands von den Feuchterandbedingungen zu erwarten. Die Messergebnisse bestätigen, dass keine relevante Abhängigkeit des Wasserdampfdiffusionswiderstandes vorliegt. Lediglich die Wet-Cup-Messung lieferte erhöhte Werte gegenüber den übrigen Messreihen. Zusätzliche Messungen im Bereich hoher relativer Luftfeuchtigkeiten, entsprechend dem praktischen Einsatzbereich von XPS-Dämmplatten im Umkehrdach, zeigen, dass Ergebnisse der Wet-Cup-Methode keiner Tendenz zu höheren Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen in diesem Anwendungsbereich entsprechen. Die resultierenden Mittelwerte der vier Messreihen zeigt Tabelle 5. Die Kennwerte für die Schäumhautzone wurden aus den Messergebnissen der Probenausschnitte der oberen Randzone mit und ohne Schäumhautzone rechnerisch ermittelt. Aus den Messergebnissen ergeben sich folgende Feststellungen und Schlussfolgerungen:

- Die Verwendung von CO₂ als Schäumgas hat einen deutlichen Einfluss auf das Wasserdampfdiffusionsverhalten. Dies zeigt z.B. der direkte Vergleich der Messwerte für Roofmate SL-A und SL-X bei einer Dämmplattendicke von 140 mm in Bild 4. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen der CO₂-geschäumten Roofmate SL-A liegt um 27% (Randzone mit Schäumhaut) bis zu 68% (Kernzone) unterhalb derjenigen der HFKW-geschäumten Roofmate SL-X.
- Die Messergebnisse zeigen deutlich, dass die Bewertung des Langzeitverhaltens von XPS-Dämmstoffen, im Hinblick auf die zukünftig aus ökologischen Anforderungen zu erwartende Umstellung auf das Schäumgas CO₂, nicht auf der Basis von Felduntersuchungen an bestehenden Umkehrdächern, bei denen ausnahmslos Dämmplatten mit dem Schäumgasen FCKW und HFCKW eingesetzt wurden, erfolgen kann.
- Die Annahme einer Unabhängigkeit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl vom Schäumgas (wie z.B. bei Modellrechnungen in /7/) erweist sich bei den hier untersuchten Dämmplatten als nicht berechtigt.
- Die CO₂-geschäumten Dämmplatten vom Typ SL-A zeigen eine Neigung zu Extremwerten bei verschiedenen Dämmplattendicken:

So ergab sich bei der 60 mm dicken Dämmplatte in der Kernzone eine extrem tiefe Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ($\mu = 6$!) bei gleichzeitig um mehr als 10% tieferer Rohdichte gegenüber den übrigen, dickeren Dämmplatten. Dieses Ergebnis wurde in insgesamt 12 Messungen eindeutig reproduziert.

Bei der 140 mm dicken Dämmplatte wurde ebenfalls eine sehr tiefe Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ($\mu = 34$!) in der Kernzone festgestellt.

Auffällig ist weiterhin, dass die 180 mm Dämmplatte, mit Ausnahme der Schäumhautzone, vergleichbare Werte wie die 100 mm Dämmplatte aufweist. Dies widerspricht dem normalen Verhalten von XPS-Dämmstoffen, mit zunehmender Dicke abnehmende Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen aufzuweisen.

- Die HFKW-geschäumten Dämmplatten vom Typ SL-X weisen unabhängig von der Dicke sehr ähnliche Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen auf.
- Der von Künzel in /3/ verwendete Wertebereich der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen von CO₂-geschäumten XPS-Dämmstoffen in Modellrechnungen liegt um 15 - 20 % tiefer als die aktuellen Messergebnisse bei vergleichbarer Dämmplattendicke (100 mm). Die Randzone mit gegenüber der Kernzone erhöhten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen ist in der Modellierung breiter anzunehmen als in /3/.
- Im Modell von Eggenberger in /5/ werden die Schäumhaut, Rand- und Übergangszonen mit deutlich zu tiefen Wasserdampfdiffusionswiderständen für CO₂-geschäumte XPS-Dämmstoffe angesetzt.
- Bei Messungen zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes nach EN ISO 12572 für XPS-Dämmstoffe sind zusätzlich zu Wet-Cup-Messbedingungen Stichproben im hohen Luftfeuchtigkeitsbereich (Mittlere relative Luftfeuchtigkeit im Prüfkörper 80 - 87 %) zur Bewertung heranzuziehen. Die Wet-Cup-Messung allein könnte, wie die Messungen an XPS-Dämmstoffen gezeigt haben, zu Fehlbeurteilungen des Wasserdampfdiffusionswiderstandes im Feuchtbereich führen.
- Für die zukünftige Publikation von Werten für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von XPS-Hartschaum sind folgende Forderungen zu stellen:
 - Unterscheidung zwischen Produkten nach dem verwendeten Schäumgas.
 - Angabe der Kennwerte für jede Dämmplattendicke getrennt.
 - Differenzierte Messung der Kennwerte in unterschiedlichen Dämmplattenzonen (Schäumhautbereich, Randzonen, Kernzone).

4. Angepasstes Modell für XPS-Dämmstoffe in WUFI

Bisherige Modellrechnungen zum Langzeitverhalten von XPS-Dämmstoffen mit dem instationären Berechnungsprogramm WUFI /9/ in /3/ und /7/ beruhen nur auf einer beschränkten Datenbasis hinsichtlich der Grösse und Verteilung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes. Dies gilt insbesondere bei Betrachtungen mit CO₂-geschäumten Dämmplatten. Mit den vorliegenden Messergebnissen zum Wasserdampfdiffusionsverhalten und der Elimination von ungünstigen Parametrierungen aus früheren Simulationsrechnungen (z.B. in /7/) konnte die Modellierung von XPS-Dämmstoffen für die Verwendung in WUFI /9/ soweit verfeinert werden, dass eine sehr realitätsnahe Berechnung erreicht wird. WUFI wurde entwickelt, um eine möglichst genaue Modellierung der Feuchtetransportphänomene aus Dampfdiffusion, Kapillarleitung und Oberflächendiffusion in Baustoffen unter instationären Randbedingungen zu ermöglichen. Die Bestimmung von Feuchteeinlagerungen mit WUFI bei nicht hygroskopischen Baustoffen, wie XPS-Dämmstoffen, in denen der Feuchtetransport nur über Wasserdampfdiffusion durch die Wände der geschlossenzelligen Dämmstoffstruktur erfolgt und die Einlagerung von Wasser nur bei Unterschreitung der Taupunkttemperatur auftritt, setzt insbesondere eine angepasste Einstellung der Feuchtespeicherfunktion voraus. Feuchtetransportkoeffizienten für Saugen und Weiterleiten müssen im Fall von XPS-Dämmstoffen nicht berücksichtigt werden, da im Regelquerschnitt keine kapillaren Transportvorgänge auftreten.

4.1 Feuchtespeicherfunktion für XPS

Die Feuchtespeicherfunktion in WUFI beschreibt die Einlagerung von Wasser in hygroskopische Baustoffe in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit. Bei hydrophoben Baustoffen, wie XPS-Dämmstoffen, erfolgt eine Wassereinlagerung erst bei Taupunktüberschreitungen durch Kondensation. Bei der Anwendung von WUFI wurde der richtigen Einstellung der Feuchtespeicherfunktion bei der Materialdefinition von XPS-Dämmstoffen nicht immer in ausreichender Weise Beachtung geschenkt. Hierdurch ergaben sich unter anderem Unterschiede in den Aussagen zwischen Modellrechnungen von Künzel in /3/ und der Untersuchung von Van der Heiden in /7/. Die Analyse der in /7/ verwendeten Parameter zur Beschreibung des XPS-Verhaltens zeigt, dass die dortige Einstellung der Feuchtespeicherfunktion für XPS hauptverantwortlich für unrealistische Feuchteverteilungen und Feuchtemengen ist. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit vom 100% wurde in /7/ davon ausgegangen, dass der gesamte Poreninhalt von XPS (Porosität 90 - 98 %) mit Wasser gefüllt ist ($w_{\max} = 900 - 980 \text{ kg/m}^3$). Für den hydrophoben XPS-Dämmstoff muss jedoch eine geeignete Feuchtespeicherfunktion mit einer sehr tiefen, fiktiven freien Wassersättigung w_f bei 100% Luftfeuchtigkeit verwendet werden. Nur dann können ausgewiesene Wassergehalte einer WUFI-Berechnung als effektiv aufgetretenes Kondensat interpretiert werden. WUFI stellt für hydrophobe Baustoffe, die ohne Feuchtespeicherfunktion definiert werden, eine automatische Einstellung einer fiktiven, internen Feuchtespeicherfunktion bereit. Bei dieser Funktion wird der fiktive Wassergehalt des hydrophoben Baustoffs bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100% auf $0.047 \times w_{\max}$ gesetzt. Bei XPS-Dämmstoffen entspräche dies einem Wassergehalt von 42 bis 46 kg/m³ oder einem volumenbezogenen Feuchtegehalt u_v von 4.2 bis 4.6 %. Dies ist für die Modellierung von XPS-Dämmstoffen im Hinblick auf eine realistische Beurteilung von Feuchteeinlagerungen durch Kondensation noch ungeeignet hoch, da erst bei deutlicher Überschreitung der fiktiven, freien Wassersättigung w_f von realen Kondensationsvorgängen ausgegangen werden kann. WUFI verfügt über ein in die Materialdatenbank integriertes Verfahren, mit dem angepasste fiktive Feuchtespeicherfunktionen generiert werden können. Die so erzeugbaren fiktiven Feuchtespeicherfunktionen müssen dann einem Funktionstest hinsichtlich der numerischen Stabilität des Iterationsverfahrens zur Lösung der gekoppelten Differentialgleichungen im Programm unterzogen werden. Für die nachfolgenden Modellrechnungen wurde die Feuchtespeicherfunktion für XPS-Dämmstoffe auf der Basis der Stützwerte nach Tabelle 6 generiert. Damit wird eine gute Übereinstimmung zwischen Realität und Rechnung bei gleichzeitiger numerischer Stabilität erreicht.

4.2 Schichtenmodell des Wasserdampfdiffusionswiderstands für XPS-Dämmstoffe

Aus den Messergebnissen wurde für jeden Dämmplattentyp ein Schichtenmodell für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und die Rohdichteverteilung abgeleitet. Der Dämmplattenquerschnitt wurde dazu in Zonen mit jeweils konstanten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen und Rohdichten

aufgeteilt. Zwischen den Messwerten der Randzonen und der Kernzone wurden die Kennwerte jeweils linear interpoliert. Tabelle 7 gibt die Schichten-, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl- und Rohdichteverteilung jeweils für die halbe Dämmplattendicke von der Schäumhaut- bis zur Kernzone wieder. Angegeben ist für jeden Dämmplattentyp auch die deklarierte Wärmeleitfähigkeit λ_D entsprechend SIA Merkblatt 2001 /15/, welche im Modell als Ausgangswert im Trockenzustand eingesetzt wurde.

4.3 Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von XPS

In der Literatur (/11/, /13/, /27/, /37/, /38/, /39/) finden sich zahlreiche Angaben zum Einfluss der Feuchteaufnahme auf die Wärmeleitfähigkeit von XPS-Dämmplatten. Die verschiedenen Ansätze weisen grosse Unterschiede in der Bewertung auf. In /14/ liegen neuere Erkenntnisse aus Langzeitversuchsreihen mit CO₂-geschäumten XPS-Dämmstoffen vor. Tabelle 8 zeigt einige rechnerische Modellansätze. Bild 5 gibt einen Vergleich der Rechenmodelle zur Entwicklung der Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit vom volumenbezogenen Feuchtegehalt im XPS-Dämmstoff im Vergleich mit bekannten Messergebnissen wieder. Hay zeigte in /13/ auf, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit bei der Messung in starkem Masse von der Einbausituation und der Feuchteverteilung in der Dämmplatte abhängt. Bei Messungen mit hohen Feuchtegehalten auf der warmen Seite der Messanordnung wurde von Hay eine deutlich höhere Zunahme der Wärmeleitfähigkeit ermittelt, als dies bei der umgekehrten Versuchsanordnung der Fall war. Die festgestellten Ober- und Untergrenzen für den rechnerischen Modellansatz von Hay sind in Bild 5 zusammen mit der Mittelwertkurve, basierend auf der Gleichung in Tabelle 8, wiedergegeben. Die in Bild 5 gezeigten, messtechnisch ermittelten Wärmeleitfähigkeiten liegen im Wertebereich, der durch die Hayschen Grenzkurven umschrieben wird. Die rein dampfdiffusionsbedingte Feuchteeinlagerung in XPS-Dämmstoffen durch die Kondensation im Temperaturgefälle bei beidseitig hoher Luftfeuchtigkeit findet auf grund der festgestellten, diffusionstechnischen Materialeigenschaften und dem Verlauf der Sättigungsdampfdruckkurve, ausgehend von der Dämmstoffplattenmitte, zunächst in der kaltseitigen Dämmstoffplattenhälfte statt. Im Zeitverlauf kommt es dann jedoch zu einer Verbreiterung der Kondensationszone, die eine gleichmässigeren Verteilung über den Dämmplattenquerschnitt ergibt. Bild 6 zeigt hierzu das Ergebnis für die Verteilung der Feuchteeinlagerung nach 12, 25 und 40 Jahren bei einer Modellrechnung für einen Umkehrdachaufbau mit Gehwegplatten im Feinsplitt am Standort Zürich. Im Langzeitdiffusionsversuch /45/ lässt sich eine ähnliche Feuchteverteilung (Bild 7) in einer XPS-Dämmplatte vom Typ Roofmate SL-A mit 100 mm Dicke feststellen. Durch die zunehmende Feuchteeinlagerung kommt es zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in Bereichen mit Feuchteeinlagerungen und damit einer sukzessiven Verschiebung des Taupunkts in Richtung der Warmseite der Dämmplatte. Hinsichtlich der wirksamen Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit bei Feuchteeinlagerung ist unter Beachtung der effektiv zu erwartenden Feuchteverteilung die Anwendung der Mittelwertkurve nach Hay nach Tabelle 8 für Modellrechnungen, welche die rein dampfdiffusionsbedingte Kondensation in XPS-Dämmplatten untersuchen sollen, zielführend. Unter praktischen Rahmenbedingungen sind nämlich die bei messtechnischen Untersuchungen festgestellten Extremwerte für die rein dampfdiffusionsbedingte Feuchteeinlagerung nur in den Randbereichen mit vergleichsweise geringen Anteilen der Feuchteeinlagerungen zu erwarten. Der aktuelle Ansatz nach EN ISO 10456 /11/ stellt im Hinblick auf die Mehrheit der vorliegenden messtechnischen Untersuchungsergebnisse eine deutlich zu tiefe Bewertung der Zunahme der Wärmeleitfähigkeit infolge Feuchtigkeitseinlagerung dar und gilt zudem nur bis zu einem Feuchtegehalt von $u \leq 10$ vol-%. Zukünftige Revisionen der EN ISO 10456 sollten diesem Umstand Rechnung tragen.

Grenzen der modellbasierten Nachbildung der Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt in XPS-Dämmstoffen ergeben sich für den Fall, dass es zur Eisbildung in durchfeuchteten Randzonen auf der Kaltseite kommt. Sämtliche bekannten Untersuchungen zur Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt in XPS-Dämmstoffen wurden in Temperaturbereichen oberhalb des Gefrierpunkts ausgeführt. Berücksichtigt man die Tatsache, dass die Wärmeleitfähigkeit von Eis näherungsweise dem vierfachen Wert von flüssigem Wasser entspricht, so wird deutlich, dass bei geringmächtigen Deckschichtaufbauten (z.B. Gehwegplatten in Splitt) mit zunehmender Nutzungsdauer und entsprechender Feuchteeinlagerung zeitweise stark ansteigende Wärmeleitfähigkeiten in den oberen Randbereichen der XPS-Dämmstoffe auftreten können. Die damit verbundene zusätzliche Temperaturabsenkung im oberen Dämmplattenbereich erhöht gleichzeitig infolge des grösseren Dampfdruckgefälles über einen

geringeren Dämmplattenquerschnitt die Feuchteeinlagerung. Dieser Effekt bleibt jedoch bei den hier vorgestellten Modellrechnungen unberücksichtigt, was einer, im Vergleich zu realen Betriebsbedingungen, eher konservativen Beurteilung im Hinblick auf die tatsächlich zu erwartende Feuchteeinlagerung gleichzusetzen ist.

4.4 Modellverifizierung am Beispiel eines Diffusionsversuchs

In /44/ und /45/ wird von einem modifizierten Langzeitversuch zur Wassereinlagerung infolge Wasserdampfdiffusion an einer 100 mm dicken XPS-Dämmplatte (Breite x Höhe: 350 x 350 mm) vom Typ Roofmate SL-A berichtet. In Anlehnung an die Prüfverordnung EN 12088 /20/ wurde die XPS-Dämmplatte in der Prüfeinrichtung gemäss Bild 8 über 96 Wochen dem Dampfdruckgefälle zwischen einem auf 50°C geheizten Wasserbad und einer auf 1°C gekühlten Kühlplatte ausgesetzt. Der umgebende Prüfraum wurde während der gesamten Versuchsdauer im Temperaturbereich zwischen 0 und 2.2 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 83 bis 91 % gehalten. In Abweichung zu EN 12088 wurden die Dämmplatten nicht gewendet, was einer dauernd konstanten Richtung des Wasserdampfdiffusionsstroms entspricht. Die Entwicklung des volumenbezogenen Feuchtegehalts in der Dämmplatte wurde in regelmässigen Abständen geprüft. Da die Randbereiche der Dämmplatten im Versuch in direktem Kontakt mit dem umgebenden Versuchsraum standen, ergab sich im Randbereich eine inhomogene Verteilung der Feuchteeinlagerung. Zum Versuchsende wurde die Feuchteverteilung in der Dämmplatte /45/ bestimmt und für die Kernzone der Dämmplatte (100 x 100) der zeitliche Verlauf der dortigen Feuchteeinlagerung reproduziert. Die Verifizierung der hier vorgestellten Konfigurationsparameter für den Feuchtetransport in XPS-Dämmstoffen zur Anwendung im Rechenprogramm WUFI erfolgte durch eine Nachberechnung der Feuchteeinlagerung in der Kernzone über das erste Versuchsjahr. Zum Vergleich wurde auch eine Nachberechnung mit dem sehr groben Schichtenmodell (0.5 mm Schäumhautzone, 1.0 mm Randzone und 97.0 mm Kernzonen) aus /7/ unter Berücksichtigung der dort verwendeten Feuchtespeicherfunktion durchgeführt. Bild 9 zeigt die Ergebnisse der Modellrechnungen im Vergleich mit den Messergebnissen aus /19/ und /44/. Unter Verwendung des hier vorgestellten Schichtenmodells und den Einstellungen für die Feuchteparameter liegt die Abweichung der Modellrechnung zum Versuch nur bei 7% des Feuchtegehalts nach 350 Tagen. Die Berechnungen mit dem Schichtenmodell nach /7/ weichen hingegen um 25 % auch bei Verwendung der angepassten Feuchtespeicherfunktion nach 4.2 ab. Mit der in /7/ verwendeten Funktion liegt die Abweichung sogar bei 35%.

5. Modellierung von Umkehrdachsystemen mit geschlossenen Deckschichten

Bekieste Umkehrdächer mit offenen Deckschichten, die funktionsfähige, diffusionsoffene, nicht wasserspeichernde Deckschichten und ein ausreichendes Gefälle ($\geq 2\%$) zu den Abflüssen hin aufweisen, sind bezüglich der langfristigen Feuchteeinlagerung infolge Wasserdampfdiffusion in den XPS-Dämmplatten als unproblematische Konstruktionen bekannt. Im Sommer findet eine vollständige Austrocknung von winterlichen Kondensatbildungen im Dämmplattenquerschnitt statt. Dies zeigen praktische und theoretische Untersuchungen (z.B. in /2/, /4/, /6/). Hingegen führen Umkehrdächer mit geschlossenen Deckschichten (Extensive und intensive Begrünung, Plattenbeläge auf Drainageschichten u.vgl.) wegen der deckschichtabhängigen Behinderung der sommerlichen Austrocknung zu einer stetig wachsenden Feuchteeinlagerung in den XPS-Dämmstoffen. Im Fall von begrünten Dächern ist eine längerfristige Austrocknung der Deckschichten im Hinblick auf eine funktionsfähige und vielfältige Vegetation darüber hinaus unerwünscht. Nutzungsbedingt geschlossene Deckschichten treten auf, wenn durch zunehmende Ablagerung von Feinteilen in Filtervliesen oder auf wasserableitenden Trennlagen, starke Moosbildungen sowie zeitweiser Pfützenbildung das sommerliche Trocknungspotential deutlich reduziert wird. Eine Übersicht typischer Umkehrdachaufbauten mit geschlossenen Deckschichten zeigt Bild 10.

5.1 Allgemeine Randbedingungen der Modellbildung zur Bestimmung des $\Delta\lambda$ -Zuschlags

Die nachfolgend vorgestellte Modellierung für Umkehrdächer mit geschlossenen Deckschichten zur Beurteilung der zu erwartenden, langfristigen Feuchteeinlagerung infolge Wasserdampfdiffusion geht von folgenden Rahmenbedingungen aus:

- In den Deckschichten (z.B. Vegetationsschichten, Drainageschichten unter Plattenbelägen) über den XPS-Dämmplatten liegen auch im Sommer während grossen Zeiträumen hohe relative Luftfeuchtigkeiten (90 -100%) vor. Dies zeigen z.B Untersuchungen in /2/.
- Bei begrünten Dächern ist in längeren Trockenphasen (10 oder mehr regenfreie Tage), abhängig von der Dicke der Vegetationsschicht und deren Wasserspeichervermögen, eine stärkere Austrocknung möglich, als in /2/ berichtet wird. Dies zeigen Untersuchungen in /52/ an verschiedenen Gründachaufbauten. Bei extensiven Begrünungen mit nur wenigen Zentimetern Substrathöhe wurde in regenfreien Schönwetterperioden von 10 Tagen ein Abtrocknen der Substratschicht bis zu einem "lufttrockenen" Zustand festgestellt. Bei entsprechend eingestellter Vegetation können diese Zeiträume ohne Zusatzbewässerung überbrückt werden.
- Zwischen Dämmplattenunterseite und der Wasserabdichtung ist im Regelfall ganzjährig von Feuchtigkeit (entsprechend einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100%) auszugehen. Diesen Sachverhalt geben verschiedenen Publikationen (/2/, /8/,/21/,/28/,/29/) wieder.
- Die Temperatur unter den XPS-Dämmplatten ist, wegen der im Regelfall massiven Unterdeckenkonstruktionen aus Beton, nur geringfügigen und kurzzeitigen Schwankungen unterworfen. Bei geschlossenen Deckschichten ist die unter den XPS-Dämmplatten abfliessende Wassermenge zudem gegenüber dem bekieste Umkehrdach je nach Systemaufbau reduziert anzusetzen. Die Einflüsse auf das mittlere Temperaturniveau durch unter den XPS-Dämmplatten abgeführtes Niederschlagswasser können für Langzeitbetrachtungen im Hinblick auf die Wassereinlagerung durch Wasserdampfdiffusion vernachlässigt werden.
- Die minimalen Tagesmittel der Aussenlufttemperaturen liegen in Europa auch bei Extremstandorten (wie z.B Davos) nur an wenigen Tagen im Jahr unter $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die meisten Standorte in Mittel- und Nordeuropa weisen hingegen minimale Tagesmitteltemperaturen zwischen -2 und $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. Der mittlere, an kalten Tagen auftretende, rechnerische Temperaturabfall von der Raumluft bis zur Abdichtungsebene unter den XPS-Dämmplatten liegt damit, abhängig von der Dämmplattendicke (ausgegangen wird von einer Mindestdicke von 100 mm) und deren Wärmeleitfähigkeit, im Bereich von 1.0 bis 3.0 K. Unter praktischen Nutzungsbedingungen (interne Abwärme, Regelung der Wärmeabgabe, Nutzerverhalten, Temperaturprofile im Raum) liegen gegenüber der theoretischen Soll-Raumlufttemperatur $\theta_{i,m,SOLL}$ im Aufenthaltsbereich (z.B einer Referenzhöhe 1.20 m)

unmittelbar unter dem raumseitigen Deckenabschluss erhöhte reale Temperaturen vor. Der rechnerische Temperaturabfall bis zur Abdichtungsebene, bezogen auf die Soll-Raumlufttemperatur $\theta_{i,m,SOLL}$, wird dadurch selbst an kalten Tagen ($0 > \theta_{e,m} > -7^\circ\text{C}$) weitestgehend kompensiert. Bei moderaten Aussenlufttemperaturen ($5 > \theta_{e,m} > 0^\circ\text{C}$) kann die Temperatur in der Abdichtungsebene bereits zeitweise über der die Soll-Raumlufttemperatur $\theta_{i,m,SOLL}$ liegen. Für die Modellrechnungen wird als Basisrandbedingung das durchschnittliche Temperaturniveau unter den XPS-Dämmplatten der Soll-Raumlufttemperatur $\theta_{i,m,SOLL}$ der angrenzenden Nutzungszone gleichgesetzt.

- Für den Basisfall wird eine freie, unverschattete Lage der Dachfläche bei Absorptionskoeffizienten für Solarstrahlung von $a_s = 0.70$ für alle Deckschichten angenommen.

5.2 Spezielle Randbedingungen für Deckschichten auf Umkehrdächern

Bei der Bestimmung der Feuchteeinlagerung infolge Wasserdampfdiffusion sind in erster Linie die durchschnittlichen Feuchteverhältnisse in den Deckschichtaufbauten von Interesse. Der Abfluss auftretender Niederschlägen in Form von Sickerwasser unter den XPS-Dämmplatten im Hinblick auf den damit in der Heizperiode verbundenen, erhöhten Wärmeverlust ist durch den ΔU -Zuschlag nach EN ISO 6946 - Annex D.4.3 /1/ zu berücksichtigen. In Zeiträumen mit Wasserabfluss während oder nach Niederschlägen kommt es auf der Oberseite der XPS-Dämmplatten in der sommerlichen Austrocknungsphase zeitweise zu Situationen mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100%. Unter dicht gestossen verlegten Gehwegplatten, Betonsteinen oder verfugten Ortbetonplatten auf Drainageschichten aus Feinsplitt liegt auf Grund des hohen Diffusionswiderstandes der Nutzbeläge jedoch praktisch ohnehin ganzjährig eine hohe relative Luftfeuchtigkeit nahe bei 100% vor. Bei diesen Konstruktionen kann die Feuchteerhöhung durch zeitweilig in dieser Ebene abfließendes Wasser im Hinblick auf die interessierende Feuchtesituation und das sommerliche Trocknungspotential vernachlässigt werden. Bei begrünten, teilweise abtrocknenden Deckschichten zeigen Untersuchungen in /33/, /52/ und /53/, dass es gerade in der sommerlichen Vegetationsphase zu deutlich geringeren Wasserabflüssen kommt, als dies während der Vegetationspause in der Heizperiode der Fall ist. In der Praxis ist nur von 15% - 25 % der auftretenden Niederschläge auszugehen. Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass nur starke und anhaltende Niederschläge zu nennenswerten Abflüssen auf der Oberfläche der XPS-Dämmplatten führen. Die Zeiträume mit einem kurzfristigen Ansteigen (einige Stunden) der relativen Luftfeuchtigkeit über die durchschnittlichen Verhältnisse in den Substrat- und Vegetationsschichten können daher auch für begrünte Deckschichten bei der zu betrachtenden Problemstellung vernachlässigt werden. Die Modellierung der Deckschichten kann, ohne Einschränkung der Aussagekraft, auf die Wiedergabe der durchschnittlichen, jahreszeitlich zu erwartenden Feuchteverhältnisse beschränkt werden. Kurzfristige Feuchtespitzen in und unmittelbar nach Zeiträumen mit direkt abfließendem Wasser können unberücksichtigt bleiben. Für die betrachteten Deckschichten wird damit der hinsichtlich des Austrocknungspotentials günstigste Fall untersucht.

5.3 Materialkennwerte für die Deckschichtmodelle

Setzt man eine funktionsfähige Drainageschicht in Verbindung mit ausreichendem Dachgefälle zu den Abläufen hin voraus, so wird das Abtrocknungsverhalten von begrünten Umkehrdächern vorwiegend von den physikalischen Eigenschaften der verwendeten Vegetations- und Substratschichten über der XPS-Wärmedämmung bestimmt. Untersuchungen in /2/ zeigen, dass in den unmittelbar über den XPS-Dämmplatten angeordneten Drainage- und Sickerschichten nahezu ganzjährig von hohen relativen Luftfeuchtigkeiten auszugehen ist. In früheren rechnerischen Untersuchungen (z.B in /3/) wurde dieser Umstand in vereinfachter Weise mit der Annahme einer zeitlich konstanten, relativen Luftfeuchtigkeit (95 -100 %) über der XPS-Dämmschicht berücksichtigt. Für typische Materialien, die in der Vegetations-, Substrat- und Drainageschicht verwendet werden, kann der Wertebereich für wichtige physikalische Eigenschaften (Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , Porosität p , Freie Wassersättigung w_f , Bezugsfeuchtegehalt w_{80} , Wärmeleitfähigkeit λ , Wasseraufnahmekoeffizient w , Rohdichte ρ) eingegrenzt werden. Für Deckschichten von Plattenbelägen aus Beton können hinlänglich bekannte Materialeigenschaften verwendet werden. Dies ermöglicht eine realitätsnähere Betrachtungsweise, welche die Standorteinflüsse in einem angemessenen Masse berücksichtigt und damit auch Unterschiede in Ergeb-

nissen aus Sondierungen an ausgeführten Umkehrdachaufbauten erklären lassen. Durch die Aufbereitung der Angaben in /9/, /17/, /23/, /24/, /32/, /33/, /34/, /35/, /52/, /53/, /54/ und /55/ wurden drei Modellaufbauten für eine Extensivbegrünung (Substrat Typ E), eine Intensivbegrünung (Substrat Typ I) und einen Plattenbelag in Form von Gehwegplatten in Feinkies abgeleitet, mit dem ein realitätsnahes, standortbezogenes Verhalten des Feuchte- und Wärmehaushalts in den Deckschichten nachgebildet werden kann. Tabelle 9 zeigt die verwendeten physikalischen Kennwerte im Überblick. Zusätzlich werden auch die verwendbaren Kennwerte für Muttererde spezifiziert, mit denen Nachberechnungen einiger bekannter Sondierungsergebnisse zur Feuchteaufnahme der XPS-Dämmstoffe in begrünten Umkehrdachaufbauten durchgeführt werden.

5.4 Klimadaten und Standortfaktor S

Zur Berücksichtigung von Standorteinflüssen wurden auf der Basis der Meteoronorm v5.0 /56/ stündliche Klimadaten in Form eines von WUFI lesbaren Klimadatensatzes für eine Reihe von europäischen Standorten generiert. Die Standorte wurden so ausgewählt, dass mögliche Unterschiede in den Aussen-temperaturen, der Regenmenge und der Solarstrahlung, ausgehend von Extremstandorten in den Alpen (z.B. Davos) bis hin zu milden und relativ regenarmen Klimaten (z.B. Paris), erfasst werden. Zusätzlich wurden einige Standorte aufbereitet, zu denen Praxissondierungen zur Feuchteeinlagerung in XPS vorgenommen wurden und deren Kennwerte in den Tabellen 1+2 enthalten sind. Tabelle 10 gibt einen Überblick der ausgewählten Orte mit charakteristischen Klimakennwerten und dem klimatischen Standortfaktor S, der sich wie folgt definiert:

$$(3) \quad S = \frac{S_{g,a} \times \theta_{e,m,a}}{10 \times R_a} \quad [\text{kWh } ^\circ\text{C} / \text{mm}]$$

$\theta_{e,m,a}$	=	Jahresmittel der Aussenlufttemperatur [$^\circ\text{C}$]
R_a	=	Jährliche Regenmenge [mm/m^2]
$S_{g,a}$	=	Jährliche Globalstrahlungssumme [kWh/m^2]

Im Hinblick auf die in Abschnitt 7 durchgeführte Bewertung des ΔU_i -Zuschlags zeigt Tabelle 10 auch die mittleren Niederschläge p in der Heizperiode. Sie wurden für die Standorte nach Heiztags- und Heizperiodendefinitionen in SIA 381/3 /18/ und VDI 2067 /10/ ermittelt und den in /61/, Tabelle 4, ausgewiesenen Werten gegenübergestellt.

5.5 Basismodelle für Umkehrdächer mit geschlossenen Deckschichten

Auf Basis der allgemeinen Randbedingungen unter 5.1, der vorgestellten Deckschichtmaterialien in Tabelle 9 und den Klimadaten in Tabelle 10 ergeben sich die in Tabelle 11 gezeigten drei Modellaufbauten für Umkehrdachsysteme mit geschlossenen Deckschichten. Jeder Deckschichtmodellaufbau wurde mit den XPS-Dämmstofftypen, basierend auf den Schichtenmodellen für die Diffusionswiderstandszahl μ gemäss Tabelle 7 und der deklarierten Wärmeleitfähigkeit λ_D nach SIA Merkblatt 2001 /15/, kombiniert. Bild 11 zeigt beispielhaft die Jahresverläufe der relativen Luftfeuchtigkeit in den Vegetations- und den Drainageschicht der Modellaufbauten für die Standorte Zürich (niederschlagsreich) und Stockholm (niederschlagsarm). Die resultierenden Feuchteverhältnisse können in der Realität auftretende Situationen gut nachvollziehen (z.B. Austrocknung extensiver Substratschichten in niederschlagsarmen Zeiträumen und andauernd hohe Luftfeuchtigkeiten unter Gehwegplatten in Splitt). Bei begrünten Dachaufbauten stellen die Modelleinstellungen eine günstige Annahme im Hinblick auf das Trocknungspotential dar, da die Auswirkungen von Zusatzbewässerungen, wie sie insbesondere bei intensiven Begrünungen erforderlich werden, und von zwischengespeichertem Überschusswasser bei starken Niederschlägen unberücksichtigt bleiben.

5.6 Nachberechnungen bekannter Sondierungsergebnisse

Eine Auswahl von Umkehrdachaufbauten bekannter Sondierungen aus den Tabellen 1+2, die über

ausreichende Angaben zu den Randbedingungen verfügen, wurden nachgebildet und einer Parametersstudie hinsichtlich des rechnerisch zu erwartenden Wertebereichs der Feuchteeinlagerung und der Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit unterzogen. Tabelle 12 gibt die konstruktiven Aufbauten und die Randbedingungen zusammen mit den Sondierungsergebnissen und dem rechnerisch ermittelten Wertebereich für die Feuchteaufnahme und die resultierende Wärmeleitfähigkeit wieder.

Bei den nachberechneten Dächern kamen ausnahmslos FCKW-geschäumte XPS-Dämmstoffe mit Dicken von 80 bis 120 mm zum Einsatz. Für die Diffusionseigenschaften dieser Dämmstoffe wurde von einer, den heutigen HFKW-geschäumten Produkten ähnlichen, Verteilung der Dampfdiffusionswiderstandszahl ausgegangen. Berücksichtigt wurde weiterhin, dass in den Firmendokumentationen der DOW aus den Jahren 1995 /57/ und 1979 /58/ für die eingesetzten XPS-Dämmplatten Roofmate SL tiefere (!) Diffusionswiderstandszahlen der Gesamtdämmplatte angegeben werden, als dies bei den Messwerten der in Tabelle 5 gezeigten heutigen Dämmplattengeneration Roofmate SL-X bei höheren Dicken der Fall ist. Im Jahr 1995 wird für Dämmplatten ab 80 mm Dicke ein μ -Wert von 120, im Jahr 1979 hingegen ein μ -Wert von 100 spezifiziert. Auf der Basis der Kennwerte der Dämmplatte Roofmate SL-X mit 100 mm Dicke aus Tabelle 7 wurden Schichtenmodelle für die Diffusionswiderstandszahl der FCKW-geschäumten Dämmplatten abgeleitet. Dabei wurde für Dämmplatten aus Gebäuden vor 1985 vom Wert des Jahres 1979, für solche danach vom Wert aus dem Jahr 1995 ausgegangen. Die Wärmeleitfähigkeit der FCKW-geschäumten Dämmplatten wurde entsprechend den Angaben in /57/ und /58/ auf 0.027 respektive 0.028 W/mK angepasst. Für die Temperatur in der Abdichtungsebene wurden die Fälle 20°C und 18°C untersucht.

Der Vergleich der Resultate der Modellberechnungen mit den bei Sondierungen festgestellten Wertebereichen für die Feuchteeinlagerung und die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit gemäss Tabelle 12 zeigen im Rahmen des Streubereichs, der sich naturgemäss aus den realen Randbedingungen ergibt, eine gute Übereinstimmung. Abweichungen in Form einer höheren Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitiger Übereinstimmung der Grössenordnung für die Feuchteaufnahme im realen Dachaufbau gegenüber der Modellrechnung, wie beispielsweise beim Dach Nr. 4 in Tabelle 12, lassen sich unter anderem mit der zusätzlichen, durch Ausdiffusion des Schäumgases, einhergehenden Verschlechterung des Wärmedämmvermögens der XPS-Dämmplatten erklären. Eine Grössenordnung hierfür liefert Dach Nr.17 in Tabelle 12, für welches auch die Trockenwärmeleitfähigkeit der ausgebauten 23 Jahre alten XPS-Dämmplatten ermittelt wurde. Die Differenz zur Einbauwärmeleitfähigkeit gemäss /58/ ergibt sich zu 3 mW/mK.

5.7 Mittlere Wärmeleitfähigkeit der Dämmplatten nach Feuchteaufnahme

Die Wärmeleitfähigkeit wird im Trockenzustand zu Beginn der Modellierung in allen Dämmplattenzonen gleich angenommen. Wegen der nichtlinearen Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt nach /13/ und der ungleichmässigen Verteilung der Feuchteeinlagerung über den Dämmplattenquerschnitt muss für die resultierende Wärmeleitfähigkeit der Dämmplatte nach der Feuchteaufnahme durch Diffusion am Ende des Betrachtungszeitraums die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit aus den resultierenden, feuchtegehaltskorrigierten Zonenwärmeleitfähigkeiten λ_i und den daraus bestimmbaren Teilwärmedurchlasswiderständen R_i nach dem Schichtenmodell der Dämmplatten aus Tabelle 7 ermittelt werden.

6. $\Delta\lambda$ -Zuschläge der untersuchten Umkehrdachsysteme

Auf der Basis der Modelle unter 5.ff und dem Schichtenmodell für die XPS-Dämmplatten nach 4.ff wurden für die Standorte 1 bis 11 in Tabelle 10 systematische Parameterstudien zur Ermittlung der Feuchteaufnahme und der Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit, ausgehend vom Nennwert der Wärmeleitfähigkeit λ_D und dem daraus resultierenden, erforderlichen $\Delta\lambda$ -Zuschlag durchgeführt. Die Berechnungen erfolgten über einen Zeitraum von 25 Jahren entsprechend einer Nutzungsdauer von 50 Jahren nach Abschnitt 2.ff. Umrechnungen auf kürzere Nutzungszeiträume (bis 30 Jahre) sind nach Gleichung (2) möglich. CO₂-geschäumte XPS-Dämmplatten vom Typ Roofmate SL-A mit 140 mm Dicke wiesen bei der Messung des Diffusionswiderstandes unerwartet tiefe Diffusionswiderstandszahlen auf. Daher wurde in allen Berechnungsvarianten zusätzlich das Verhalten einer fiktiven Dämmplatte mit 140mm Dicke und ähnlichen Diffusionswiderstandszahlen, wie bei der 180 mm dicken Dämmplatte festgestellt, mitberechnet, um die Auswirkungen einer prinzipiell möglichen Qualitätsverbesserung und die Notwendigkeit für eine genaue, produktebezogene Überprüfung des tatsächlichen Wasserdampfdiffusionsverhaltens von XPS-Dämmplatten über den gesamten Dämmplattenquerschnitt zu dokumentieren.

6.1 Allgemeine Erkenntnisse aus den Modellrechnungen

- Grundsätzlich zeigen die Modellrechnungen, dass für alle untersuchten Dämmplattentypen und Deckschichtarten die Einführung eines $\Delta\lambda$ -Zuschlags erforderlich ist. Abhängig vom Dämmplattentyp, der Dämmplattendicke und den Standorteinflüssen ergeben sich die folgenden Wertebereiche für notwendige $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschläge bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren, einer Soll-Raumlufttemperatur von $\theta_{i,m,SOLL} = 20^\circ\text{C}$, und unverschatteter Dachfläche:

Deckschichten	Roofmate SL-A CO₂-geschäumt $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$-Zuschläge	Roofmate SL-X HFKW-geschäumt $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$-Zuschläge
Plattenbeläge:	0.006 - 0.039 W/mK	0.003 - 0.022 W/mK
Extensive Begrünungen:	0.002 - 0.016 W/mK	0.001 - 0.009 W/mK
Intensive Begrünungen:	0.003 - 0.026 W/mK	0.002 - 0.013 W/mK

Die unteren Grenzwerte werden nur mit Dämmplatten der grössten aktuell lieferbaren Dicken (180 mm für CO₂-geschäumte Roofmate SL-A, 200 mm für HFKW-geschäumte Dämmplatten Roofmate SL-X) an milden Standorten ($\theta_{e,m,a} > 9^\circ\text{C}$) und bei moderaten Jahresniederschlägen ($R_a < 700 \text{ mm/m}^2\text{a}$) erreicht.

- Unabhängig von der Wahl der Deckschicht (Begrünt oder Plattenbeläge) lassen die untersuchten CO₂-geschäumten Roofmate SL-A gegenüber der HFKW-geschäumten Roofmate SL-X eine Verschlechterung des langfristigen Wärmeschutzverhaltens erwarten. Auf Grund der bereits deutlich höheren Nennwärmeleitfähigkeit λ_D beim Einbau und den festgestellten, teilweise erheblich tieferen Diffusionswiderstandszahlen im Dämmplattenquerschnitt ergeben sich bei CO₂-geschäumten Produkten wesentlich höhere Feuchteaufnahmen gegenüber HFKW-Produkten und den früher eingesetzten HFCKW- und FCKW-geschäumten Dämmplatten.
- Die Ergebnisse der fiktiven Dämmplatte mit der Bezeichnung SL-A-Fikt 140 (140 mm Dicke), bei der anstelle der gemessenen Diffusionswiderstandszahlen die deutlich höheren Werte der 180 mm dicken Roofmate SL-A verwendet wurden, zeigen die Notwendigkeit einer weitaus differenzierten Überprüfung des Diffusionsverhaltens der Dämmplatten als dies heute allgemein üblich ist. Mit den effektiv gemessenen Diffusionswiderstandszahlen ergeben sich für die 140 mm Roofmate SL-A um ca 50% höhere $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschläge als dies bei Annahme der erhöhten Werte analog der 180 mm Roofmate SL-A der Fall ist. Grundsätzlich muss die Ermittlung der Diffusionswiderstandszahlen für jeden Dämmplattentyp und jede Dicke getrennt erfolgen. Die Angabe von Wertebereichen für die Diffusionswiderstandszahlen, wie z.B. in Tabelle 4 in Anlehnung an die Produzentendeclaration im SIA Merkblatt 2001 /15/ gezeigt, reichen zur Beurteilung des langfristigen Wärmeschutzes von XPS-Dämmplatten in den hier betrachteten Umkehrdachsystemen nicht aus.

- Aussagen zur langfristigen Einhaltung des projektierten Wärmeschutzes, die an Umkehrdachaufbauten mit FCKW- und HFCKW geschäumten Dämmplatten gewonnen wurden, sind ohne Berücksichtigung der erforderlichen, richtigen und deutlich höheren $\Delta\lambda$ -Zuschläge grundsätzlich nicht auf CO₂-geschäumte Dämmplatten übertragbar.
- Für kürzere Nutzungsdauern im Bereich von 30 bis 50 Jahren können die genannten Wertebereiche gemäss Gleichung (2) aus dem $\Delta\lambda_{50}$ -Zuschlag ermittelt werden. Bei Dachflächen, für die nur 30 Jahre Nutzungszeit in Ansatz zu bringen sind, könnte demnach eine Reduktion um 40% berücksichtigt werden.

6.2 Standort- und deckschichtbezogenes Verhalten des $\Delta\lambda$ -Zuschlags

Umkehrdächer mit Deckschichten aus Plattenbelägen

Diese ergeben in guter Näherung eine lineare Abhängigkeit für den $\Delta\lambda$ -Zuschlag von der Jahresmitteltemperatur der Aussenluft $\theta_{e,m,a}$ am Standort. Die grafische Auswertung für die warmseitige Referenztemperatur $\theta_{i,m,SOLL} = 20^\circ\text{C}$ bei unverschattetem Dach zeigt Bild 12. Tabelle 13 gibt $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschläge für Jahresmitteltemperaturen im Bereich von 4 bis 10 °C der untersuchten Dämmplattentypen, zusammen mit den dämmplattenbezogenen Koeffizienten $A_{0^\circ\text{C}}$ und m_x zur Bestimmung von Rechenwerten für beliebige Jahresmitteltemperaturen, wieder.

Anwendungsbeispiel 1 für Tabelle 13:

Gebäude:	Nr.17 - Tabelle 2 - Kv. Polacken
Standort:	Stockholm
Jahresmitteltemperatur Aussenluft $\theta_{e,m,a}$:	6.7°C
$\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag nach Tabelle 13 :	0.018 W/mK (interpoliert aus Roofmate SL-X 100mm)
Vereinfachte Hochrechnung aus Messergebnissen:	0.015 W/mK (1979 eingebaute Roofmate SL 100 mm)

Umkehrdächer mit Deckschichten aus intensiver oder extensiver Begrünung

Diese zeigen in guter Näherung eine lineare Abhängigkeit des erforderlichen $\Delta\lambda$ -Zuschlags vom Standortfaktor S nach Gleichung (4), der Einflüsse aus Aussenlufttemperatur, Regenmengen und horizontaler Globalstrahlung berücksichtigt. Die grafische Auswertung für die warmseitige Referenztemperatur $\theta_{i,m,SOLL} 20^\circ\text{C}$ bei unverschattetem Dach zeigen die Bilder 13 (intensiv) und 14 (extensiv). Tabelle 14 (intensiv) und 15 (extensiv) geben die $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschläge für Standortfaktoren im Bereich von 0.40 bis 1.60 der untersuchten Dämmplattentypen, zusammen mit den dämmplattenbezogenen Koeffizienten $A_{0^\circ\text{C}}$ und m_x zur Bestimmung von Rechenwerten für beliebige Standortfaktoren, wieder.

Anwendungsbeispiel 2 für Tabelle 14:

Gebäude:	Nr.7 - Tabelle 2 - Städtisches Krankenhaus Kiel
Standort:	Kiel
Dachbegrünung:	Intensiv
Standortfaktor S:	1.02 kWh°C/mm
$\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag nach Tabelle 14:	0.011 W/mK (extrapoliert aus Roofmate SL-X 100mm !)
Vereinfachte Hochrechnung aus Messergebnissen:	0.011 W/mK (1986 eingebaute Roofmate SL 80 mm !)

Anwendungsbeispiel 3 für Tabelle 15:

Gebäude:	Nr. 1 - Tabelle 2 - Wohngebäude Maxstrasse
Standort:	Berlin
Dachbegrünung:	Extensiv
Standortfaktor S:	1.59 kWh°C/mm
$\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag nach Tabelle 15 (interpoliert):	0.0025 W/mK (Roofmate SL-X 120mm interpoliert)
Vereinfachte Hochrechnung aus Messergebnissen:	0.0014 W/mK (1989 eingebaute Roofmate SL 120mm)

6.3 Auswirkungen der Soll-Raumlufttemperatur $\theta_{i,m,SOLL}$ auf den $\Delta\lambda$ -Zuschlag

Die durchschnittlichen Auswirkungen von gegenüber der warmseitigen Referenztemperatur $\theta_{i,m,SOLL}=20-$

°C (Soll-Raumlufttemperatur - siehe 5.1ff) abweichenden Temperaturen unter den XPS-Dämmplatten zeigt Tabelle 16 als Korrekturfaktoren k_T für den $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag. Die Korrekturfaktoren sind abhängig von der Deckschicht für den Temperaturbereich 15 bis 22°C angegeben. Zwischen den Stützstellen kann linear interpoliert werden. Korrekturen sollten angebracht werden, wenn auf Grund der Nutzungsrandbedingungen andere Soll-Raumlufttemperaturen zu erwarten sind oder eingehalten werden müssen (z.B Pflegeheime, Krankenstationen, Werkstatträume).

6.4 Auswirkungen reduzierter Absorption von Solarstrahlung auf den $\Delta\lambda$ -Zuschlag

Eine reduzierte Absorption von Solarstrahlung verursacht durch die resultierenden, tieferen Temperaturen in den Deckschichten des Umkehrdachaufbaus eine Verlängerung der Kondensationsperiode, eine Erhöhung des Kondensatausfalls und gleichzeitig eine reduzierte Austrocknungsfähigkeit in der Trockenperiode. Grundsätzlich geht mit zunehmender Verschattung eine Erhöhung der Feuchteeinlagerung in den XPS-Dämmplatten einher. Mögliche Ursachen für eine reduzierte Absorption von Solarstrahlung sind:

- Verschattung durch angrenzende oder umgebende Baukörper (z.B Innenhöfe)
- Horizontverschattung (in der Regel nur in der Kondensationsperiode)
- Oberflächengestaltung (z.B helle Plattenbeläge)
- Verschattende Bepflanzung (Bäume, Sträucher etc)

Die Ergebnisse der Basisberechnungen zur Ermittlung des $\Delta\lambda$ -Zuschlags unter 6.2 stellen unter Praxisrandbedingungen den günstigst anzunehmenden Fall im Hinblick auf die Auswirkungen von absorbierter Solarstrahlung dar. Als Grenzfall wurde das Verhalten bei vollständiger Verschattung der Dachflächen untersucht (Absorptionskoeffizient $a_s = 0$). Tabelle 17 gibt Korrekturfaktoren k_S für den $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag, abhängig von der Jahresmitteltemperatur am Standort bei Plattenbelägen respektive vom Standortfaktor S bei Dachbegrünungen. Zwischenwerte können näherungsweise linear interpoliert werden.

6.5 Anwendung der Korrekturfaktoren k_T und k_S auf den $\Delta\lambda$ -Zuschlag

Die Korrekturfaktoren k_T und k_S sind auf den $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag anzuwenden:

$$(4) \quad \Delta\lambda_{50,T,S} = \Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}} \times k_T \times k_S \quad [\text{W/mK}]$$

Berechnungsbeispiel 1:

Standort:	Hamburg
Jahresmitteltemperatur Aussenluft $\theta_{e,m,a}$:	8.7°C
Raum-Solltemperatur $\theta_{i,m,SOLL}$:	18°C
Lage:	Innenhof 50% verschattet
Deckschicht:	Gehwegplatten in Splitt
XPS-Dämmung:	Roofmate SL-A -140mm (CO ₂ -geschäumt)
$\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag (Tabelle 13):	$0.017 + (9.0 - 8.7) \times (0.019 - 0.017) = 0.0176 \text{ W/mK}$
Temperaturkorrektur k_T (Tabelle 16):	0.70
Verschattungskorrektur k_S (Tabelle 17):	$1.40 - (1.4 - 1.2) \times (10 - 8.7) / (10 - 4) = 1.357$ entspricht 100% verschattet Bei 50% Verschattung $k_S = 1 + 0.357 \times 0.5 = 1.179$
Erforderlicher $\Delta\lambda$ -Zuschlag:	$\Delta\lambda_{50,18^\circ\text{C},S} = 0.0176 \times 0.70 \times 1.179 = 0.015 \text{ W/mK}$

Berechnungsbeispiel 2:

Standort:	Zürich
Standortfaktor S:	0.90 kWh°C/mm
Raum-Solltemperatur $\theta_{i,m,SOLL}$:	18°C
Lage:	Innenhof 50% verschattet
Deckschicht:	Intensivbegrünung
XPS-Dämmung:	Roofmate SL-A -140mm (CO ₂ -geschäumt)
$\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag (Tabelle 15):	$0.013 + (1.00-0.90)/(1.00-0.80) \times (0.015-0.013) = 0.014 \text{ W/mK}$
Temperaturkorrektur k_T (Tabelle 16):	0.60
Verschattungskorrektur k_S (Tabelle 17):	$2.30 - (2.3-1.7) \times (1.80-0.90)/(1.80-0.40) = 1.914$ entspricht 100% verschattet Bei 50% Verschattung $k_S = 1 + 0.914 \times 0.5 = 1.457$
Erforderlicher $\Delta\lambda$ -Zuschlag:	$\Delta\lambda_{50,18^\circ\text{C},S} = 0.014 \times 0.60 \times 1.457 = 0.012 \text{ W/mK}$

6.6 Beurteilung nutzungsbedingt geschlossener Deckschichten

Nutzungsbedingt geschlossene Deckschichten nach Bild 10 können grundsätzlich nicht auf Basis von reproduzierbaren Berechnungsrandbedingungen beurteilt werden, da die Vorgänge (wie Verschlammlung, Pfützenbildung etc.), die zu einem solchen Verhalten (insbesondere der Behinderung sommerlicher Austrocknung) führen, stark von den praktischen Ausführungsrahmenbedingungen und dem komplexen Umfeld der realen Dachexposition abhängen. Im Hinblick auf eine ausreichende Planungssicherheit solcher Umkehrdachaufbauten ist zu empfehlen, mindestens 50% des $\Delta\lambda$ -Zuschlags für die günstigste Ausführungsvariante der geschlossenen Deckschichten (Extensivbegrünung) anzubringen.

7. ΔU_r -Zuschläge, Entwässerungsfaktoren und mittlere Niederschlagsmengen

Die Gleichung (5) gibt die Berechnungsgrundlage zur Ermittlung des ΔU_r -Zuschlags für Umkehrdachsysteme nach EN ISO 6946 /1/ wieder. Wesentliche Einflussgrößen für die Höhe des ΔU_r -Zuschlags sind der Entwässerungsfaktor f , der angibt, welcher Anteil des Niederschlagswassers tatsächlich auf der Dachabdichtungsebene abläuft, und die mittlere Niederschlagsmenge p in der Heizperiode. Bislang fehlen in EN ISO 6946 /1/ jedoch konkrete Angaben zur Grösse von f und p .

$$(5) \quad \Delta U_r = p \times f \times x \cdot (R_i / R_T)^2$$

mit:	p	=	Durchschnittliche Niederschlagsmenge in der Heizperiode
	f	=	Entwässerungsfaktor als Anteil des Niederschlagswassers, welches tatsächlich auf der Dachabdichtung abläuft
	x	=	Faktor für den gestiegenen Wärmeverlust durch auf der Dachabdichtung ablaufendes Niederschlagswasser
	R_i	=	Wärmedurchlasswiderstand der XPS-Dämmschicht
	R_T	=	Wärmedurchlasswiderstand des gesamten Dachaufbaus ohne ΔU_r -Zuschlag

7.1 Der Faktor $f \times x$ nach EN ISO 6946

Für den Fall einlagiger Dämmschichten auf der Dachabdichtung mit offenen Deckschichten wie z.B. Kiesschichten wird der Faktor $f \times x = 0.04$ definiert. In der letzten Fassung der EN ISO 6946 /1/ wurde von der Ausgabe prA1:2002(D) zur Ausgabe +A1:2003(D) die Formulierung durch den Begriff *Dämmschichten mit Stumpfstössen* präzisiert, wodurch wohl zum Ausdruck kommen soll, dass dem Faktor $f \times x = 0.04$ ein vollständiger Wasserabfluss auf der Abdichtungsebene gleichgesetzt wird, wenn keine konstruktiv bedingte Behinderung für das abfliessende Niederschlagswasser vorliegt. In einer jüngst erschienenen Veröffentlichung in Bauphysik 26 (2004) - Heft 5 /61/ werden Entwässerungsfaktoren (dort als Leckrate L bezeichnet) für bekieste Umkehrdächer mit wasserableitenden Trennlagen vorgestellt und in Tabelle 2 abweichende Angaben zur Interpretation des Faktor $f \times x$ gemacht, indem für Dämmplatten mit Stumpfstössen und Kiesschicht auf Filtervlies eine Leckrate von nurmehr 83% angegeben wird. Für einen vollständigen Wasserabfluss (bezeichnet als Leckrate $L=100\%$) geben die Autoren $f \times x = 0.0481$ an, welcher offensichtlich auf der alleinigen Berücksichtigung des Faktors basiert, der sich aus den in /62/ publizierten Ergebnissen von Künzel ergibt. Im CEN-Dokument TC89/WG 2 N 295 E vom 08.10.19-98 /60/ wird der Faktor $f \times x$ jedoch als Mittelwert mehrerer, allgemein anerkannter Forschungsarbeiten zur Fragestellung des ΔU_r -Zuschlags definiert. Zu den berücksichtigten Arbeiten in /60/ zählen unter anderen diejenigen von Künzel /62/ und /63/, Petterson /64/ sowie die Veröffentlichungen /65/, /66/, /67/, /36/ und die Untersuchung /48/, an welcher der Autor selbst mit beteiligt war. Die zur Mittelwertbildung herangezogenen ΔU_r -Zuschläge wurden stets für einen vollständigen Wasserabfluss unter den Dämmplatten ermittelt. Der in /61/ für die Leckrate $L=100\%$ angegebene Wert für den Faktor $f \times x$ ist demnach zu hoch und ergibt zu hohe ΔU_r -Zuschläge. Richtig interpretiert sind für das konventionelle, bekieste Umkehrdach, ohne wasserableitende Trennlagen, bei vollständigem Wasserablauf in der Abdichtungsebene, folgende Verhältnisse anzunehmen:

Entwässerungsfaktor	$f = 1.00$ entsprechend Leckrate $L=100\%$
Basiswert Wärmeverlust:	$x = 0.04 (W \times \text{Tag}) / (m^2 \times K \times \text{mm})$

7.2 Entwässerungsfaktoren für Umkehrdächer

Im Rahmen der Arbeiten in /48/ wurden neben der Ermittlung des ΔU_r -Zuschlags auch systematische Untersuchungen zur Grössenordnung des Entwässerungsfaktors für verschiedene Deckschichten durchgeführt. Zur Beurteilung von begrüntem Umkehrdachaufbauten wurden dabei die umfangreichen Arbeiten von Liesecke zum Wasserhaushalt begrünter Dachaufbauten in /33/, /69/ und /70/ sowie Kolb in /53/ ausgewertet und berücksichtigt. In /61/ werden Untersuchungsergebnisse für die zu erwartenden Leckraten bei bekiesten Umkehrdachsystemen mit wasserableitenden Trennlagen vorgestellt. In /59/ werden die bautechnischen Rahmenbedingungen von Ortbetonfahrbelägen auf Umkehrdachsystemen vorgestellt. Die Auswertung der vorgenannten Arbeiten ergibt folgende Bedingungen, die den Vor-

schlagen zur Einführung der Entwässerungsfaktoren für Umkehrdachsysteme nach Tabelle 18 im Sinne der EN ISO 6946 zu Grunde liegen:

Bekieste Umkehrdächer, unverfugte Plattenbeläge aus Betongehwegplatten oder Verbundsteinen in Splitt verlegt mit Trennlage aus Filtervlies

Für diese Deckschichten ist davon auszugehen, dass grundsätzlich ein vergleichbares Verhalten hinsichtlich des Wasserablaufs in der Abdichtungsebene vorliegt. Eine Reduktion des in der Abdichtungsebene ablaufenden Wassers bei vollflächiger Verlegung von nicht verfugten Plattenbelägen oder Verbundsteinen darf in der Praxis nicht angesetzt werden, da unter baupraktischen Bedingungen weder ein eindeutiges Gefälle in Richtung der Abläufe noch eine wirklich dicht gestossene Verlegung realisierbar ist. Der Wassereintritt wird dadurch lediglich leicht verzögert, jedoch nicht unterbunden. Es kann der in /48/ formulierte Mittelwert für den Entwässerungsfaktor bei bekiesten Umkehrdachaufbauten verwendet werden.

Begrünte Umkehrdächer

Begrünte Umkehrdächer weisen naturgemäss ein grosses Spektrum bezüglich der möglichen Entwässerungsfaktoren auf. Der mögliche Wertebereich wird in /48/ eingegrenzt. Eine deckschichtspezifische Zuordnung von Entwässerungsfaktoren (z.B. Dicke, Schichtmaterialien, Verdichtung, Pflanzenarten etc) ist angesichts der vielfältigen Einflussgrössen nicht praxisgerecht. Für den Einzelfall kann dies allfällig durch eine spezielle, systembezogene, noch zu definierende Zulassungsprüfung erfolgen. Berücksichtigt man jedoch, dass gerade in der winterlichen Vegetationspause ohne zusätzliche Massnahmen bei bislang untersuchten Begrünungsaufbauten nur eine vergleichsweise geringe Wasserrückhaltung erfolgt, ist die Verwendung der in /48/ publizierten Mittelwerte für extensive und intensive Begrünungen, ohne systemspezifischen Nachweis, zielführend. Die Unterscheidung in extensiv und intensiv begrünte Aufbauten ist unter anderem deshalb sinnvoll, weil bei den heute verwendeten, vorkonfektionierten Dachsubstraten im Fall von extensiven Begrünungen höhere Strukturstabilitäten und geringere Schichtdicken vorliegen, als dies bei intensiven Begrünungen der Fall ist. Hierdurch kommen bei den in der Praxis am häufigsten auftretenden Regenintensitäten von 0.5 bis 1.5 mm/h Unterschiede beim anzusetzenden Entwässerungsfaktor zu tragen, da geringmächtige Extensivbegrünungen systembedingt ein deutlich geringeres Wasserrückhaltevermögen als Intensivbegrünungen mit einer erhöhten Setzungs- und Verdichtungstendenz aufweisen. Es wird vorgeschlagen, ohne spezifische Prüfung eines Begrünungsaufbaus die mittleren Entwässerungsfaktoren nach /48/ anzusetzen.

Verfugte Ortbetonplatten

Verfugte Ortbetonplatten weisen bei einwandfreier Ausführung unmittelbar nach der Erstellung keine Unterströmung der Dämmplatten auf. Die Fugen solcher Konstruktionen unterliegen jedoch einer dauernden, hohen Beanspruchung (Witterung, mechanische Belastungen im Fall von Parkdecks etc.) und erfordern einen dauernden und regelmässigen Unterhalt. Die Möglichkeit von zeitweisen und unkontrollierten Wassereintritten kann grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden. Darauf wird auch von Boy und Klepper in /59/ hingewiesen. Auf einen ΔU_r -Zuschlag für regelmässig wiederkehrende Unterströmung kann konstruktionsbedingt verzichtet werden. Hingegen sollten diese Systeme wegen der unregelmässigen, mittelfristig nicht vermeidbaren Wasserinfiltration über schadhafte Fugen und Anschlüsse bezüglich des $\Delta \lambda$ -Zuschlags wie unverfugte Plattenbeläge behandelt werden.

Deckschichten mit wasserableitenden Trennlagen

Wasserableitende Trennlagen für bekieste Umkehrdächer sind seit einigen Jahren im Einsatz und wurden hinsichtlich ihrer Eignung zur Reduktion des Wasserabflusses in der Abdichtungsebene untersucht. Zulassungen (z.B in Deutschland) für deren Anwendung in Umkehrdachaufbauten wurden erteilt. Auf der Basis der in /61/ diskutierten Untersuchungen zu dieser Themenstellung, wird bislang kein ΔU_r -Zuschlag berücksichtigt. Ausreichende und statistisch abgesicherte Praxiserfahrungen, die baupraktisch anzunehmende Einflüsse auf die effektiv erreichbare Reduktion der Wasserableitung in der Abdichtungsebene dokumentieren, liegen bis heute nicht vor. Verschlechterungen der in /61/ publizierten Leckraten in der praktischen Anwendung sind unter anderem durch folgende Einflüsse zu erwarten:

- Anschlüsse bei Dachdurchdringungen
- Stossüberlappungen in Querrichtung zum Dachgefälle
- Lokale Undichtheiten bei den Stossüberlappungen (z.B. durch Aufwölbungen, Kieselsteine, die bei Bekiesung oder späteren Arbeiten zwischen die Bahnstösse gelangen)
- Unvollständige Ausführung von Aufbordungen über die Nuttschicht

In den bisherigen Labor- und Feldversuchen wurde die Nachbildung von tatsächlichen Lecksituationen nicht durchgeführt und deren Einflusspotential bleibt unberücksichtigt. Die Sicherstellung der Einhaltung aller theoretischen Ausführungsrichtlinien ist in der Praxis nur schwer bis gar nicht mit vertretbarem Aufwand überprüfbar. Dies gilt insbesondere, weil die direkt beurteilbare Funktionalität des Umkehrdachaufbaus (Wärmedämmung, Wasserdichtheit der Abdichtung) nicht von der Wasserableitung über der Trennlage abhängt, da mit dem Leckanteil verbundene, zusätzliche Wärmeverluste nicht unmittelbar in Erscheinung treten und die Anwesenheit von Wasser in der Abdichtungsebene als systembedingte Normalität zu betrachten ist. Zieht man die in /61/ publizierten Leckraten aus ausgeführten Feld- und Laborversuchen heran, ist zu beachten, dass bei kleinen Regenintensitäten um 1 mm/h die höchsten Leckraten von 5.8 bis 8.2% bei über die Kiesschicht aufgebordeter und ideal verlegter Trennlage (Tabelle 1 in /61/) auftreten. Versuche am Centre Scientifique et technique du Bâtiment (CSTB), gemäss Abschnitt 3.2 in /61/, zeigen, dass bei nicht ausgebildeter Randhochführung unter Laborbedingungen allein Leckraten von 3 bis 5% auftreten können. Berücksichtigt man darüber hinaus, dass unter realen Klimabedingungen ca 70 - 80% der Regenniederschläge mit Intensitäten von 0.5 bis 1.5 mm/h erfolgen, so wird deutlich, dass die Annahme einer Leckrate von nahezu 0% unter zusätzlicher Beachtung baupraktischer Verlegeeinflüsse nicht realitätskonform ist. Im Hinblick auf die effektiv erreichbare Ausführungsqualität und einer für den erreichbaren baulichen Wärmeschutz erforderlichen Planungssicherheit ist zu fordern, von Festlegung eines Entwässerungsfaktors $f=0$ abzurücken. Angesichts bekannter Forschungsergebnisse, der Häufigkeitsverteilung auftretender Regenintensitäten und baupraktischer Einflüsse wird vorgeschlagen, den Entwässerungsfaktor $f=0.15$ bei bekiesten Umkehrdächern mit wasserableitender Trennlage einzuführen. Im Rahmen der noch ausstehenden Umsetzung der EN ISO 6946 resultieren dann ΔU_r -Zuschläge im Bereich von 0.01 bis 0.02 W/mK, abhängig von standortbezogenen Niederschlagsmengen in der Heizperiode. Sollten ausreichende, statistisch abgesicherte Nachweise an ausgeführten Bauten erbracht werden, kann der Entwässerungsfaktor f später entsprechend angepasst werden. Bislang wurde die wasserableitende Trennlage nur für das bekieste Umkehrdach mit gutem sommerlichem Trocknungsverhalten eingesetzt. Sobald die definitive Einführung von $\Delta \lambda$ -Zuschlägen im Sinne des vorstehenden Abschnitts 6 in EN ISO 6946 /1/ integriert worden ist, kann prinzipiell auch eine Anwendung auch bei Umkehrdächern mit unverfugten Plattenbelägen oder Verbundsteinen auf Splitt stattfinden. Mit den $\Delta \lambda$ -Zuschlägen nach Abschnitt 6 würden die Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit in Folge mangelndem sommerlichem Austrocknungsvermögen auch bei Applikation wasserableitender Trennlagen in ausreichendem Masse berücksichtigt werden.

7.3 Mittlere Niederschlagsmenge in der Heizperiode

Zur Bestimmung der mittleren Niederschlagsmengen in der Heizperiode liegen verschiedene Ansätze vor. In /61/ Tabelle 4 wird ein Überblick für verschiedene, europäische Standorte gegeben. Wesentlich für die Bestimmung der anzusetzenden Niederschlagsmenge sind die zu Grunde gelegte Heizperiode und die Heizgrenztemperatur. Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurden die verwendeten Standorte, basierend auf stündlichen Klimakennwerten aus /56/, in Anlehnung an die Heiztags- und Heizperiodendefinitionen in SIA 381/3 /18/ und VDI 2067 - Teil 1 / 10/, ausgewertet. Dabei wurden Heiztage, die in die Sommermonate Juni, Juli und August fallen, nicht berücksichtigt. Tabelle 10 stellt die ermittelten, mittleren Niederschlagsmengen p den in /61/ - Tabelle 4 gezeigten Werten gegenüber. Es ergeben sich verfahrensbedingt deutliche Streuungen. Im Rahmen dieser Untersuchung werden für weiterführende Betrachtungen, im Sinne einer Mindestwertabschätzung für den ΔU_r -Zuschlag, die jeweils tiefsten für einen Standort in Tabelle 10 gezeigten mittleren Niederschlagsmengen in der Heizperiode zu Grunde gelegt. Abschliessende Regelungen zur Ermittlung der anzusetzenden Niederschlagsmengen sind unter Beachtung länderspezifischer Verhältnisse (Klimaregionen, Wärmeschutzni-

veau) in Form nationaler Festlegungen anzustreben.

7.4 Erforderlicher ΔU_r -Zuschlag und resultierende Anforderungen an die XPS-Dämmung

Zur Bestimmung des erforderlichen Wärmedurchlasswiderstands der XPS-Wärmedämmung bei einem Sollwert für den Wärmedurchgangskoeffizienten U_{Soll} des Umkehrdachaufbaus muss Gleichung (6) aufgelöst werden.

$$(6) \quad U_{\text{Soll}} = U_T + \Delta U_r = 1/R_T + p \times f \times x \times (R_i / R_T)^2$$

mit: p, f, x, R_i, R_T = entsprechend Gleichung (5)
 U_{Soll} = U-Wert des Umkehrdachaufbaus nach Applikation des ΔU_r -Zuschlags
 U_T = U-Wert des Bauteils vor Applikation des ΔU_r -Zuschlags

Auflösen von (6) ergibt für die Ermittlung des effektiv erforderlichen Wärmedurchlasswiderstands $R_{T,\text{erf}}$ für den Umkehrdachaufbau ohne ΔU_r -Zuschlag folgende Beziehung:

$$(7) \quad R_{T,\text{erf}} = \frac{-(1-2 \times \Delta U_0 \times R_1) - \sqrt{(1-2 \times \Delta U_0 \times R_1)^2 - 4 \times (\Delta U_0 - U_{\text{Soll}}) \times R_1^2 \times \Delta U_0}}{2 \times (\Delta U_0 - U_{\text{Soll}})}$$

mit: $\Delta U_0 = p \times f \times x$
 $R_1 = R_T - R_i =$ Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils ohne XPS-Dämmung

Der effektiv anzuwendende ΔU_r -Zuschlag ergibt sich mit Gleichung (8) zu:

$$(8) \quad \Delta U_r = U_{\text{Soll}} - 1/R_{T,\text{erf}}$$

Die erforderliche Dämmstoffdicke d_{XPS} für die XPS-Dämmung ergibt sich nach Gleichung (9), wobei die Bemessungswärmeleitfähigkeit λ unter Berücksichtigung des system- und standortabhängigen $\Delta\lambda$ -Zuschlags einzusetzen ist:

$$(9) \quad d_{\text{XPS}} = (R_{T,\text{erf}} - R_1) \times (\lambda_D + \Delta\lambda)$$

Der erforderliche Wärmedurchlasswiderstand $R_{\text{XPS,Soll}}$ der XPS-Dämmung ergibt sich aus Gleichung (10):

$$(10) \quad R_{\text{XPS,Soll}} = R_{T,\text{erf}} - R_1$$

8. Erreichbarer Wärmeschutz bei Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten unter Berücksichtigung von $\Delta\lambda$ und ΔU_r

Unter Berücksichtigung der erforderlichen $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ und ΔU_r -Zuschläge für die untersuchten XPS-Dämmstoffe werden für Umkehrdachanwendungen mit unterschiedlichen Deckschichten die Bedingungen für das Erreichen von Anforderungswerten im Bereich des heute üblichen Wärmeschutzniveaus, mit Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_{\text{Dach,Soll}} = 0.20$ bis $0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$, analysiert. Betrachtet werden Umkehrdachaufbauten mit extensiver und intensiver Begrünung, Plattenbeläge in Splitt mit und ohne wasserabweisende Trennlage und verfugte Ortbetonplatten. Die Bewertung erfolgt in zwei Berechnungsschritten:

1. Ermittlung des erforderlichen Wärmedurchlasswiderstands $R_{\text{XPS,Soll}}$ unter Berücksichtigung des erforderlichen ΔU_r -Zuschlags nach Abschnitt 7.ff
2. Ermittlung des erreichbaren Wärmedurchlasswiderstands $R_{\text{XPS,Ist}}$ unter Berücksichtigung des $\Delta\lambda$ -Zuschlags auf die Nennwärmeleitfähigkeit nach Abschnitt 6.ff

Tabelle 19 zeigt die betrachteten Umkehrdachsysteme und den ΔU_r -Zuschlag am Beispiel eines Sollwert für den Wärmedurchgangskoeffizienten des Umkehrdachaufbaus von $U_{\text{Dach,Soll}} = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die resultierenden Anforderungswerte an den Wärmedurchlasswiderstand $R_{\text{XPS,Soll}}$ werden für Wärmedurchgangskoeffizienten von $U_{\text{Dach,Soll}} = 0.20, 0.25$ und $0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ ausgewiesen. Die Tabellen 20 bis 22 zeigen die erreichbaren Wärmedurchlasswiderstände $R_{\text{XPS,Ist}}$ und den Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{\text{Dach,Ist}}$ ohne ΔU_r -Zuschlag mit den untersuchten XPS-Dämmplatten unter Berücksichtigung des $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlags bei 50 Jahren Nutzungsdauer, einer Soll-Raumlufttemperatur $\theta_{\text{I,m,SOLL}} = 20^\circ\text{C}$ und unverschatteter Dachexposition für Deckschichten mit extensiven Begrünungen (Tabelle 20), intensiven Begrünungen (Tabelle 21) und Plattenbelägen (Tabelle 22). Eine vergleichende Gegenüberstellung der Anforderungswerte an den Wärmedurchlasswiderstand der XPS-Dämmung $R_{\text{XPS,Soll}}$, bei unterschiedlichen Sollwerten für den Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{\text{Dach,Soll}}$ des Umkehrdachaufbaus, mit den an verschiedenen europäischen Standorten erreichbaren Wärmedurchlasswiderständen $R_{\text{XPS,Ist}}$, zeigen Tabelle 23 (bei 50 Jahren Nutzungsdauer) und 24 (bei 30 Jahre Nutzungsdauer). Bild 15 zeigt am Beispiel des Standorts Zürich die erreichbaren U-Werte für verschiedene Umkehrdachaufbauten abhängig vom eingebauten XPS-Dämmstoff unter der Annahme eines Umkehrdachaufbaus auf einer 20 cm dicken Betondecke (Wärmedurchlasswiderstand inklusive der Wärmeübergangswiderstände $R_1 = 0.25 \text{ m}^2\text{K/W}$).

Bei einer Umsetzung der erforderlichen Korrekturen ($\Delta\lambda$ -Zuschlag und ΔU_r -Zuschlag) zur Bewertung des von der Nutzungsdauer abhängigen, erreichbaren Wärmeschutzes für Umkehrdachaufbauten mit geschlossenen Deckschichten im Sinne der EN ISO 6946 /1/ ergibt sich für die untersuchten XPS-Dämmstoffe folgende Situation:

$$U_{\text{Dach,Soll}} \leq 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Dieser Wertebereich (z.B. Anforderung für MINERGIE-Module in der Schweiz, Einzelbauteilanforderungen in Liechtenstein) wird auch bei Verwendung der aus wärmetechnischer Sicht günstigsten HFKW-geschäumten Dämmplatte Roofmate SL-X mit 200 mm Dicke nicht in allen Fällen erreicht. CO_2 -geschäumte XPS-Dämmplatten des Typs Roofmate SL-A erreichen diese Anforderungen in keinem der dargestellten Fälle. Dies gilt sowohl bei 50 als 30 Jahren Nutzungsdauer.

$$U_{\text{Dach,Soll}} = 0.20 \text{ bis } 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Dieser Wertebereich kann auch mit der aktuell maximalen Lieferdicke (180 mm) für die CO_2 -geschäumte Dämmplatte des Typs Roofmate SL-A nicht in allen Fällen erreicht werden. Bei Verwendung des HFKW-geschäumten Dämmplattentyps Roofmate SL-X kann dieser teilweise noch mit der Dämmstoffdicke von 140 mm erzielt werden.

$$U_{\text{Dach,Soll}} = 0.25 \text{ bis } 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Dieser Wertebereich, der dem aktuellen Wärmeschutzniveau der Schweiz für normale Neubauten entspricht, wird für CO₂-geschäumte Dämmplatte des Typs Roofmate SL-A für die Dämmplattendicke 140 mm mit den messtechnisch festgestellten, diffusionstechnischen Eigenschaften nicht erreichbar. Unter Annahme der geringeren Nutzungsdauer von 30 Jahren (Tabelle 24) und den höheren Diffusionswiderständen analog der 180 mm Dämmplatte kann der Wertebereich in Einzelfällen von einer 140 mm dicken Dämmplatte erschlossen werden. Mit HFKW-geschäumten Dämmplatten des Typs SL-X von 140 mm Dicke wird dieser Wertebereich mit wenigen Ausnahmen erreicht.

Werden zukünftig die erforderlichen Korrekturen für $\Delta\lambda$ und ΔU_f in angemessenem Umfang im Anhang D.4 der EN ISO 6946 /1/ berücksichtigt, ist davon auszugehen, dass für Dämmplattendicken unterhalb 140 mm der Wertebereich des heute in vielen europäischen Ländern üblichen Wärmeschutzniveaus für Neubauten und Sanierungen unabhängig vom Schäumgas nur noch in Ausnahmefällen (sehr milde Standorte mit geringen Niederschlägen) erreichbar ist. Das erreichbare Wärmeschutzniveau zwischen den HFKW- und CO₂-geschäumten Dämmplatten weist insgesamt markante Unterschiede auf. Die effektiv, erreichbaren Wärmedurchgangskoeffizienten mit den untersuchten CO₂-geschäumten XPS-Dämmplatten liegen, abhängig von der Deckschicht, um 25 bis 50% höher als diejenigen der HFKW-geschäumten XPS-Dämmplatten.

Bei Anwendung von Wärmedämmstoffdicken im Bereich von 140 bis 200 mm ist zu berücksichtigen, dass deutlich höhere Auflasten zur Sicherung gegen das Aufschwimmen der Dämmplatten vorgesehen müssen. Dies gilt insbesondere für leichte, extensive Dachbegrünungssysteme mit Rohdichten von 900-1000 kg/m³, die bei 12 bis 14 cm Dämmstoffdicke lediglich Auflasten von 120 - 140 kg/m² ergeben und damit bereits ab 140 mm Dämmstoffdicke zusätzlich beschwert werden müssen.

9. Fazit und Empfehlung zur Ausgestaltung des Anhangs D.4 der EN ISO 6946

Der in verschiedenen Ländern aus Klimaschutzanstrengungen (z.B. A, DK, CH) bereits im Rahmen der Umweltschutzgesetzgebung eingeleitete, mittelfristig zu erwartende Ausstieg aus der Verwendung von HFKW-geschäumten XPS-Dämmstoffen zugunsten der bereits marktgängigen und aus ökologischer Sicht zu bevorzugenden CO₂-geschäumten Substituten lässt zukünftig eine Verschlechterung des Langzeitverhaltens im Wärmeschutz bei Umkehrdachaufbauten erwarten. Die messtechnisch ermittelten Wasserdampfdiffusionswiderstände für eine Auswahl marktgängiger XPS-Dämmstoffe ergaben für CO₂-geschäumte sowohl deutlich tiefere Werte als auch grössere Streuungen zwischen unterschiedlichen Dämmplattendicken gegenüber HFKW-geschäumten Dämmstoffen. Letztere zeigen bezüglich des Wasserdampfdiffusionswiderstandes ein ähnliches Verhalten, wie die früher eingesetzten XPS-Dämmstoffe mit den Schäumgasen FCKW und HFCKW. Zusammen mit der höheren Nennwärmeleitfähigkeit der CO₂-geschäumten XPS-Dämmstoffe führt dies bei der Langzeitbetrachtung in Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten zu einer deutlichen Erhöhung der aus energetischer Sicht anzusetzenden, mittleren Bemessungswärmeleitfähigkeit infolge der Zunahme der Feuchteeinlagerung durch Kondensation bei Wasserdampfdiffusionvorgängen während der Nutzungsdauer. Feststellungen zum langfristigen Wärmeschutz, die aus Sondierungen an bestehenden Umkehrdächern mit FCKW und HFCKW-geschäumten XPS-Dämmstoffen gemacht wurden, sind daher grundsätzlich nicht auf CO₂-geschäumte XPS-Dämmstoffe übertragbar. Bekannte Sondierungsergebnisse zur Zunahme der Wärmeleitfähigkeit in XPS-Dämmstoffen in Umkehrdachaufbauten können darüber hinaus nur dann zur Beurteilung des tatsächlichen, langfristigen Wärmeschutzes herangezogen werden, wenn einheitliche Bewertungszeiträume angesetzt werden. Unabhängig von der Art des XPS-Dämmstoffs sind im Hinblick auf die Bewertung des erreichbaren Wärmeschutzes bei Umkehrdachaufbauten Präzisierungen (Entwässerungsfaktoren und mittlere Niederschlagsmengen in der Heizperiode) beim Verfahren zur Berücksichtigung der Wärmeverluste für in der Abdichtungsebene abfließendes Niederschlagswasser erforderlich, die eine praxisgerechte Berücksichtigung in dem bereits in EN ISO 6946 - D.4.3 /1/ verankerten Berechnungsverfahren erlauben. Zur Umsetzung einer einheitlichen Beurteilung des über die Nutzungsdauer erreichbaren Wärmeschutzes von Umkehrdachsystemen mit geschlossenen Deckschichten, und solchen mit nutzungsbedingt ähnlichen Eigenschaften im Sinne der europäischen Normenharmonisierung, sind im Rahmen der definitiven Ausgestaltung des Anhangs D.4 der EN ISO 6946 /1/ die Einführung eines $\Delta\lambda$ -Zuschlags in Abschnitt D.4.4 /1/ und Ergänzungen im Abschnitt D.4.3 /1/ zur Ermittlung des ΔU_f -Zuschlags notwendig.

9.1 Einführung Entwässerungsfaktoren in EN ISO 6946 - Abschnitt D.4.3

Zur Anwendung des Abschnitts D.4.3 - EN ISO 6946 /1/ sind praxisorientierte Entwässerungsfaktoren f zur Berücksichtigung des Anteils von unter der XPS-Dämmung abfließendem Niederschlagswasser in der Heizperiode zu definieren. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Planungssicherheit sollten mindestens die in Tabelle 15 gezeigten, deckschichtabhängigen Entwässerungsfaktoren verwendet werden. Sind für spezielle Deckschichtaufbauten systembezogene, nach einem allgemein anerkannten Verfahren ermittelte Entwässerungsfaktoren bekannt, können diese eingesetzt werden.

9.2 Mittlere Niederschlagsmengen in der Heizperiode EN ISO 6946 - Abschnitt D.4.3

Die Bestimmung der mittleren Niederschlagsmengen in der Heizperiode ist länderspezifisch zu regeln. Nur dann können die länderspezifischen Unterschiede im Wärmeschutzniveau bei Neu- und Altbauseanierungen sowie im Standortklima in ausreichendem Masse erfasst werden. Mögliche Ansätze dazu zeigt Tabelle 10 zusammen mit den Vorschlägen aus der Veröffentlichung in /61/.

9.3 Einführung eines $\Delta\lambda$ -Zuschlags in EN ISO 6946 - Abschnitt D.4.4

Die Einführung eines $\Delta\lambda$ -Zuschlags für XPS-Dämmstoffe in Umkehrdachaufbauten mit geschlossenen Deckschichten ist grundsätzlich auf Basis des Bewertungssystems in den Tabellen 13 - 15 möglich. Auf Grund der aktuellen Wertebereiche der Herstellerdeklarationen zu den Wasserdampfdiffusionswider-

standszahlen und der dickenabhängigen Nennwerte der Wärmeleitfähigkeit von XPS-Dämmstoffen (z.B. in /15/) sind den hier untersuchten Dämmstoffen ähnliche Wertebereiche für den $\Delta\lambda$ -Zuschlag zu erwarten. Da die hier untersuchten Dämmstoffe im Vergleich zum aktuellen Marktangebot die günstigsten deklarierten Kennwerte für die Nennwärmeleitfähigkeit, bei gleichzeitig übereinstimmenden Wertebereichsangaben für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen, aufweisen, können die $\Delta\lambda$ -Zuschläge der Tabellen 13 bis 15 als Mindestwerte interpretiert werden. Für XPS-Dämmstoffe, die deutliche Abweichungen in Höhe und Verteilung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl über den Dämmplattenquerschnitt und/oder grössere Unterschiede in der Nennwärmeleitfähigkeit λ_D gegenüber den hier untersuchten Dämmstoffen bei gleicher Dämmplattendicke aufweisen, ist das Bewertungssystem gegebenenfalls anzupassen oder produktespezifisch zu erweitern. Sollen für beliebige XPS-Dämmstoffe produktespezifische Kenngrössen (z.B. bei Produkteverbesserungen) durch Modellrechnungen ermittelt werden, sind ergänzende messtechnische Prüfungen hinsichtlich des Wasserdampfdiffusionsverhaltens über den Dämmplattenquerschnitt in Anlehnung an die Messreihen nach Abschnitt 3.1 notwendig. Zur Umsetzung des vorgestellten Bewertungssystems in EN 6946 /1/ sind folgende Festlegungen erforderlich:

9.3.1 Nutzungsdauer und Bewertungszeitpunkt

Es ist eine einheitlichen Nutzungsdauer T_N zu definieren, die der energetischen Bewertung zu Grund gelegt wird. Der Bewertungszeitpunkt zur Ermittlung des $\Delta\lambda$ -Zuschlags ist jeweils der halben Nutzungsdauer gleichzusetzen. Auf Grund des bekannten insgesamt guten Langzeitverhaltens von Umkehrdächern (insbesondere des Schutzes der Abdichtungsebene) sollte im Normalfall von 50 Jahren Nutzungsdauer und einem Bewertungszeitpunkt von 25 Jahren ausgegangen werden.

9.3.2 Standortklima

Für die Bewertung des Standorteinflusses in Anlehnung an die Tabellen 13 bis 15 sind folgende Klimakenngrössen erforderlich:

R_a	Jahressumme der Niederschläge	[mm]
$S_{g,a}$	Jahressumme der horizontalen Globalstrahlung	[kWh/m ²]
$\theta_{e,m,a}$	Jahresmittel der Aussenlufttemperatur	[°C]
S	Standortfaktor = $0.1 \times S_{g,a} \times \theta_{e,m,a} / R_a$	[kWh°C/mm]

Für eine praxisnahe Umsetzung des Standortbezugs ist eine regionale Zuordnung von Klimastationen anzustreben, wie es z.B. in SIA 380 - Thermische Energie im Hochbau /71/ - zur Berechnung des winterlichen Heizwärmebedarfs erfolgt ist.

9.3.3 Deckschichtart

Der Deckschichteinfluss kann durch folgende Typen³⁾ charakterisiert werden:

P	Plattenbeläge	Gehwegplatten, Verbundsteine, Verfugte Ort betonplatten
E	Extensivbegrünungen ¹⁾	gemäss Anforderungen in den FLL-Richtlinien /32/
I	Intensivbegrünungen	gemäss Anforderungen in den FLL-Richtlinien /32/
N	Nutzungsbedingt geschlossene Deckschichten ²⁾	

1) Extensivbegrünungen, die nicht die Spezifikationen der FLL-Richtlinien erfüllen oder bei denen der vorwiegende Einsatz von Muttererde vorgesehen ist, sind wie Intensivbegrünungen zu betrachten.

2) Dazu zählen Deckschichten auf Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten, die nicht in die Kategorien P, E oder I einzuordnen sind und ein erhöhtes Risiko für eine unzureichende, sommerliche Austrocknung aufweisen:

- Umkehrdächer mit Gefällen unter 2%
- Umkehrdächer oder Teilflächen bei denen lang andauernde Verschattungszeiträume anzunehmen sind

Für diese Dächer wird ein $\Delta\lambda$ -Zuschlag in Höhe von 50% der Deckschicht E vorgeschlagen.

- 3) Für Deckschichten mit speziellen Materialkonfigurationen, die eine Verbesserung des sommerlichen Trocknungsverhaltens oder/und eine Reduktion der Kondensation im Dämmplattenquerschnitt erwarten lassen, ist ein Einzelnachweis zu erbringen. Die Prüfbedingungen sind noch festzulegen.

9.3.4 Innenklima

$\theta_{i,m,SOLL}$ Soll-Raumlufttemperatur¹⁾ für normal beheizte Nutzungen = 20°C
 k_T Deckschichtabhängiger Korrekturfaktor bei abweichenden Soll-Raumlufttemperaturen im Bereich von 15 bis 22 °C nach Tabelle 16.

- 1) Für den Fall von Sanierungen in Form von sogenannten Plus- oder DUO-Dachaufbauten kann bis zu verbleibenden Dämmstärken des Altdachaufbaus von 6 cm näherungsweise der Korrekturfaktor bei $\theta_{i,m,SOLL} = 15^\circ\text{C}$ verwendet werden. Für $\theta_{i,m,SOLL} > 22^\circ\text{C}$ ist eine spezielle Untersuchung der Verhältnisse erforderlich.

9.3.5 Dachexposition

Bei anzunehmender, andauernder Verschattung durch angrenzende Gebäude, dichte Bepflanzung, Innenhöfe oder Oberflächen mit einer solaren Absorption für kurzwellige Strahlung deutlich unterhalb $a_s = 0.70$ (z.B helle oder weisse Plattenbeläge) sind Korrekturen am $\Delta\lambda$ -Zuschlag anzubringen.

k_s Korrekturfaktor für reduzierte, solare Strahlungsabsorption nach Tabelle 17

9.3.6 Nichterfasste Einflüsse

Der vorgestellte $\Delta\lambda$ -Zuschlag deckt lediglich die Auswirkungen auf die Wärmeleitfähigkeit infolge der Zunahme der Feuchteeinlagerung durch Kondensation bei Wasserdampfdiffusionsvorgängen in den XPS-Dämmplatten unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer ab. Sämtliche übrigen Einflüsse (Wasseraufnahme in beschädigten Randzonen oder Bereichen der Platten-stöße ohne Schäumhaut, Ausdiffusion des Zellgases im Fall von HFKW-geschäumten Dämmplatten), die zu einer Verschlechterung der Wärmedämmung über die Nutzungszeit führen, sind gesondert zu berücksichtigen.

9.3.7 Näherungsansätze zur Bestimmung eines produkteneutralen $\Delta\lambda$ -Zuschlags

Geht man grundsätzlich von einem vergleichbaren Wasserdampfdiffusionsverhalten der unterschiedlichen am Markt erhältlichen XPS-Dämmstoffe aus, so können aus den detaillierten Ergebnissen für den $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag in den Tabellen 13 bis 15 einfache Näherungslösungen abhängig vom Schäumgas, Dämmplattendicke, Deckschichteigenschaften und Standortklimabedingungen abgeleitet werden.

XPS-Dämmplatten mit Schäumgas CO₂

$$(11) \text{ Plattenbeläge: } \Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}} = 0.0997 - 0.4828 \times d_{\text{XPS}} - 0.0065 \times \theta_{e,m,a} + 0.0325 \times d_{\text{XPS}} \times \theta_{e,m,a}$$

$$(12) \text{ Intensivbegrünung: } \Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}} = 0.0612 - 0.2975 \times d_{\text{XPS}} - 0.0297 \times S + 0.1475 \times d_{\text{XPS}} \times S$$

$$(13) \text{ Extensivbegrünung: } \Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}} = 0.0370 - 0.1738 \times d_{\text{XPS}} - 0.0169 \times S + 0.0825 \times d_{\text{XPS}} \times S$$

XPS-Dämmplatten mit Schäumgas HFKW

$$(14) \text{ Plattenbeläge: } \Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}} = 0.0555 - 0.2788 \times d_{\text{XPS}} - 0.0033 \times \theta_{e,m,a} + 0.0163 \times d_{\text{XPS}} \times \theta_{e,m,a}$$

$$(15) \text{ Intensivbegrünung: } \Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}} = 0.0303 - 0.1500 \times d_{\text{XPS}} - 0.0144 \times S + 0.0738 \times d_{\text{XPS}} \times S$$

$$(16) \text{ Extensivbegrünung: } \Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}} = 0.0206 - 0.0988 \times d_{\text{XPS}} - 0.0091 \times S + 0.0450 \times d_{\text{XPS}} \times S$$

gültig bei 50 Jahren Nutzungsdauer, 20° Raum-Solltemperatur, unverschattet mit folgenden Abkürzungen:

d_{XPS}	=	Dämmplattendicke [m]
$\theta_{e,m,a}$	=	Jahresmittel der Aussenlufttemperatur am Standort [°C]
S	=	Standortfaktor = $0.1 \times S_{g,a} \times \theta_{e,m,a} / R_a$ [kWh°C/mm]
$S_{g,a}$	=	Jährliche Globalstrahlungssumme [kWh/m ²]
R_a	=	Jährliche Regenmenge [mm/m ²]

Anhang A - Literatur

- /1/ EN ISO 6946:1996 + Amd 1:2003 - Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method. Deutsche Fassung EN ISO 6946:1996+A1:2003. Berlin: Beuth-Verlag 2003.
- /2/ Künzel H.M.: Sommerliche Austrocknungsmöglichkeit von Umkehrdachdämmungen bei unterschiedlichen Deckschichten. Sonderdruck aus Bauphysik 19 (1997) Seite 58-60.
- /3/ Künzel H.M.: Feuchteverhalten von Umkehrdächern mit massiven Deckschichten. Fraunhofer-Institut für Bauphysik - IBP Mitteilung 295 (1996).
- /4/ Künzel H.M.: Bieten begrünte Umkehrdächer einen dauerhaften Wärmeschutz ? Fraunhofer-Institut für Bauphysik - IBP Mitteilung 22 (1995) N 271.
- /5/ Eggenberger A.: Feuchtehaushalt des Umkehrdaches. Im Auftrag der Stadtwerke Bochum GmbH - Bauabteilung, Postfach 102250, D-44722 Bochum, September 1996
- /6/ Cziesielski E.: Grundsätze zur Planung von Umkehrdächern, Sonderdruck aus Bauphysik-Kalender 2001.
- /7/ Van der Heiden O.: Rechnerische Untersuchung des Einflusses verschiedener Material- und Konstruktionsparameter auf die langfristige Wasseraufnahme in Dämmstoffen begrünter Umkehrdächer, Studienarbeit an der Universität Dortmund - Lehrstuhl für Bauphysik, 1997
- /8/ DOW Deutschland GmbH&Co: Es grünt so grün ... auf den Umkehrdächern. Ein Erfahrungsbericht von DOW, G-291-323-G0501.
- /9/ WUFI - Wärme- und Feuchtetransport instationär - Aktuelle Version 3.3 inkl. WUFI-Handbuch - Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen unter realen Bedingungen. Fraunhoferinstitut für Bauphysik, Holzkirchen 1993-2004.
- /10/ VDI 2067 - Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. Ausgabe 1983.
- /11/ EN ISO 10456: Building materials and products - Procedures for determining declared and design thermal values (ISO 10456:1999), December 1999.
- /12/ Künzel H.: Zum heutigen Stand der Kenntnisse über das UK-Dach. Bauphysik Heft 1 (1995), Seiten 1-7.
- /13/ Hay C.: Moisture Absorption and its Effect on the Thermal Performance of Extruded Polystyrene Insulation. Mechanical Engineering dept. - University of Alaska, Fairbanks, AK 99701, May 1984.
- /14/ www.tssl.be: Report 19-2001-FG: Status report on thermal conductivity evolution of roofmate SL-A under influence of water-absorption-by-diffusion, November 2001.
- /15/ SIA Merkblatt 2001, Wärmedämmstoffe, Deklarierte Werte der Wärmeleitfähigkeit und weitere Angaben der Lieferanten und Hersteller, Ausgaben 2003 und 1990.
- /16/ SN EN 12086:1997 D - Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, Schweizer Fassung. Schweizer Ingenieur und Architekten Verein, Postfach, CH-8039 Zürich, 1998.
- /17/ SN EN ISO 12572:2001 D, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdiffusionsdurchlässigkeit, Schweizer Fassung. Schweizer Ingenieur und Architekten Verein, Postfach, CH-8039 Zürich, 2002
- /18/ SIA 381/3: Heizgradtage der Schweiz. Empfehlung 1982.
- /19/ www.tssl.be: Report 05/2002-MD: Long term moisture absorption by diffusion on XPS [Roofmate SL-A of 100 mm], November 2002
- /20/ SN EN 12088:1997 D: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasseraufnahme durch Diffusion (1997) - Schweizer Fassung. Schweizer Ingenieur und Architekten Verein, Postfach, CH-8039 Zürich, 1998.
- /21/ Wohnhaus "Sentupada" - Illanz - Wasseraufnahme extrudierter Polystyrolämmplatten, Pernette+Wilhelm Ingenieure, Maienfeld 1997.
- /22/ Wohnhaus "Sentupada" - Illanz, Wasseraufnahme von XPS-Hartschaumdämmplatten 3 Jahre nach Flachdachsanierung, Pernette+Wilhelm Ingenieure, Maienfeld 2002.
- /23/ ZinCo Dach-Systeme: Das grüne Dach - Planung+Ausführung, Seminar 1992/93

- /24/ Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes und der Transmissionswärmeverlustreduzierung bei Dachbegrünungen mit Floatherm-Elementen, Fraunhoferinstitut für Bauphysik, 31.03.1993.
- /25/ DIN V 4108-4:2002-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte - Tabelle 2, (2002)
- /26/ EN 12524 - Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte, Juli 2000.
- /27/ H. Zehender: Einfluss von Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit von Schaumkunststoffen im Bereich von -30°C bis +30°C. Forschungsinstitut für Wärmeschutz E.V. - München: Sonderdruck aus "Kunststoffe im Bau" Heft 1/79.
- /28/ Zimmermann G., Zum Langzeitverhalten von Umkehrdächern. Sonderdruck aus der Zeitschrift "Deutsches Architektenblatt", Heft 10/1990.
- /29/ Krakenberger G. Hector C.M., XPS-värmeisolering i omvända tak med tät överbyggnad - Genomsnittlig fukthalt w% och dimensionerande λ_w , Bygg & teknik: Heft 04/2003 - S.12-17.
- /30/ Amend + Hinrichs Ingenieurgesellschaft: Sachverständigen-Gutachten Projekt 99/09137 vom 03.02.2000.
- /31/ N.A. Hendriks. BDA Büro Dakadvies. Verandering van enige eigenschappen bij PUR- und XPS-hardschuim op lange termijn. DIM Heft, April 1990.
- /32/ FLL-Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau E.V., Ausgabe Januar 2002.
- /33/ Liesecke H.J.: Wasserrückhaltung bei extensiven Dachbegrünungen, Garten und Landschaftsbau (1993), Heft 34, S.2142-2147.
- /34/ Hartge K.H.; Horn R.: Die physikalische Untersuchung von Böden. Verlag Enke 1992.
- /35/ Krus Martin: Feuchtetransport- und Speicherkoefizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Doktorarbeit an der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, 1995.
- /36/ Franke L., Deckelmann G.: Die Ausführung des Umkehrdaches bei erhöhten Anforderungen an den Wärmeschutz, TU Hamburg-Harburg, Forschungsbericht T2601, Mai 1994.
- /37/ Sven Ivarsson: Bestämning av värmekonduktivitet, densitet och fukthalt. Swedish National Testing Research Institute, Göteborg, 25.10.1991.
- /38/ Untersuchung durchfeuchteter UK-Dach-Extruderschäumplatten - Prüfzeugnisse Nr. 42 0548 8 89 -1 und 2. Staatliches Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, 21.03.1989.
- /39/ Hector Clarence M.: XPS-värmeisolering i omvända tak med tät överbyggnad. Dimensionerande λ_w med hänsyn till fukthalten i isoleringen, Bygg & teknik, Heft 02/2004 - S.48-52.
- /40/ Verordnung zu Verboten und Beschränkungen teilflourierter und vollflourierter Kohlenwasserstoffe sowie Schwefelhexafluorid (HFKW-FKW-SF₆-V), Österreichisches Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2001.
- /41/ Fluorierte Treibhausgase in Produkten und Verfahren - Technische Massnahmen zum Klimaschutz, Bericht des Umweltbundesamtes, Berlin 20. Februar 2004.
- /42/ Statutory order no. 552 of 2 July 2002 Regulating Certain Industrial Greenhouse Gases, Ministry of the Environment. Danish Environmental Protection Agency, July 2002.
- /43/ Verordnung über umweltgefährdende Stoffe (Stoffverordnung StoV), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, 01. Juli 2003.
- /44/ www.tssl.be: Report 04/2004-MD: Long term moisture absorption by diffusion on XPS [Roofmate SL-A of 100 mm], Juni 2004
- /45/ www.tssl.be: Report 05/2004-MD: Spreading of the absorbed water in 100mm thick ROOFMATE SL-A, Juli 2004
- /46/ www.tssl.be: Report 06/2004-MD: Status report on thermal conductivity evolution of roofmate sl-a under influence of water-absorption-by-diffusion, 07/2004.
- /47/ Report of the Conference of the Parties on its third Session, held at Kyoto from 1 to 11 December 1997, United Nations - Framework Convention on Climate Change, 1998.

- /48/ Pernette U./ Diebold F. - Wieland Engineering AG: Neubewertung des Δk -Wertes bei Umkehrdächern, Bauphysik 1 (1996) Seite 13.
- /49/ 3rd Draft ETAG: Guidline for European Technical Approval - Insulation Products for Inverted Roof Systems. EOTA: European Organisation for Technical Approvals, Brüssel, 28.März 2003.
- /50/ SN EN 13164:2001 D - Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmässig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrol-schaum (XPS) - Spezifikation - Schweizer Fassung. Schweizer Ingenieur und Architekten Verein, Postfach, CH-8039 Zürich, 2001.
- /51/ Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-23.4-224. Extrudergeschäumte Polystyrol-Hartschaumplatten vom Typ "Roofmate-A", Floormate 500-A" und "Floormate 700-A" für das Wärmedämmsystem "Umkehrdach" , Deutsches Institut für Bautechnik , 08.11.2002.
- /52/ Köhler Manfred: Fassaden- und Dachbegrünung, Ulmer Fachbuch - Landschafts- und Grünplanung, 1993.
- /53/ Kolb W., Schwarz T., Trunk R., Zott H.:Extensivbegrünung mit System ?,Bayrische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Würzburg/Veithöchstheim 1989.
- /54/ Hydrologie - Kapitel 5.1, IGB - Universität Berlin - Vorlesungsmanuskript 2004, Seiten 54-60.
- /55/ Schwarz B.:Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen, Sonderdruck aus "gi" Gesundheitsingenieur 93. Jahrg. (1972), Seiten 206-211.
- /56/ Meteororm Version 5.0 - Edition 2003
Meteotest, Bern 2003
- /57/ Systemlösungen der Wärmedämmung mit der Blauen von DOW,Firmenschrift CH 291-003-G/CH-03/95, Jahr 1995
- /58/ Roofmate SL im Umkehrdach schützt Flachdächer vor diesen Einflüssen,Firmenschrift EU 24620-G-1179, Jahr 1979
- /59/ Boy E., Klepper P.J.: Parkdach und Umkehrdachkonstruktion, Sonderdruck aus "Deutsches Architektenblatt" (12/1998).
- /60/ CEN/TC 89/WG 2 N Thermal transmittance: Introduction to proposed addendum to EN ISO 6949, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal trasnmittance - Calculation method (ISO 6946:1996)
- /61/ H.P Leimer, T. Bednar, J. Dreyer, H.M. Künzel, P. Palier, C. Rode, J. Tejchmann-Konarzeski:
Anforderungen an Umkehrdächer mit Trennlage. In Bauphysik 26 (2004), H.5, S.233-239.
- /62/ H. Künzel: Feuchtigkeitsverhältnisse, Temperaturverhältnisse und Wärmeschutz bei nicht belüfteten Flachdächern mit über der Abdichtung anbeagrachter Wärmedämmung aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum. Gesundheits-Ingenieur (1978), Seiten 361-375.
- /63/ H. Künzel, E. Mayer, J. Veit: Neue Untersuchungen und Überlegungen zur Frage des Zuschlags Δk bei Umkehrdächern, Fraunhoferinstitut für Bauphysik, Nr. B Ho 2/84, 1984.
- /64/ B.-A. Petterson: The Upside-Down Roof, Chalmers University of Technology, publ. 80:6, Göteborg, Schweden 1980.
- /65/ O. Fabricius:Die Feuchtigkeitsverhältnisse in Umkehrdächern - Deutsche Übersetzung des Forschungsberichts, vorgestellt in der Fachzeitschrift "Bygginindustrin" Nr. 28.87, 1987.
- /66/ H. Bangerter: Grundlagen zur Neubewertung der Bemessung des Wärmeschutzes bei Umkehrdächern und ähnlichen Systemen. Sonderdruck mit Ergänzungen/Vervollständigungen des Autors aus der Bauphysik 13, 1991
- /67/ H.M. Künzel, K.Kießl: Quantifizierung der niederschlagbedingten Wärmeverluste bei Umkehrdächern, Bauphysik 19 (1997), H. 1, S. 7-11.
- /68/ Schwarz W., Leisewitz A.: Emissionen und Minderungspotential von HF₆ KW, FKW und SF₆ in Deutschland. Öko-Recherche - Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH - Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Oktober 1999.
- /69/ Liesecke H.J.: Wasserrückhaltung und Abflussspende bei Extensivbegrünungen auf Flachdächern. Das Dachdeckerhandwerk (1989), H. 8, S 37-44 und 51-54.
- /70/ Liesecke H.J.: Dränverhalten extensiver Dachbegrünungen, Das Dachdeckerhandwerk (1994), H. 10, S 42-46.
- /71/ SIA 380/1 - Thermische Energie im Hochbau.Schweizer Ingenieur und Architekten Verein, Postfach, CH-8039 Zürich, 2001.
- /72/ Smits Gerard L.M.: Het omgekeerde groene dak, dat kan eigenlijk wel !, DAKENRAAD Nummer 63, Dezember 2004, S. 22-23.

Anhang B - Tabellen 1-24

Objektdaten					Angaben zu den Dachaufbauten				
Lit	N	Objekt	Land	Standort	Deckschicht ¹⁾	XPS-Typ	Dicke	Jahr	Entnahmezeitpunkt
[-]	[-]	[-]		[-]	[-]	[-]	[cm]	[-]	[-]
Deckschicht: Intensiv und extensiv begrünte Dachaufbauten									
/8/	1	Wohngebäude Maxstrasse	D	Berlin	10 cm Extensiv-Blähschiefer/Vlies	Roofmate SL	12	1989	Sep
/28/	2	Geschäftszentrum	D	Köln	32 cm Intensiv-Substrat / Kies	Styrodur	k.A.	1978	Okt-Nov
/8/	3	WDR Funkhaus	D	Düsseldorf	9 cm Extensiv-Substrat / Lavasplitt	Roofmate SP	8	1988	Okt
/8/	4	Kasino Bundesministerium	D	Bonn	30 cm Intensiv-Substrat / Blähschiefer	Roofmate SL	10	1978	Nov
/28/	5	Kurmittelhaus	D	Bad Füssing	26 cm Intensiv-Muttererde / Kies/Dra- in	Styrodur	k.A.	1981	Okt-Nov
/8/	6	Psych. Krankenhaus	D	Wiesloch	20 cm Extensiv-Muttererde / Tuff+ EB	Roofmate SL	10	1984	Sep
/8/	7	Städtisches Krankenhaus	D	Kiel	55 cm Intensiv-Muttererde /Kies	Roofmate SL	8	1986	Sep
/8/	8	Physikum Universität	D	Erlangen	9 cm Extensiv-Muttererde/ ZincoDrain	Roofmate SL	10	1987	Nov
/28/	9	Wohnüberbauung	D	Düsseldorf	30 cm Extensiv-Muttererde / Kiessand	Styrodur	k.A.	1979	Okt-Nov
/28/	10	Verwaltungsgebäude	D	Köln	30 cm Intensiv-Muttererde / Sand	Styrodur	k.A.	1980	Okt-Nov
Deckschicht: Gehwegplatten, Ortbetonplatten oder Betonverbundsteine									
/28/	11	Seminargebäude	D	Albersweiler	Betonplatten auf Stelzlagern	Styrodur	k.A.	1977	Mai-Jul
/28/	12	Gewerbegebäude	CH	Basel	Ortbetonplatten auf PE-Folie	Styrodur 3000	k.A.	1975	Okt-Nov
/28/	13	Krankenhaus	D	Ahaus	Betonverbundsteine auf Sand	Styrodur 3000	k.A.	1974	Okt-Nov
/29/	14	Kv Noatun	S	Uppsala	Gartenplatten in Feinsplitt	Roofmate	7	1973	k.A.
/29/	15	Kv Tennes	S	Göteborg	Pflastersteine	Roofmate	10	1987	k.A.
/22/	16	Wohnhaus Sentupada	CH	Illanz	Gehwegplatten in Feinkiesbettung	Styrodur 3035	14	1998	Okt-Nov
/29/	17	Kv Polacken	S	Stockholm	Gartenplatten in Feinsplitt	Roofmate	10	1979	k.A.
/28/	18	Geschäftshaus	D	Kiel	Ortbetonplatten auf Vlies	Styrodur 4000	k.A.	1986	Okt-Nov
/29/	19	Kv Arbetaren	S	Malmö	Gartenplatten in Feinsplitt	Roofmate	6	1983	k.A.
/30/	20	BIZ Hemsbach Pausenhof	D	Hemsbach	Gehwegplatten / Stelzlager	Styrodur 3000	8	1974	Sep
/28/	21	Hotel Könighof	D	Garmisch	Waschbeton im Splittbett	Styrodur	k.A.	1972	Mai-Jul
/28/	22	Warenhaus	D	Hagen	Flintcote+Beton auf PE-Folie	Styrodur 4000	k.A.	1982	Okt-Nov
/30/	23	BIZ Hemsbach Pausenhof	D	Hemsbach	Gehwegplatten in Feinkiesbettung	Styrodur 3000	8	1984	Sep

Tabelle 1: Auswahl von Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten (Dachbegrünungen, Gehweg- und Ortbetonplatten), die hinsichtlich der Feuchteaufnahme in XPS-Dämmplatten von 1989 bis 2002 untersucht wurden. Mit Ausnahme von Dach Nr.16 (HFCKW) handelt es sich ausschliesslich um FCKW- oder HFCKW-geschäumte XPS-Dämmplatten.

- 1) Die Deck- und Nutzsichten sind nicht mit vollständigem konstruktivem Aufbau wiedergegeben. Hierzu wird auf die entsprechenden Veröffentlichungen verwiesen.

Objektdaten				Materialkennwerte Entnahme			Hochrechnung auf 50 / 30 Jahre Nutzungsdauer			
				Dichte	Feuchte	Wärmeleitfähigkeit	Feuchte	Wärmeleitfähigkeit und $\Delta\lambda$ -Zuschlag		
N	Objekt	Alter	$\lambda_{10,lr}$ -XPS ¹⁾	Q_{tr}	u_{vol}	$\lambda_{Entnahme}$ ²⁾	$u_{25J/15J}$ ⁴⁾	$\lambda_{25J/15J}$ ⁵⁾	$\Delta\lambda_{50} / \Delta\lambda_{30}$	Zunahme _{25J /}
[-]	[-]	[a]	[mW/mK]	[kg/m ³]	[vol-%]	[mW/mK]	[vol-%]	[mW/mK]	[mW/mK]	[%]
Deckschicht: Intensiv und extensiv begrünte Dachaufbauten										
1	Wohngebäude Maxstrasse	7	27.8	37.9	0.4	28.2	1.4 / 0.9	29.2 / 28.7	1.4 / 0.9	5.1 / 3.1
2	Geschäftszentrum	11	30.2	37.7	1.9	31.4	4.3 / 2.6	32.9 / 31.8	2.7 / 1.6	9.0 / 5.4
3	WDR Funkhaus	8	24.2	43.3	1.6 ³⁾	25.7	5.0 / 3.0	28.9 / 27.0	4.7 / 2.8	19.4 / 11.6
4	Kasino Bundesministerium	18	30.5	33.7	4.6 ³⁾	36.5	6.4 / 3.8	38.8 / 35.5	8.3 / 5.0	27.3 / 16.4
5	Kurmittelhaus	8	27.3	34.2	2.4	28.8	7.5 / 4.5	32.0 / 30.1	4.7 / 2.8	17.2 / 10.3
6	Psych. Krankenhaus	12	26.9	32.1	4.2 ³⁾	31.7	8.8 / 5.3	36.9 / 32.9	10.0 / 6.0	37.2 / 22.3
7	Städtisches Krankenhaus	10	26.6	35.2	4.0 ³⁾	31.1	10.0 / 6.0	37.9 / 33.4	11.3 / 6.7	42.3 / 25.4
8	Physikum Universität	9	25.6	35.8	4.6 ³⁾	30.6	12.8 / 7.7	39.5 / 33.9	13.9 / 8.3	54.3 / 32.6
9	Wohnüberbauung	10	27.0	37.3	7.0	35.6	17.4 / 10.5	48.4 / 39.9	21.4 / 12.9	79.4 / 47.7
10	Verwaltungsgebäude	9	27.0	35.5	7.5	36.4	20.8 / 12.5	53.0 / 42.6	26.0 / 15.6	96.3 / 57.8
Deckschicht: Gehwegplatten, Ort betonplatten oder Betonverbundsteine										
11	Seminargebäude	11	27.0	41.7	0.7	27.7	1.6 / 1.0	28.7 / 28.0	1.7 / 1.0	6.2 / 3.7
12	Gewerbegebäude	14	27.0	35.1	4.1	31.7	7.3 / 4.4	35.4 / 32.0	8.4 / 5.0	31.1 / 18.6
13	Krankenhaus	15	27.0	34.1	4.7	32.5	7.9 / 4.7	36.2 / 32.5	9.2 / 5.5	34.0 / 20.4
14	Kv Noatun	29	29.8 ⁶⁾	k.A.	9.6	56.5 ⁶⁾	8.3 / 5.0	52.8 / 43.6	23.0 / 13.8	77.2 / 46.3
15	Kv Tennet	15	29.7 ⁶⁾	k.A.	5.5	32.1 ⁶⁾	9.8 / 5.9	34.0 / 32.3	4.3 / 2.6	14.4 / 8.7
16	Wohnhaus Sentupada	3	24.0	35.0	1.2	25.6	10.0 / 6.0	37.3 / 32.0	13.3 / 8.0	55.6 / 33.3
17	Kv Polacken	23	31.1 ⁶⁾	k.A.	14.4	45.0 ⁶⁾	15.7 / 9.4	46.2 / 40.2	15.1 / 9.1	48.6 / 29.1
18	Geschäftshaus	3	27.0	40.5	2.0	29.1	16.4 / 9.8	44.7 / 37.6	17.7 / 10.6	65.7 / 39.4
19	Kv Arbetaren	20	32.3 ⁶⁾	k.A.	14.4	48.1 ⁶⁾	18.9 / 11.4	53.1 / 44.8	20.8 / 12.5	64.4 / 38.6
20	BIZ Hemsbach Pausenhof	26	27.0	k.A.	22.4	64.9	21.5 / 12.9	63.4 / 48.9	36.4 / 21.9	135.0 / 81.0
21	Hotel Könighof	16	27.0	34.5	16.0	51.0	25.0 / 15.0	64.5 / 49.5	37.5 / 22.5	138.8 / 83.3
22	Warenhaus	7	27.0	40.8	11.7	43.0	41.7 / 25.0	84.2 / 61.3	57.2 / 34.3	211.7 / 127.0
23	BIZ Hemsbach Pausenhof	16	27.0	k.A.	32.6	92.1	50.9 / 30.6	128.7 / 88.0	101.7 / 61.0	376.5 / 225.9

Tabelle 2: Hochrechnung der zu erwartenden Feuchteeinlagerung, der Wärmeleitfähigkeiten und des $\Delta\lambda$ -Zuschlags für XPS-Dämmplatten in den Umkehrdachaufbauten nach Tabelle 1 bei einheitlichen Nutzungsdauern von 50 und 30 Jahren mit den energetisch relevanten Bewertungszeitpunkten nach der halben Nutzungsdauer von 25 resp. 15 Jahren.

- Die Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,lr}$ wurde aus den Messwerten der entnommenen Dämmplattenproben im feuchten Zustand mit dem funktionalen Zusammenhang nach C. Hay rechnerisch ermittelt sofern keine Messwerte im trockenen Zustand vorlagen. Falls keine Angaben zur Wärmeleitfähigkeit vorlagen, wurden jeweils die, in den Firmendokumentationen veröffentlichten Kennwerte spezifiziert.
- Die Wärmeleitfähigkeit bei der Entnahme wurde aus der Trockenwärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,lr}$ unter Verwendung des funktionalen Zusammenhangs für die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit in XPS-Dämmstoffen nach C. Hay /13/ ermittelt. Falls Labormesswerte vorlagen wurden diese übernommen.
- Der Mittelwert des Feuchtegehalts von entnommenen Dämmplattenproben unterscheidet sich von den zur Messung der Wärmeleitfähigkeit im feuchten Zustand verwendeten Plattenproben. Die mittlere Wärmeleitfähigkeit bei der Plattenentnahme wurde aus der Trockenwärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,lr}$ nach C. Hay /13/ hochgerechnet.
- Lineare Extrapolation der Feuchteeinlagerung nach der halben Nutzungsdauer von 25 resp. 15 Jahren.
- Lineare Extrapolation der Wärmeleitfähigkeit λ_{25} nach der halben Nutzungsdauer von 25 resp. 15 Jahren.
- Labormesswerte gemäss Veröffentlichung /29/.

Dämmplattenbereich	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ für XPS-Dämmplatten					
	Eggenberger ¹⁾ /5/		Künzel ²⁾ /3/		Van der Heiden ³⁾ /7/	
	Schäumgas		Schäumgas		Schäumgas	
	CO ₂	HFCKW	CO ₂	HFCKW	CO ₂	HFCKW
Schäumhautzone 1 - 2 mm dick	120 - 160	400 - 600	k.Angabe	k.Angabe	300 - 500	
10 mm Randzone mit Schäumhaut	100 - 110	260 - 290	160	320		
10 mm Randzone ohne Schäumhaut	90	200	k.Angabe	k.Angabe	k.Angabe	
Übergangszone 10 - 20 mm	75	110	k.Angabe	k.Angabe	k.Angabe	
Kernzone	73	103	60	90	143	
Dämmplatte gesamt	80 - 85	135 - 170	80 ³⁾	136 ³⁾	150	

Tabelle 3: Wertebereiche aus /3/, /5/ und /7/ zu Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen μ verschiedener XPS-Dämmplattenzonen abhängig vom verwendeten Schäumgas.

- 1) Berechnet entsprechend den Angaben zur μ -Wertverteilung in /5/.
- 2) Berechnet aus den Dickenangaben und μ -Werten in /3/.
- 3) Es wird angenommen, dass kein Einfluss des Schäumgases auf das Diffusionsverhalten besteht.

Jahr	DOW Chemical			BASF		
	Produkt	μ -Wert ¹⁾	Schäumgas	Produkt	μ -Wert ¹⁾	Schäumgas
1990	ROOFMATE SL	200 - 120	HFCKW	STYRODUR 3035 S	200 - 120	HFCKW
2003	ROOFMATE SL-X ROOFMATE SL-A	200 - 80	HFCKW CO ₂	STYRODUR 3035 CS	200 - 80	CO ₂

Tabelle 4: Angaben zweier Produzenten von XPS-Dämmplatten aus /15/ zum Wertebereich der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen in den Jahren 1990 und 2003.

- 1) Mit zunehmender Dicke abnehmend

Probeneigenschaften		Roofmate SL-A mit Schäumgas CO ₂								Roofmate SL-X mit Schäumgas HFKW				
Dicke		60 mm		100 mm		140 mm		180 mm		140 mm		200 mm		
Produktionsort ³⁾		Drusenheim		Drusenheim		Terneuzen		Schkopau		Schkopau		Rheinmünster		
Lage/Art von oben nach unten	d	ρ	μ	ρ	μ	ρ	μ	ρ	μ	ρ	μ	ρ	μ	
	mm	kg/m ³	-	kg/m ³	-	kg/m ³	-	kg/m ³	-	kg/m ³	-	kg/m ³	-	
Schäumhautzone ²⁾		2	66.5	490	70.1	400	47.6	300	53.5	310	41.6	310	56.7	404
Randzone 1 m.S.		10	42.8	187	44.8	187	39.4	141	43.5	158	35.7	193	44.5	214
Randzone 1 o. S.		10	36.9	111	38.4	134	37.4	101	41.1	121	34.3	169	41.4	167
Randzone 2		10	k.M.	k.M.	36.9 ¹⁾	127 ¹⁾	36.0	98	40.1	119	34.1	154	40.3	160
Randzone 3		10	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	39.0	115	k.M.	k.M.	39.9	153
Kernzone		20	30.3	6	33.7	77	35.3	34	36.6	88	33.3	107	36.7	109
Randzone m.S.		10	41.8	177	44.0	188	41.6	147	k.M.	k.M.	36.8	197	k.M.	k.M.
Gesamte Dämmplatte			35.6	84	37.0	119	36.2	77	38.3	109	34.0	137	38.8	139

Tabelle 5: Mittelwerte nach Auswertung der Messergebnisse zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstands und der Rohdichte von XPS-Dämmplatten in /18/.

- 1) Werte approximativ aus der Verteilung bei Roofmate SL-A mit der Dicke 140 mm ermittelt.
- 2) Rechnerische Ermittlung aus den Messwerten mit und ohne Schäumhaut.
- 3) Produktionsort gemäss Typen-Kennzeichnung auf der Dämmplattenverpackung bei Anlieferung.

Parameter	Schäumhaut 0 - 2mm	Randzone 2 -10 mm	Randzone 10 - x mm	Kernzone 20 - 40 mm
Porosität [%]	90	94	96	98
Bezugsfeuchtegehalt [kg/m ³]	34	35	36	37
Freie Wassersättigung [kg/m ³]	890	910	930	950

Tabelle 6: Parameter zur Generierung der fiktiven Feuchtespeicherfunktion für XPS-Dämmstoffe in WUFI /9/.

Roofmate SL-A 60 mm	Schäumhaut	Randzone	Zwischenzone				Kernzone	
Zonenbreiten [mm]	2	8	5	5			20	
μ - Wert [-]	490	111	80	45			6	
Rohdichte [kg/m ³]	66.5	36.9	34.7	32.5			30.3	
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	$\lambda_D = 0.035$							
Roofmate SL-A 100 mm	Schäumhaut	Randzone	Zwischenzone				Kernzone	
Zonenbreiten [mm]	2	8	10	10	10			10
μ - Wert [-]	400	134	127	110	94			77
Rohdichte [kg/m ³]	70.1	38.4	37.0	35.1	34.2			33.7
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	$\lambda_D = 0.036$							
Roofmate SL-A 140 mm	Schäumhaut	Randzone	Zwischenzone				Kernzone	
Zonenbreiten [mm]	2	8	15	15	15			15
μ - Wert [-]	300	101	98	77	55			34
Rohdichte [kg/m ³]	47.6	37.4	36.0	35.8	35.5			35.3
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	$\lambda_D = 0.038$							
Roofmate SL-A 140x mm 1)	Schäumhaut	Randzone	Zwischenzone				Kernzone	
Zonenbreiten [mm]	2	8	15	15	15			15
μ - Wert [-]	350	120	110	110	100			85
Rohdichte [kg/m ³]	47.6	37.4	36.0	35.8	35.5			35.3
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	$\lambda_D = 0.038$							
Roofmate SL-A 180 mm	Schäumhaut	Randzone	Zwischenzone				Kernzone	
Zonenbreiten [mm]	2	8	10	10	10	20	20	30
μ - Wert [-]	310	121	119	115	109	102	95	88
Rohdichte [kg/m ³]	53.5	41.1	40.1	39.0	38.0	37.1	37.0	36.6
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	$\lambda_D = 0.038$							
Roofmate SL-X 100 mm 2)	Schäumhaut	Randzone	Zwischenzone				Kernzone	
Zonenbreiten [mm]	2	8	10	10	10			20
μ - Wert [-]	400	164	149	135	121			107
Rohdichte [kg/m ³]	41.6	34.3	34.1	33.8	33.6			33.3
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	$\lambda_D = 0.029$							
Roofmate SL-X 140 mm	Schäumhaut	Randzone	Zwischenzone				Kernzone	
Zonenbreiten [mm]	2	8	15	15	15			20
μ - Wert [-]	310	164	149	135	121			107
Rohdichte [kg/m ³]	41.6	34.3	34.1	33.8	33.6			33.3
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	$\lambda_D = 0.031$							
Roofmate SL-X 200 mm	Schäumhaut	Randzone	Zwischenzone				Kernzone	
Zonenbreiten [mm]	2	8	10	10	10	20	20	40
μ - Wert [-]	400	167	160	153	142	131	120	109
Rohdichte [kg/m ³]	56.7	41.4	40.3	39.9	39.2	38.3	37.6	36.7
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	$\lambda_D = 0.031$							

Tabelle 7: Schichtenmodell für die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ und die Rohdichte ρ der untersuchten XPS-Dämmplatten vom Typ Roofmate SL-A und SL-X zur Anwendung bei Modellrechnungen in WUFI /9/. Mit angegeben sind die dämmstoff- und dickenspezifischen, deklarierten Wärmeleitfähigkeiten λ_D nach /15/.

- 1) Fiktive Dämmplatte mit erhöhten μ -Werten im Dämmplattenquerschnitt in Anlehnung an die Dämmplatte SL-A 180 und Annahme des Mittelwerts aus SL-A 100 mm und 180 mm im Schäumhautbereich.
- 2) Werte von der Dämmplatte SL-X 140 mm näherungsweise übernommen, Schäumhaut mit erhöhtem μ -Wert.

Quelle	Untersuchungsbasis	Funktionaler Zusammenhang ²⁾
TSSL /14/	CO ₂ -geschäumte Dämmstoffe	$\lambda(u) = \lambda_0 * e^{(0.0443 * u)}$
Hay /13/ - Mittelwertkurve	HFCKW-geschäumte Dämmstoffe	$\lambda(u) = \lambda_0 * (1 + u * 3.792 + u^2 * 11.043)$
EN ISO 10456 /11/ ¹⁾	Kein Bezug	$\lambda(u) = \lambda_0 * e^{(2.5 * u)}$

Tabelle 8: Ansätze zur Berücksichtigung des Feuchteinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit von XPS-Dämmstoffen .

- 1) Der Ansatz ist nur bis $u = 10$ vol-% zulässig.
- 2) u entspricht dem volumenbezogenen Feuchtegehalt.

Parameter	F ⁴⁾	E ⁴⁾	Materialien zur Modellbildung geschlossener Deckschichten in Umkehrdächern						
			Substrat Extensiv Typ E	Substrat Intensiv Typ I	Substrat ⁵⁾ Muttererde Typ M	Gehwegplatten Beton	Drainage Gründach	Feinsplitt	Vlies
Schichtdicke	d	[cm]	8	25	12 - 400	4	38050	5	1
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/mK	0.30 ¹⁾	0.70 ¹⁾	1.60 ¹⁾	1.60 ²⁾	0.45 ¹⁾	1.80 ¹⁾	2.40 ¹⁾
Wärmekapazität	c_p	J/kgK	1100	1100	1100	850	840	1000	1500
Rohdichte trocken	ρ	kg/m ³	900	600	1000	2200	900	1800	140
Feuchtegehalt	$w_{80\%}$	kg/m ³	20	50	50	53	5	5	< 0.01
Freie Wassersättigung	w_f	kg/m ³	250	500	500	175	200	250	< 0.01
Porosität	p	%	67	75	75	18	65	40	< 0.01
Diffusionswiderstandszahl	μ	-	10	20	20	92	5	25	50
Wasseraufnahmekoeffizient	w	kg/m ² -s ^{0.5}	25	40	40	- ³⁾	10	1	<0.01

Tabelle 9: Physikalische Eigenschaften für Materialien zur Konfiguration der Modelldeckschichten von Umkehrdächern.

- 1) Wärmeleitfähigkeit konstant angenommen
- 2) Wärmeleitfähigkeit mit Feuchteabhängigkeit analog Beton B15 in WUFI-Materialdatenbank
- 3) Wasseraufnahmekoeffizient analog Beton B15 in WUFI-Materialdatenbank
- 4) F = Formelzeichen, E = Einheit
- 5) Verwendet zur Nachberechnung von Sondierungsergebnissen an begrünten Umkehrdächern

N	Ort	Jahresmittel ¹⁾		Jahressumme ¹⁾		Mittlerer Niederschlag in der Heizperiode		
		Aussenlufttemperatur $\theta_{e,m,a}$ [°C]	Niederschlag R_a [mm/m ²]	Globalstrahlung $S_{g,a}$ [kWh/m ²]	Standortfaktor S [kWh×°C/mm]	nach SIA 381/3 ^{1) 2)} p [mm/d]	nach VDI 2067 ^{1) 3)} p [mm/d]	Tabelle 4 in /61/ p [mm/d]
1	Davos	3.3	1084	1381	0.42	2.26	2.43	2.03 ⁴⁾
2	Helsinki	4.5	651	964	0.67	1.64	1.64	1.49
3	La Chaux de Fonds	6.2	1406	1167	0.51	3.62	3.74	-
4	Hohenpeissenberg	6.5	1211	1209	0.65	2.51	2.7	2.39
5	Stockholm	6.7	539	980	1.22	1.18	1.22	1.18 ⁴⁾
6	Göteborg	7.1	783	933	0.85	2.09	2.02	1.93
7	Hamburg	8.7	756	952	1.10	1.93	1.96	3.08
8	Zürich	9	1086	1085	0.90	2.42	2.76	2.36 ⁴⁾
9	Frankfurt	9.6	688	1025	1.43	1.76 ⁴⁾	1.79	2.17
10	London	10.4	544	945	1.81	1.46	1.55	1.96
11	Paris	10.9	608	1040	1.86	1.73	1.79	1.57
12	Kiel	8.2	774	960	1.02	1.96	2.06	1.86
13	Erlangen	8.8	645	1044	1.42	1.46	1.53	1.9
14	Bonn	9.8	632	973	1.51	1.64	1.66	1.75
15	Berlin	9.3	584	999	1.59	1.36	1.5	3.08

Tabelle 10: Jährliche Klimakennwerte, resultierender Standortfaktor $S = 0.1 \times S_{g,a} \times \theta_{e,m,a} / R_a$ und mittlere tägliche Niederschlagsmenge p in der Heizperiode verschiedener Standorte zur Anwendung in den Modellrechnungen (Nr. 1 bis 11) und für Nachberechnungen bekannter Sondierungsergebnisse an Umkehrdächern mit geschlossenen Deckschichten (Nr. 12-15).

1) Ermittelt aus den Basisklimadaten nach Meteonorm v 5.0 /56/.

2) Niederschlag in der Heizperiode nach SIA 381/3 /18/: Heizgrenze: 12°C Heiztag: Tagesmittel $\theta_a < 12^\circ\text{C}$ Heizzeit: 01.Sep - 31.Mai
Jeder Tag mit $\theta_a < 12^\circ\text{C}$ in der Heizzeit wird als Heiztag gewertet

3) Niederschlag in der Heizperiode nach VDI 2067 /10/: Heizgrenze: 15°C Heiztag: Tagesmittel $\theta_a < 15^\circ\text{C}$ Heizzeit: 01.Sep - 31.Mai
Beginn/Ende der Heizperiode wenn das 5-Tagesmittel $\theta_a < 15^\circ\text{C}$ (Beginn) respektive $\theta_a \geq 15^\circ\text{C}$ (Ende)

4) Verwendete Werte für den mittleren Niederschlag zu Ermittlung der ΔU -Zuschläge in Tabelle 19 im Sinne einer Mindestwertbetrachtung.

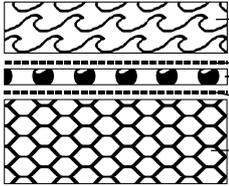
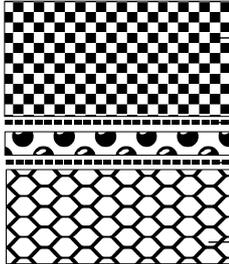
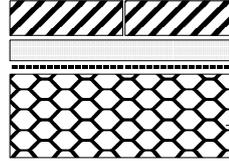
Umkehrdachsystem		Randbedingung / Schichtaufbau	Modell
Aussenrandbedingungen		Aussenklima mit stündlichen Werten Datenquelle: Meteonorm v 5.0 /56/ Datenformat: .KLI gemäss WUFI /9/	Aussenlufttemperatur θ_a Relative Luftfeuchtigkeit ϕ_a Globalstrahlung horizontal $q_{S,hor}$ Regenmenge mm/m^2h Luftdruck Pa
Extensiv begrünt	12345	80 mm Substrat Typ E 1 mm Filtervlies 30 mm Drainage Gründach 1 mm Filtervlies <i>variabel</i> XPS-Hartschaum mit verschiedenen Dicken und Dämmplattentypen auf Abdichtungsebene	
Intensiv begrünt	12345	250 mm Substrat Typ I 1 mm Filtervlies 50 mm Drainage Gründach 1 mm Filtervlies <i>variabel</i> XPS-Hartschaum mit verschiedenen Dicken und Dämmplattentypen auf Abdichtungsebene	
Plattenbeläge	1234	40 mm Gehwegplatten (Beton) 50 mm Feinsplitt 1 mm Filtervlies <i>variabel</i> XPS-Hartschaum mit verschiedenen Dicken und Dämmplattentypen auf Abdichtungsebene	
Innenrandbedingungen		Zeitlich konstant warmseitig der XPS-Dämmplatten	Innentemperatur $\theta_i = \text{konstant}$ Rel. Luftfeuchtigkeit $\phi_i = 100\%$

Tabelle 11: Untersuchte Modellfälle für die Umkehrdachaufbauten mit geschlossenen Deckschichten.

Nr - Ort /Literatur/	Nr.7 - Kiel /8/		Nr. 4 - Bonn /8/		Nr.1 - Berlin /8/		Nr. 17 - Stockholm /29/	
Nutzung	Krankenhaus		Kasino Bundesministerium		Wohnhaus		Bürogebäude	
Baujahr/Alter/ $\theta_{i,soLL}$	1986 / 10 Jahre / 20°C		1978 / 18 Jahre / 20°C		1989 / 7 Jahre / 20°C		1979 / 23 Jahre / 20°C	
Nutzschicht	Intensiv begrünt		Intensiv begrünt		Extensiv begrünt		Gehwegplatten	
Dachaufbau bis Abdichtung	55 cm Erdreich Vlies 3cm Kies 16/32 8cm Roofmate SL		30 cm Substrat ⁵⁾ Geotextilvlies 8cm Blähschiefer 10cm Roofmate SL		10 cm Blähschiefer +Humus Geotextilvlies 12cm Roofmate SL		5 cm Gehwegplatten 6 cm Feinsplitt Vlies 10 cm Roofmate SL	
Mittelwerte der Dämmplatten	Messung	Rechnung ⁴⁾ $\theta_i = 18 - 20^\circ\text{C}$	Messung	Rechnung ⁴⁾ $\theta_i = 18 - 20^\circ\text{C}$	Messung	Rechnung ⁴⁾ $\theta_i = 18 - 20^\circ\text{C}$	Messung	Rechnung ⁴⁾ $\theta_i = 18 - 20^\circ\text{C}$
Feuchteaufnahme u_E [vol-%]	4.0 ¹⁾	3.4 - 5.0	4.6 ¹⁾	2.9 - 5.0	0.4	0.4 - 0.7	15.5	11.0 - 15.0
Wärmeleitfähigkeit ¹⁾ λ_E [mW/mK]	31.1 ¹⁾	31.2 - 33.3	36.5 ¹⁾	31.8 - 34.8	28.2	27.5 - 27.8	45	42.0 - 49.0
Wärmeleitfähigkeit ²⁾ $\lambda_{10,tr}$ [mW/mK]	27		28		27		28 (31) ³⁾	
Zunahme $\Delta\lambda$ [mW/mK]	4.1	4.2 - 5.3	8.5	3.8 - 6.8	1.2	0.5 - 0.8	17.0 (14) ⁶⁾	14.0 - 21.0

Tabelle 12: Nachberechnung verschiedener sondierter Umkehrdachaufbauten aus /8/ und /29/. Vergleich der rechnerisch ermittelten Feuchteaufnahme und Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von XPS-Dämmstoffen mit messtechnisch festgestellten Wertebereichen.

- 1) Falls sich der Feuchtegehalt der Dämmplatte zur Bestimmung der Entnahmewärmeleitfähigkeit von der mittleren festgestellten Feuchteaufnahme der entnommenen Dämmplatten unterscheidet, wurde die messtechnisch ermittelte Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung der Beziehung von C. Hay /13/ korrigiert.
- 2) Deklarierte Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10,tr}$ zum Zeitpunkt des Einbaus nach Firmendokumentationen der DOW /57/ und /58/
- 3) Klammerwert entspricht der messtechnisch nach Trocknung festgestellten Wärmeleitfähigkeit in /29/
- 4) Der Wertebereich gibt die Berechnungsergebnisse wieder, die sich bei 18°C respektive 20°C Temperatur in der Abdichtungsebene unter den XPS-Dämmplatten ergeben.
- 5) Lokal bis 80 cm Substratdicke nach /8/.
- 6) Klammerwert entspricht der Zunahme ohne Berücksichtigung der Verschlechterung der Trockenwärmeleitfähigkeit gegenüber der deklarierten Wärmeleitfähigkeit zum Zeitpunkt des Einbaus.

Deckschicht: Plattenbeläge				$\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}\text{-Zuschlag} = A_{0^\circ\text{C}} + m_x \times \theta_{e,m,a}$							
Jahresmittel Aussenlufttemperatur $\theta_{e,m,a} =$				4	5	6	7	8	9	10	
Roofmate	Dicke	$A_{0^\circ\text{C}}$	m_x	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	
CO ₂	SL-A	100mm	0.0519	-0.0033	0.039	0.035	0.032	0.029	0.026	0.022	0.019
	SL-A	140mm	0.0367	-0.0022	0.028	0.026	0.024	0.021	0.019	0.017	0.015
	SL-A _{fikt}	140mm	0.0247	-0.0015	0.019	0.017	0.016	0.014	0.013	0.011	0.010
	SL-A	180mm	0.0132	-0.0007	0.010	0.010	0.009	0.008	0.008	0.007	0.006
HFKW	SL-X	100mm	0.0288	-0.0017	0.022	0.020	0.019	0.017	0.015	0.014	0.012
	SL-X	140mm	0.0140	-0.0009	0.010	0.010	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005
	SL-X	200mm	0.0065	-0.0004	0.005	0.005	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003

Tabelle 13: $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschläge für XPS-Dämmplatten in unverschatteten Umkehrdächern mit **Plattenbelägen** bei 50 Jahren Nutzungsdauer und warmseitiger Referenztemperatur $\theta_{i,m,SOLL} = 20^\circ\text{C}$.
Fett gedruckte Zahlen = Ablesebereich Beispiel 1 in Abschnitt 6.2

Deckschicht: Intensive Begrünung				$\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}\text{-Zuschlag} = A_{0^\circ\text{C}} + m_x \times S$							
Standortfaktor $S = 0.1 \times S_{g,a} \times \theta_{e,m,a} / R_a =$				0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	
Roofmate	Dicke	$A_{0^\circ\text{C}}$	m_x	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	
CO ₂	SL-A	100mm	0.0317	-0.0151	0.026	0.023	0.020	0.017	0.014	0.011	0.008
	SL-A	140mm	0.0225	-0.0100	0.019	0.017	0.015	0.013	0.011	0.009	0.007
	SL-A _{fikt}	140mm	0.0155	-0.0074	0.013	0.011	0.010	0.008	0.007	0.005	0.004
	SL-A	180mm	0.0079	-0.0033	0.007	0.006	0.005	0.005	0.004	0.003	0.003
HFKW	SL-X	100mm	0.0160	-0.0074	0.013	0.012	0.010	0.009	0.007	0.006	0.004
	SL-X	140mm	0.0078	-0.0032	0.007	0.006	0.005	0.005	0.004	0.003	0.003
	SL-X	200mm	0.0040	-0.0015	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002

Tabelle 14: $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschläge für XPS-Dämmplatten in unverschatteten Umkehrdächern mit **Intensivbegrünungen** bei 50 Jahren Nutzungsdauer und warmseitiger Referenztemperatur $\theta_{i,m,SOLL} = 20^\circ\text{C}$.
Fett gedruckte Zahlen = Ablesebereich Beispiel 2 in Abschnitt 6.2

Deckschicht: Extensive Begrünung				$\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}\text{-Zuschlag} = A_{0^\circ\text{C}} + m_x \times S$							
Standortfaktor $S = 0.1 \times S_{g,a} \times \theta_{e,m,a} / R_a =$				0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	
Roofmate	Dicke	$A_{0^\circ\text{C}}$	m_x	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	[W/mK]	
CO ₂	SL-A	100mm	0.0196	-0.0088	0.016	0.014	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006
	SL-A	140mm	0.0156	-0.0061	0.013	0.012	0.011	0.010	0.008	0.007	0.006
	SL-A _{fikt}	140mm	0.0096	-0.0040	0.008	0.007	0.006	0.006	0.005	0.004	0.003
	SL-A	180mm	0.0057	-0.0022	0.005	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002
HFKW	SL-X	100mm	0.0110	-0.0048	0.009	0.008	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003
	SL-X	140mm	0.0061	-0.0024	0.005	0.005	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002
	SL-X	200mm	0.0031	-0.0012	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001

Tabelle 15: $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschläge für XPS-Dämmplatten in unverschatteten Umkehrdächern mit **Extensivbegrünungen** bei 50 Jahren Nutzungsdauer und warmseitiger Referenztemperatur $\theta_{i,m,SOLL} = 20^\circ\text{C}$.
Fett gedruckte Zahlen = Ablesebereich Beispiel 3 in Abschnitt 6.2

Deckschicht	Korrekturfaktoren k_T für $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$		
	$\theta_{i,m,SOLL} = 15^\circ\text{C}$	$\theta_{i,m,SOLL} = 18^\circ\text{C}$	$\theta_{i,m,SOLL} = 22^\circ\text{C}$
Plattenbeläge aus Gehwegplatten, Verbundsteinen u. Ort betonplatten	0.5	0.7	1.4
Dachbegrünungen (extensiv und intensiv)	0.3	0.6	1.5

Tabelle 16: Korrekturfaktor k_T für $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ bei von 20°C abweichender, warmseitiger Referenztemperatur $\theta_{i,m,SOLL}$. Zwischenwerte können linear interpoliert werden.

Deckschicht	Korrekturfaktor k_S für $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ bei Vollverschattung	
	$\theta_{e,m,a} = 4.0^\circ\text{C}$	$\theta_{e,m,a} = 10.0^\circ\text{C}$
Plattenbeläge	1.2	1.4
Dachbegrünung	$S = 0.40 \text{ kWh}^\circ\text{C}/\text{mm}$ 1.7	$S = 1.80 \text{ kWh}^\circ\text{C}/\text{mm}$ 2.3

Tabelle 17: Korrekturfaktor k_S für $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ bei Vollverschattung. Zwischenwerte können linear interpoliert werden. Umrechnungen auf Oberflächen mit vom Basisfall (Absorptionskoeffizient $a_s = 0.70$) abweichender Absorption können durch lineare Interpolation der Korrekturfaktoren zwischen $a_s = 0.00$ und $a_s = 0.70$ erfolgen.

Deckschicht	Trennlage	Dämmplattenstoss	Entwässerungsfaktor f
Bekiest Unverfugte Plattenbeläge, Verbundsteine oder vergleichbare Systeme in Feinsplitt	Filtervlies	Stumpfstoss ¹⁾ Stufenfalz	31047
Extensive Begrünung ²⁾	Filtervlies	Stufenfalz	0.54
Intensive Begrünung ²⁾	Filtervlies	Stufenfalz	0.25
Bekiest Unverfugte Plattenbeläge, Verbundsteine oder vergleichbare Systeme in Feinsplitt ⁴⁾	Wasserleitend ³⁾	Stufenfalz	0.15
Verfugte Ort betonplatten	Filtervlies	Stufenfalz	0

Tabelle 18: Vorschlag zur Festlegung von Entwässerungsfaktoren f zur Ermittlung des ΔU_r -Zuschlags nach EN ISO 6946 /1/ für unterschiedliche Deckschichtaufbauten auf Umkehrdächern.

- 1) Der Wert für Dämmplatten mit Stumpfstoss wird nur als Referenzwert für den vollständigen Wasserabfluss auf der Abdichtungsebene angegeben. Diese Verlegeart ist nicht üblich und z.B. in der Schweiz und Deutschland nicht zulässig.
- 2) Für spezielle Dachbegrünungssysteme, für die ein Nachweis einer geringeren Entwässerung erbracht werden kann, können davon abweichende Werte verwendet werden.
- 3) Nur geprüfte und zugelassene wasserleitende Trennlagen, die den Anforderungen der Tabelle 3 aus /61/ genügen, sind zulässig.
- 4) Nur zulässig nach definitiver Einführung von $\Delta\lambda$ -Zuschlägen in EN ISO 6946.

Standort	Niederschlag [mm/d]	Deckschichten			
		Extensiv begrünt	Intensiv begrünt	Plattenbeläge Filtervlies	Plattenbeläge WA-Trennlage
Entwässerungsfaktoren f		0.54	0.25	0.85	0.15
$U_{\text{Soll}} = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$		Resultierende ΔU_r -Zuschläge mit $\Delta U_r = 1/U_{\text{Soll}} - R_{T,\text{erf}}$ und $R_{T,\text{erf}}$ nach Gl.(6).			
Davos	2.03	0.04	0.02	0.06	0.01
Stockholm	1.18	0.02	0.01	0.04	0.00
Zürich	2.36	0.05	0.02	0.08	0.01
Frankfurt	1.76	0.03	0.02	0.06	0.01
$U_{\text{Soll}} = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$		Anforderung Wärmedurchlasswiderstand XPS-Dämmung $R_{\text{XPS,Soll}} = 1/(U_{\text{Soll}} - \Delta U_r) - R_1$			
Davos		6.00	5.31	6.89	5.01
Stockholm		5.31	5.01	6.00	4.75
Zürich		6.42	5.31	8.08	5.01
Frankfurt		5.63	5.31	6.89	5.01
$U_{\text{Soll}} = 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$		Anforderung Wärmedurchlasswiderstand XPS-Dämmung $R_{\text{XPS,Soll}} = 1/(U_{\text{Soll}} - \Delta U_r) - R_1$			
Davos		4.51	4.10	5.01	3.92
Stockholm		4.10	3.92	4.51	3.75
Zürich		4.75	4.10	5.31	3.92
Frankfurt		4.30	4.10	4.75	3.92
$U_{\text{Soll}} = 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$		Anforderung Wärmedurchlasswiderstand XPS-Dämmung $R_{\text{XPS,Soll}} = 1/(U_{\text{Soll}} - \Delta U_r) - R_1$			
Davos		3.60	3.32	3.92	3.20
Stockholm		3.32	3.20	3.45	3.08
Zürich		3.60	3.32	4.10	3.20
Frankfurt		3.45	3.32	3.75	3.20

Tabelle 19: Ermittlung des ΔU_r -Zuschlags und der resultierenden Anforderung an den Wärmedurchlasswiderstand $R_{\text{XPS,Soll}}$ der XPS-Dämmung für vier unterschiedliche, geschlossene Deckschichten auf Umkehrdächern an vier Standorten nach EN ISO 6946 /1/ unter Berücksichtigung der günstigsten (tiefsten) mittleren Niederschlagsmenge p nach Tabelle 10. Der ΔU_r -Zuschlag wird gezeigt bei einem Anforderungswert des Wärmedurchgangskoeffizienten für den Bauteilquerschnitt von $U_{\text{Soll}}=0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für die Anforderungswerte $U_{\text{Soll}}=0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $U_{\text{Soll}}=0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ werden lediglich die resultierenden $R_{\text{XPS,Soll}}$ -Werte ausgewiesen. Der Wärmedurchlasswiderstand für den Bauteilquerschnitt ohne XPS-Dämmung wird mit $R_1=0.25 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Extensive Begrünung Nutzungsdauer 50 Jahre		Roofmate SL-X HFKW-geschäumt			Roofmate SL-A CO ₂ -geschäumt		
Dämmstoffkennwerte		SL-X 100	SL-X 140	SL-X 200	SL-A 100	SL-A 140	SL-A 180
Dicke d	[mm]	100	140	200	100	140	180
Nennwärmeleitfähigkeit λ_D	[W/mK]	0.029	0.031	0.031	0.036	0.038	0.038
Koeffizient $A_{0°C}$	[W/mK]	0.011	0.0061	0.0031	0.0196	0.0156	0.0057
Steigung m_x	[W/mK]/[kWh°C/mm]	-0.005	-0.0024	-0.0012	-0.0088	-0.0061	-0.0022
Standort	Standortfaktor S [kWh°Cmm]	$\Delta\lambda_{50,20°C}$ -Zuschlag nach der halben Nutzungsdauer [W/mK]					
Davos	0.42	0.009	0.005	0.003	0.016	0.013	0.005
Stockholm	1.22	0.005	0.003	0.002	0.009	0.008	0.003
Zürich	0.9	0.007	0.004	0.002	0.012	0.010	0.004
Frankfurt	1.43	0.004	0.003	0.001	0.007	0.007	0.003
Standort		$\lambda_{50,20°C}$ Bemessungswärmeleitfähigkeit [W/mK]					
Davos		0.038	0.036	0.034	0.052	0.051	0.043
Stockholm		0.034	0.034	0.033	0.045	0.046	0.041
Zürich		0.036	0.035	0.033	0.048	0.048	0.042
Frankfurt		0.033	0.034	0.032	0.043	0.045	0.041
Standort		$R_{XPS,ist}$ Wärmedurchlasswiderstand XPS-Dämmung [m ² K/W]					
Davos		2.64	3.88	5.95	1.93	2.74	4.19
Stockholm		2.95	4.10	6.13	2.23	3.03	4.39
Zürich		2.82	4.01	6.06	2.10	2.91	4.31
Frankfurt		3.04	4.16	6.18	2.32	3.12	4.44
Standort		$U_{Dach,ist}$ Wärmedurchgangskoeffizient ohne ΔU_r -Zuschlag [W/m ² K] ¹⁾					
Davos		0.35	0.24	0.16	0.46	0.33	0.23
Stockholm		0.31	0.23	0.16	0.40	0.30	0.22
Zürich		0.33	0.23	0.16	0.43	0.32	0.22
Frankfurt		0.30	0.23	0.16	0.39	0.30	0.21

Tabelle 20: Bemessungswärmeleitfähigkeit $\lambda_{50,20°C}$, erreichbare Wärmedurchlasswiderstände $R_{XPS,ist}$ und Wärmedurchgangskoeffizient $U_{Dach,ist}$ ohne ΔU_r -Zuschlag für XPS-Dämmplatten in Umkehrdächern mit Deckschichten aus **extensiver Begrünungen** unter Berücksichtigung der standort- und dämmplattenbezogenen $\Delta\lambda_{50,20°C}$ -Zuschläge bei 20°C Soll-Raumlufttemperatur, 50 Jahren Nutzungsdauer und unverschatteter Dachexposition.

1) Unter Berücksichtigung einer 20cm Betondecke mit Wärmedurchlasswiderstand ohne Dämmung von $R_1 = 0.25 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Intensive Begrünung Nutzungsdauer 50 Jahre		Roofmate SL-X HFKW-geschäumt			Roofmate SL-A CO ₂ -geschäumt		
Dämmstoffkennwerte		SL-X 100	SL-X 140	SL-X 200	SL-A 100	SL-A 140	SL-A 180
Dicke d	[mm]	100	140	200	100	140	180
Nennwärmeleitfähigkeit λ_D	[W/mK]	0.029	0.031	0.031	0.036	0.038	0.038
Koeffizient $A_{0°C}$	[W/mK]	0.016	0.0078	0.004	0.0317	0.0225	0.0079
Steigung m_x	[W/mK]/[kWh°C/mm]	-0.0074	-0.0032	-0.0016	-0.0153	-0.01	-0.0034
Standort	Standortfaktor S [kWh°Cmm]	$\Delta\lambda_{50,20°C}$-Zuschlag nach der halben Nutzungsdauer [W/mK]					
Davos	0.42	0.013	0.006	0.003	0.025	0.018	0.006
Stockholm	1.22	0.007	0.004	0.002	0.013	0.010	0.004
Zürich	0.9	0.009	0.005	0.003	0.018	0.014	0.005
Frankfurt	1.43	0.005	0.003	0.002	0.010	0.008	0.003
Standort		$\lambda_{50,20°C}$ Bemessungswärmeleitfähigkeit [W/mK]					
Davos		0.042	0.037	0.034	0.061	0.056	0.044
Stockholm		0.036	0.035	0.033	0.049	0.048	0.042
Zürich		0.038	0.036	0.034	0.054	0.052	0.043
Frankfurt		0.034	0.034	0.033	0.046	0.046	0.041
Standort		$R_{XPS,ist}$ Wärmedurchlasswiderstand XPS-Dämmung [m²K/W]					
Davos		2.39	3.74	5.83	1.63	2.49	4.09
Stockholm		2.78	4.01	6.05	2.04	2.90	4.31
Zürich		2.61	3.90	5.96	1.85	2.72	4.20
Frankfurt		2.91	4.09	6.11	2.18	3.03	4.39
Standort		$U_{Dach,ist}$ Wärmedurchgangskoeffizient ohne ΔU_r-Zuschlag [W/m²K] ¹⁾					
Davos		0.38	0.25	0.16	0.53	0.37	0.23
Stockholm		0.33	0.23	0.16	0.44	0.32	0.22
Zürich		0.35	0.24	0.16	0.48	0.34	0.22
Frankfurt		0.32	0.23	0.16	0.41	0.30	0.22

Tabelle 21: Bemessungswärmeleitfähigkeit $\lambda_{50,20°C}$, erreichbare Wärmedurchlasswiderstände $R_{XPS,ist}$ und Wärmedurchgangskoeffizient $U_{Dach,ist}$ ohne ΔU_r -Zuschlag für XPS-Dämmplatten in Umkehrdächern mit Deckschichten aus **intensiven Begrünungen** unter Berücksichtigung der standort- und dämmplattenbezogenen $\Delta\lambda_{50,20°C}$ -Zuschläge bei 20°C Soll-Raumlufttemperatur, 50 Jahren Nutzungsdauer und unverschatteter Dachexposition.

- 1) Unter Berücksichtigung einer 20cm Betondecke mit Wärmedurchlasswiderstand ohne Dämmung von $R_1 = 0.25 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Plattenbeläge/Verbundsteine/Ortbeton Nutzungsdauer 50 Jahre		Roofmate SL-X HFKW-geschäumt			Roofmate SL-A CO ₂ -geschäumt		
Dämmstoffkennwerte		SL-X 100	SL-X 140	SL-X 200	SL-A 100	SL-A 140	SL-A 200
Dicke d	[mm]	100	140	200	100	140	180
Nennwärmeleitfähigkeit λ_D	[W/mK]	0.029	0.031	0.031	0.036	0.038	0.038
Koeffizient $A_{0°C}$	[W/mK]	0.0288	0.0140	0.0063	0.0519	0.0367	0.0132
Steigung m_x	[W/mK]/[°C]	-0.0017	-0.0008	-0.0003	-0.0033	-0.0022	-0.0007
Standort	Jahresmitteltemperatur [°C]	$\Delta\lambda_{50,20°C}$-Zuschlag nach der halben Nutzungsdauer [W/mK]					
Davos	3.3	0.023	0.011	0.005	0.041	0.029	0.011
Stockholm	6.7	0.017	0.009	0.004	0.030	0.022	0.009
Zürich	9	0.014	0.007	0.004	0.022	0.017	0.007
Frankfurt	9.6	0.012	0.006	0.003	0.020	0.016	0.006
Standort		$\lambda_{50,20°C}$ Bemessungswärmeleitfähigkeit [W/mK]					
Davos		0.052	0.042	0.036	0.077	0.067	0.049
Stockholm		0.046	0.040	0.035	0.066	0.060	0.047
Zürich		0.043	0.038	0.035	0.058	0.055	0.045
Frankfurt		0.041	0.037	0.034	0.056	0.054	0.044
Standort		$R_{XPS,Ist}$ Wärmedurchlasswiderstand XPS-Dämmung [m²K/W]					
Davos		1.92	3.31	5.51	1.30	2.08	3.67
Stockholm		2.15	3.53	5.67	1.52	2.33	3.87
Zürich		2.35	3.70	5.78	1.72	2.55	4.01
Frankfurt		2.41	3.75	5.81	1.78	2.61	4.05
Standort		$U_{Dach,Ist}$ Wärmedurchgangskoeffizient ohne ΔU_f-Zuschlag [W/m²K] ¹⁾					
Davos		0.46	0.28	0.17	0.65	0.43	0.25
Stockholm		0.42	0.26	0.17	0.57	0.39	0.24
Zürich		0.38	0.25	0.17	0.51	0.36	0.23
Frankfurt		0.38	0.25	0.17	0.49	0.35	0.23

Tabelle 22: Bemessungswärmeleitfähigkeit $\lambda_{50,20°C}$, erreichbare Wärmedurchlasswiderstände R_{XPS} und Wärmedurchgangskoeffizient $U_{Dach,Ist}$ ohne ΔU_f -Zuschlag für XPS-Dämmplatten in Umkehrdächern mit Deckschichten aus **Plattenbelägen, Verbundsteinen und Ortbetonplatten** unter Berücksichtigung der standort- und dämmplattenbezogenen $\Delta\lambda_{50,20°C}$ -Zuschläge bei 20°C Soll-Raumlufttemperatur, 50 Jahren Nutzungsdauer und unverschatteter Dachexposition.

- 1) Unter Berücksichtigung einer 20cm Betondecke mit Wärmedurchlasswiderstand ohne Dämmung von $R_1 = 0.25 \text{ m}^2\text{K/W}$.

50 Jahre Nutzungszeitraum		Wärmedurchgangskoeffizient $U_{Dach,Soll}$			HFKW-geschäumte Roofmate			CO ₂ -geschäumte Roofmate ⁴⁾			
Standort	Deckschicht	0.30 W/m ² K	0.25 W/m ² K	0.20 W/m ² K	SL-X 100 mm	SL-X 140 mm	SL-X 200 mm	SL-A 100 mm	SL-A 140 mm	SL-A 180 mm	
		Wärmedurchlasswiderstand $R_{XPS,Soll}$ ΔU_i -Zuschlag berücksichtigt			Wärmedurchlasswiderstand $R_{XPS,Ist}$ $\Delta \lambda_{50,20^\circ C}$ -Zuschlag berücksichtigt			Wärmedurchlasswiderstand $R_{XPS,Ist}$ $\Delta \lambda_{50,20^\circ C}$ -Zuschlag berücksichtigt			
Davos	Extensiv	3.60	4.51	6.00	2.63	3.88	5.95	1.93	2.74	3.04	4.19
	Intensiv	3.32	4.10	5.31	2.39	3.74	5.83	1.63	2.49	2.80	4.09
	Plattenbeläge V ¹⁾	3.92	5.01	6.89	1.92	3.31	5.51	1.30	2.08	2.41	3.67
	Plattenbeläge T ²⁾	3.20	3.92	5.01	1.92	3.31	5.51	1.30	2.08	2.41	3.67
	Ortbetonplatten ³⁾	3.08	3.75	4.75	1.92	3.31	5.51	1.30	2.08	2.41	3.67
Stockholm	Extensiv	3.32	4.10	5.31	2.93	4.10	6.13	2.23	3.03	3.26	4.39
	Intensiv	3.20	3.92	5.01	2.78	4.01	6.05	2.04	2.90	3.18	4.31
	Plattenbeläge V ¹⁾	3.45	4.51	6.00	2.15	3.53	5.67	1.52	2.33	2.64	3.87
	Plattenbeläge T ²⁾	3.08	3.75	4.75	2.15	3.53	5.67	1.52	2.33	2.64	3.87
	Ortbetonplatten ³⁾	3.08	3.75	4.75	2.15	3.53	5.67	1.52	2.33	2.64	3.87
Zürich	Extensiv	3.60	4.75	6.42	2.81	4.01	6.06	2.10	2.91	3.18	4.32
	Intensiv	3.32	4.10	5.31	2.61	3.90	5.96	1.86	2.72	2.98	4.21
	Plattenbeläge V ¹⁾	4.10	5.31	8.08	1.92	3.70	5.78	1.30	2.08	2.86	3.67
	Plattenbeläge T ²⁾	3.20	3.92	5.01	1.92	3.70	5.78	1.30	2.08	2.86	3.67
	Ortbetonplatten ³⁾	3.08	3.75	4.75	1.92	3.70	5.78	1.30	2.08	2.86	3.67
Frankfurt	Extensiv	3.45	4.30	5.63	3.02	4.16	6.18	2.32	3.12	3.33	4.44
	Intensiv	3.32	4.10	5.31	2.91	4.09	6.11	2.18	3.03	3.26	4.39
	Plattenbeläge V ¹⁾	3.75	4.75	6.89	2.41	3.75	5.81	1.78	2.61	2.92	4.05
	Plattenbeläge T ²⁾	3.20	3.92	5.01	2.41	3.75	5.81	1.78	2.61	2.92	4.05
	Ortbetonplatten ³⁾	3.08	3.75	4.75	2.41	3.75	5.81	1.78	2.61	2.92	4.05

Tabelle 23: Vergleich der Anforderungen an den Wärmedurchlasswiderstand $R_{XPS,Soll}$ mit dem erreichbaren $R_{XPS,Ist}$ unter Berücksichtigung des erforderlichen $\Delta \lambda_{50,20^\circ C}$ -Zuschlags auf die Nennwärmeleitfähigkeit λ_D von XPS-Dämmstoffen bei verschiedenen Sollwerten für den Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{Dach,Soll}$. Die Werte werden für Umkehrdächer mit unterschiedlichen Deckschichten, 20°C Soll-Raumlufttemperatur, **50 Jahre Nutzungsdauer** und unverschatteter Dachexposition gezeigt.

1) Unverfugte Plattenbelägen mit Trennlage aus Filtervlies

2) Unverfugte Plattenbelägen mit wasserableitender Trennlage

3) Verfugte Ortbetonplatten

4) Für Roofmate SL-A mit 140 mm Dicke sind die Werte der realen (linke Spalte) und fiktiven Dämmplatte (Rechte Spalte kursiv mit Diffusionswiderstand wie SL-A180) angegeben.

0.30 W/m ² K	$U_{Dach,Soll} = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$ wird erreicht	$U_{Dach,Soll} = 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ wird erreicht	$U_{Dach,Soll} = 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ wird erreicht	$U_{Dach,Ist} > 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$
-------------------------	--	--	--	---

30 Jahre Nutzungszeitraum		Wärmedurchgangskoeffizient $U_{Dach,Soll}$			HFKW-geschäumte Roofmate			CO ₂ -geschäumte Roofmate ⁴⁾			
Standort	Deckschicht	0.30 W/m ² K	0.25 W/m ² K	0.20 W/m ² K	SL-X 100 mm	SL-X 140 mm	SL-X 200 mm	SL-A 100 mm	SL-A 140 mm	SL-A 180 mm	
		Wärmedurchlasswiderstand $R_{XPS,Soll}$ ΔU_i -Zuschlag berücksichtigt			Wärmedurchlasswiderstand $R_{XPS,Ist}$ $\Delta \lambda_{50,20^\circ C}$ -Zuschlag berücksichtigt			Wärmedurchlasswiderstand $R_{XPS,Ist}$ $\Delta \lambda_{50,20^\circ C}$ -Zuschlag berücksichtigt			
Davos	Extensiv	3.60	4.51	6.00	2.94	4.12	6.06	2.17	3.04	3.26	4.39
	Intensiv	3.32	4.10	5.31	2.70	4.00	6.06	1.96	2.86	3.11	4.29
	Plattenbeläge V ¹⁾	3.92	5.01	6.89	2.33	3.68	5.88	1.64	2.50	2.80	4.09
	Plattenbeläge T ²⁾	3.20	3.92	5.01	2.33	3.68	5.88	1.64	2.50	2.80	4.09
	Ortbetonplatten ³⁾	3.08	3.75	4.75	2.33	3.68	5.88	1.64	2.50	2.80	4.09
Stockholm	Extensiv	3.32	4.10	5.31	3.13	4.24	6.25	2.44	3.26	3.41	4.50
	Intensiv	3.20	3.92	5.01	3.03	4.24	6.25	2.27	3.18	3.33	4.50
	Plattenbeläge V ¹⁾	3.45	4.51	6.00	2.56	3.89	6.06	1.85	2.75	2.98	4.19
	Plattenbeläge T ²⁾	3.08	3.75	4.75	2.56	3.89	6.06	1.85	2.75	2.98	4.19
	Ortbetonplatten ³⁾	3.08	3.75	4.75	2.56	3.89	6.06	1.85	2.75	2.98	4.19
Zürich	Extensiv	3.60	4.75	6.42	3.03	4.24	6.25	2.33	3.18	3.33	4.50
	Intensiv	3.32	4.10	5.31	2.86	4.12	6.06	2.13	3.04	3.26	4.39
	Plattenbeläge V ¹⁾	4.10	5.31	8.08	2.70	4.00	6.06	2.00	2.92	3.11	4.29
	Plattenbeläge T ²⁾	3.20	3.92	5.01	2.70	4.00	6.06	2.00	2.92	3.11	4.29
	Ortbetonplatten ³⁾	3.08	3.75	4.75	2.70	4.00	6.06	2.00	2.92	3.11	4.29
Frankfurt	Extensiv	3.45	4.30	5.63	3.23	4.24	6.25	2.50	3.33	3.50	4.50
	Intensiv	3.32	4.10	5.31	3.13	4.24	6.25	2.38	3.26	3.41	4.50
	Plattenbeläge V ¹⁾	3.75	4.75	6.89	2.78	4.12	6.06	2.08	2.92	3.18	4.29
	Plattenbeläge T ²⁾	3.20	3.92	5.01	2.78	4.12	6.06	2.08	2.92	3.18	4.29
	Ortbetonplatten ³⁾	3.08	3.75	4.75	2.78	4.12	6.06	2.08	2.92	3.18	4.29

Tabelle 24: Vergleich der Anforderungen an den Wärmedurchlasswiderstand $R_{XPS,Soll}$ mit dem erreichbaren $R_{XPS,Ist}$ unter Berücksichtigung des erforderlichen $\Delta \lambda_{50,20^\circ C}$ -Zuschlags auf die Nennwärmeleitfähigkeit λ_D von XPS-Dämmstoffen bei verschiedenen Sollwerten für den Wärmedurchgangskoeffizienten $U_{Dach,Soll}$. Die Werte werden für Umkehrdächer mit unterschiedlichen Deckschichten, 20°C Soll-Raumlufttemperatur, **30 Jahre Nutzungsdauer** und unverschatteter Dachexposition gezeigt.

1) Unverfugte Plattenbelägen mit Trennlage aus Filtervlies

2) Unverfugte Plattenbelägen mit wasserableitender Trennlage

3) Verfugte Ortbetonplatten

4) Für Roofmate SL-A mit 140 mm Dicke sind die Werte der realen (linke Spalte) und fiktiven Dämmplatte (Rechte Spalte kursiv mit Diffusionswiderstand wie SL-A180) angegeben.

	U _{Dach,Soll} = 0.20 W/m ² K wird erreicht	U _{Dach,Soll} = 0.25 W/m ² K wird erreicht	U _{Dach,Soll} = 0.30 W/m ² K wird erreicht	U _{Dach,Ist} > 0.30 W/m ² K
--	--	--	--	---

Anhang C - Bilder 1-16

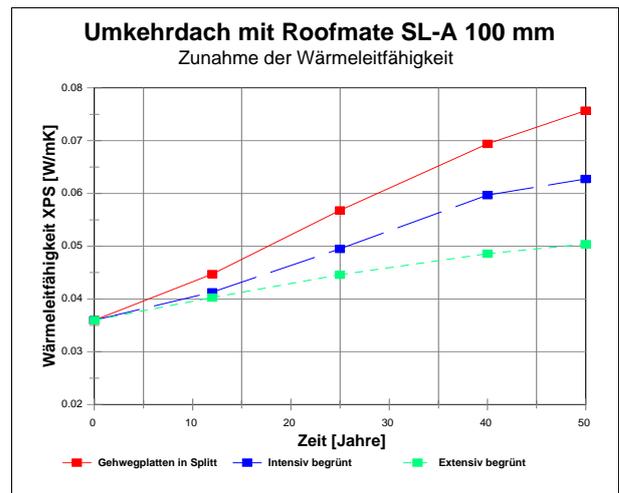
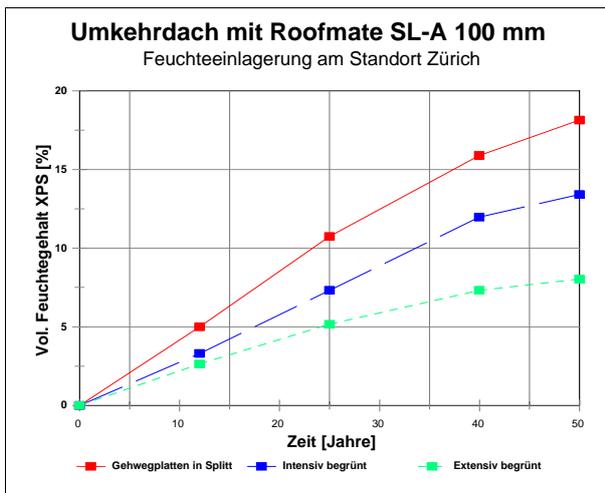


Bild 1: Rechnerisch ermittelter zeitlicher Verlauf der Feuchteeinlagerung durch Diffusion (**Links**) und damit verbundene Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit (**Rechts**) für den Dämmplattentyp Roofmate SL-A (Dicke: 100 mm) in Umkehrdachaufbauten mit verschiedenen Deckschichten am Standort Zürich.

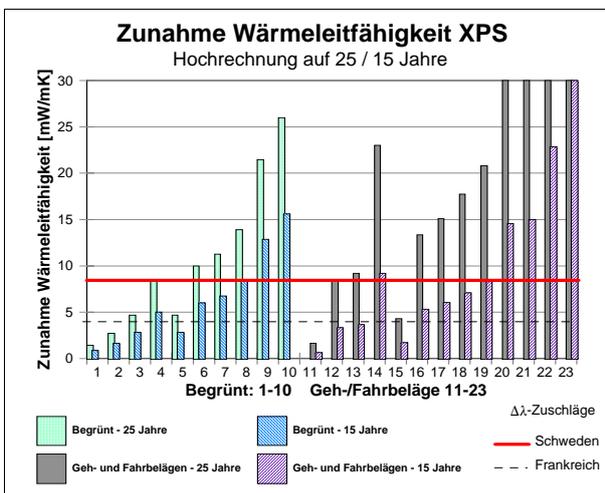
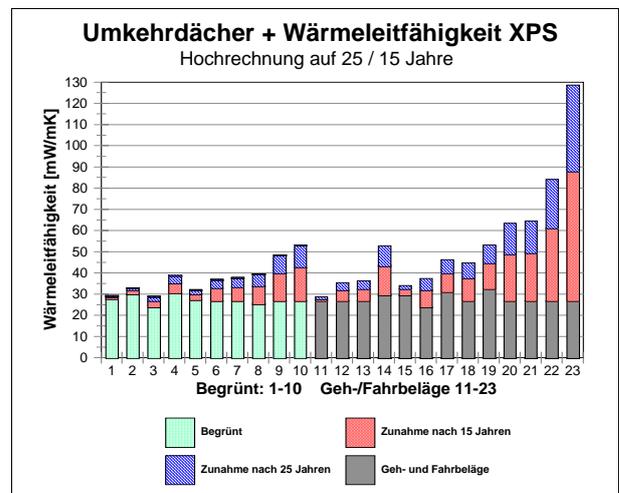
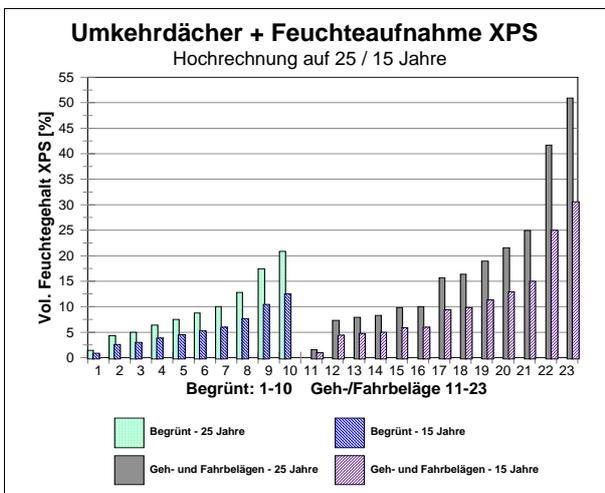


Bild 2: Hochrechnungen der zu erwartenden Feuchteeinlagerung durch Diffusion (**Oben**), der Wärmeleitfähigkeit (**Mitte**) und der $\Delta\lambda$ -Zuschläge (**Unten**) für XPS-Dämmplatten aus 23 untersuchten Umkehrdachaufbauten mit geschlossenen Deckschichten gemäss den Tabellen 1+2. Lit /8/, /22/, /28/, /29/, /30/, /39/ für einheitliche Nutzungsdauern von 50 und 30 Jahren mit den energetisch relevanten Bewertungszeitpunkten nach der halben Nutzungsdauer von 25 resp. 15 Jahren. Zum Vergleich sind die in den Ländern Schweden ($\Delta\lambda = 8 \text{ mW/mK}$) und Frankreich ($\Delta\lambda = 4 \text{ mW/mK}$) gültigen $\Delta\lambda$ -Zuschläge angegeben.

Messprogramm und Proben zur Diffusionswiderstandsbestimmung an XPS- Dämmplatten

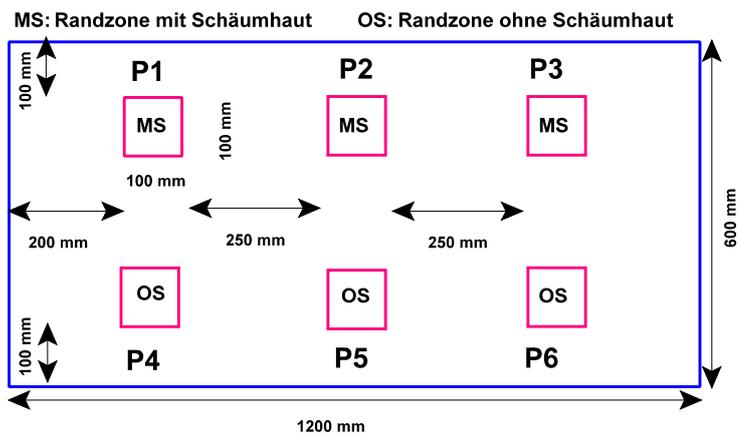
Untersuchte Dämmplattentypen

- SLA60: ROOFMATE SL-A mit Dicke 60 mm
- SLA100: ROOFMATE SL-A mit Dicke 100 mm
- SLA140: ROOFMATE SL-A mit Dicke 140 mm
- SLA180: ROOFMATE SL-A mit Dicke 180 mm
- SLX140: ROOFMATE SL-X mit Dicke 140 mm
- SLX200: ROOFMATE SL-X mit Dicke 200 mm

Feuchterandbedingungen

- Messreihe M1: 23°C, 93 / 80 %
- Messreihe M2: 23°C, 93 / 65 %
- Messreihe M3: 23°C, 93 / 50 %
- Messreihe M4: 23°C, 50 / 3 %

Dämmplattendraufsicht und Probenausschnitte



Probenausschnitte über den Dämmplattenquerschnitt

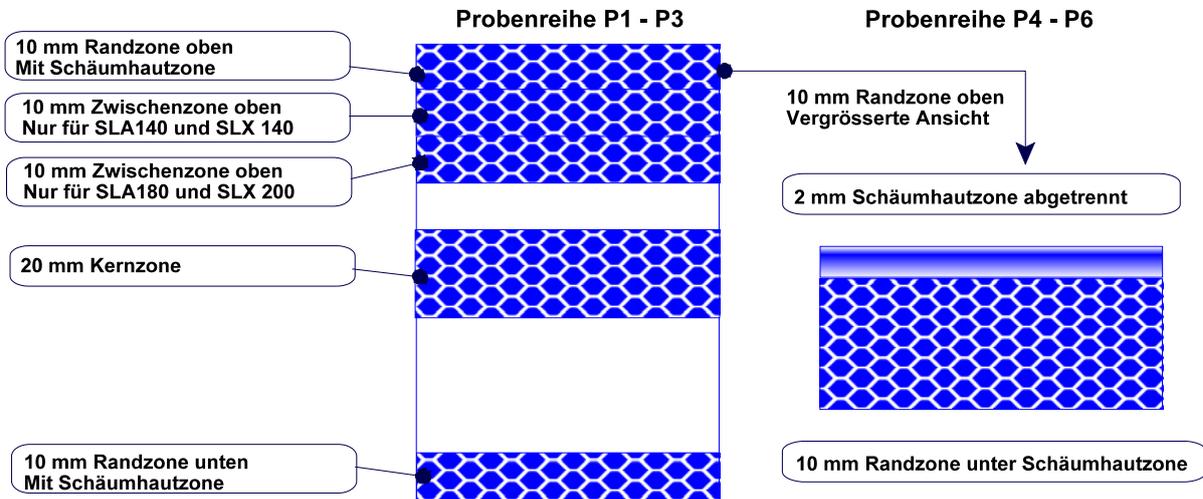


Bild 3: Messprogramm und Probenverteilung bei der Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen für XPS-Dämmplatten der Typen Roofmate SL-A und SL-X /18/.

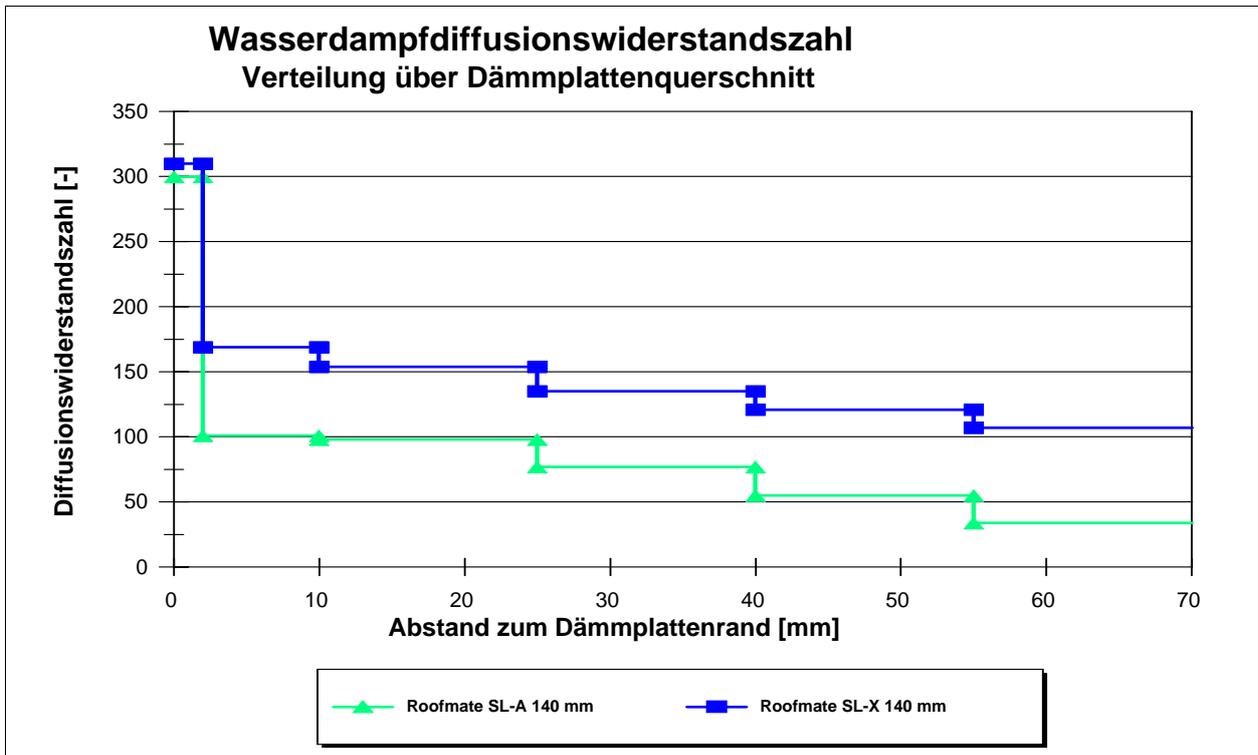
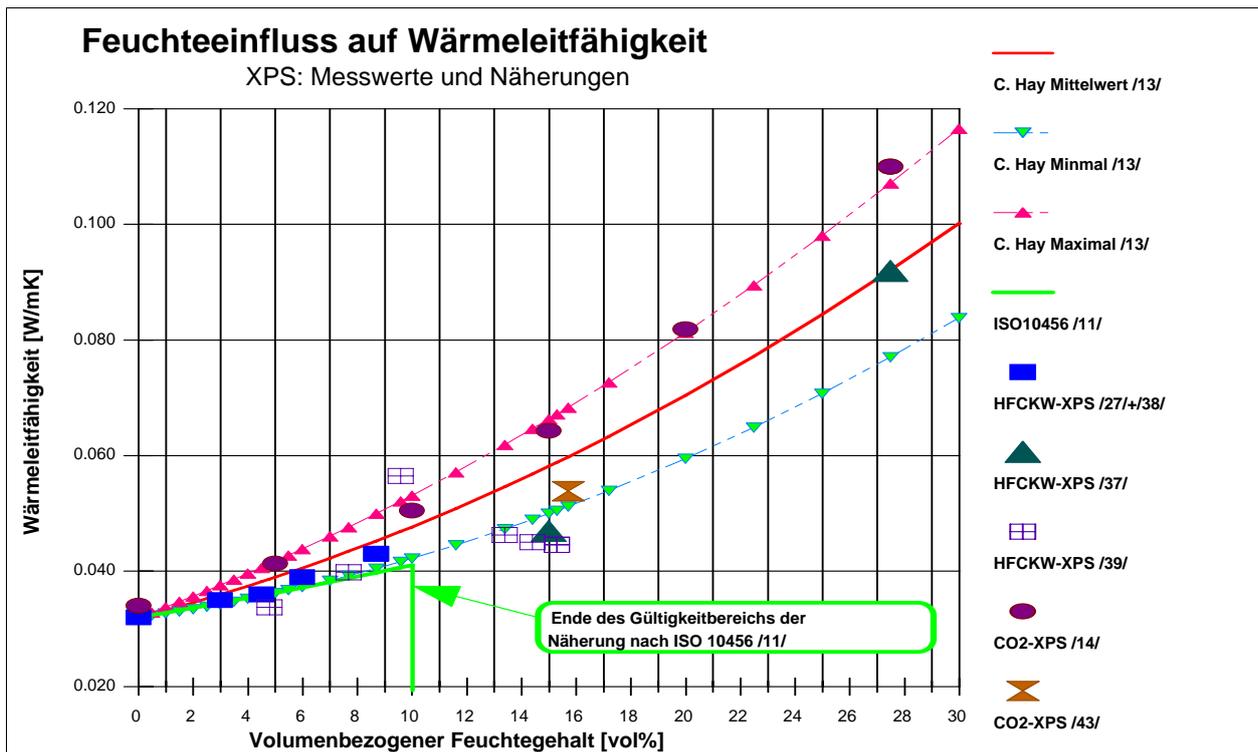


Bild 4: Verteilung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen über den Dämmplattenquerschnitt von 140 mm dicken XPS-Dämmplatten der Typen Roofmate SL-A (Schäumgas: CO₂) und Roofmate SL-X (Schäumgas: HFKW), abgeleitet aus den Ergebnissen der Messungen nach /18/ gemäß Tabelle 5. Gezeigt ist jeweils der halbe Dämmplattenquerschnitt von der Randzone bis zum Kern. Zwischenwerte ohne Messwerte wurden linear interpoliert.

Bild 5: Feuchteinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von XPS-Dämmstoffen. Vergleich der Näherungskurven von C. Hay /13/ und EN ISO 10456 /11/ mit einer Reihe bekannter Messwerte von XPS-Dämmplatten aus Labormessungen /14/, /27/, /37/, /38/, /39/, /45/.



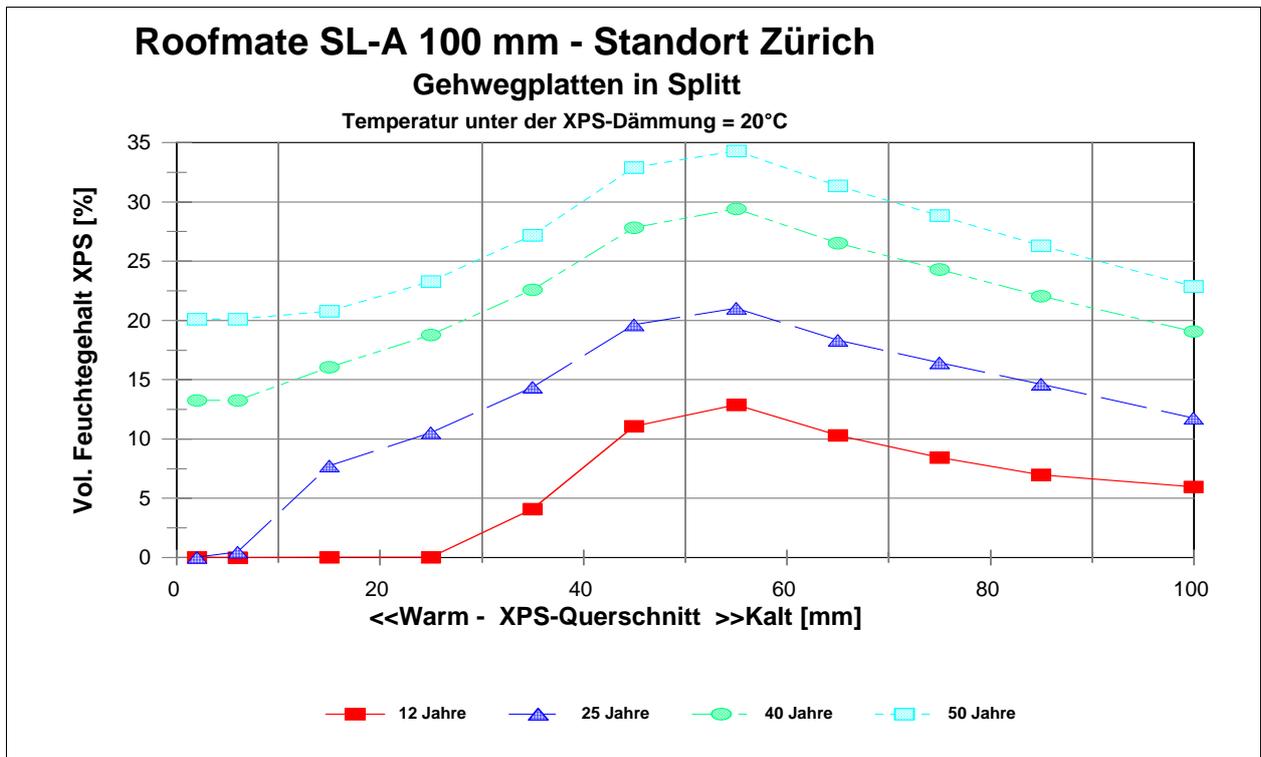
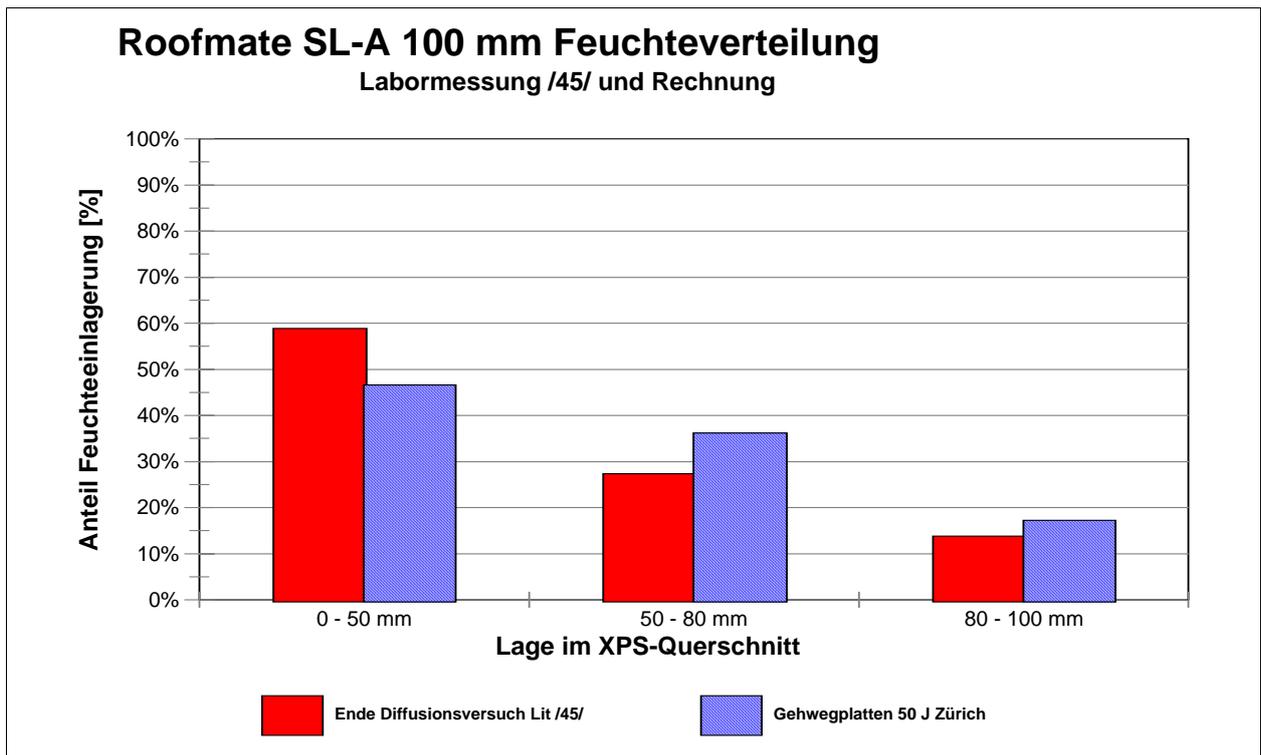
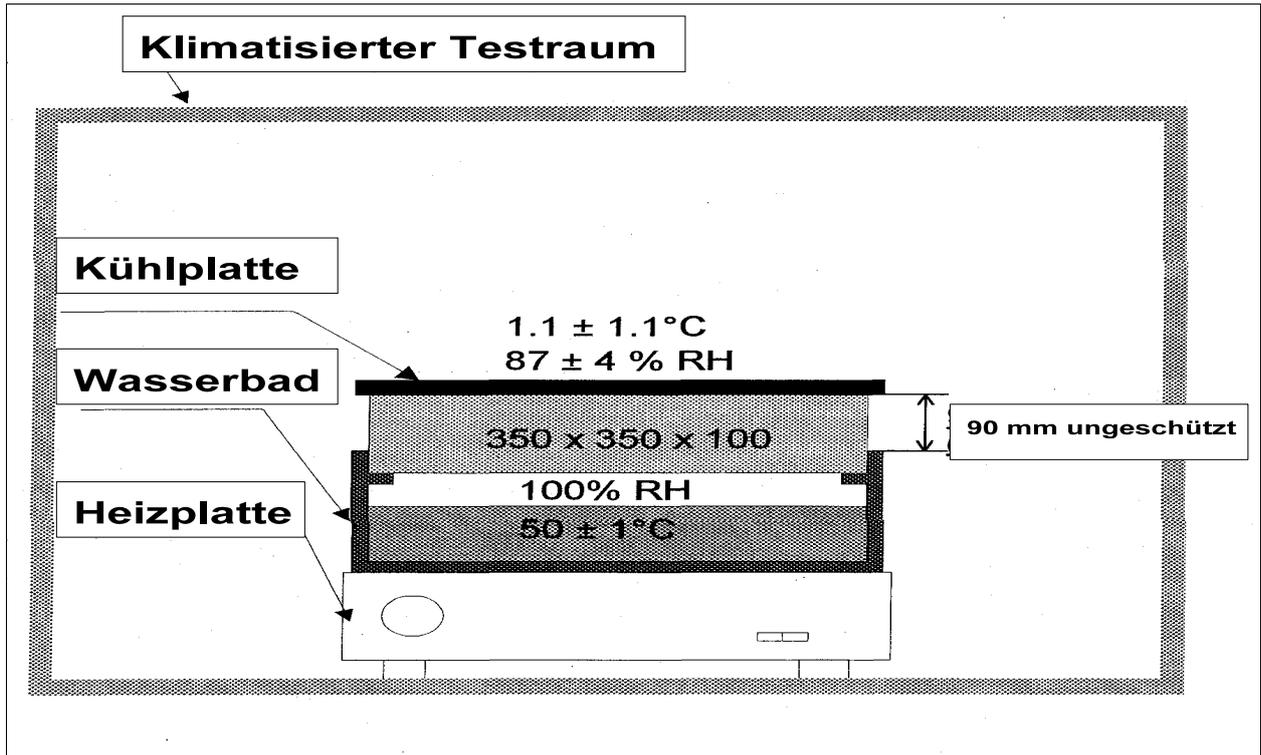


Bild 6: Zeitlicher Verlauf und Verteilung der Feuchteeinlagerung durch Diffusion (dargestellt sind die bereichsweise gemittelten volumenbezogenen Feuchtegehalte in den Dämmplattenzonen gemäss dem Schichtenmodell aus Tabelle 7) abgeleitet aus den Ergebnissen von Modellrechnungen mit WUFI /9/ in Roofmate SL-A (Dicke: 100 mm) für ein Umkehrdach mit Deckschicht aus Gehwegplatten in Splitt in Zürich nach 12, 25, 40 und 50 Jahren.

Bild 7: Vergleich der lokalen Anteile der Feuchteeinlagerung durch Diffusion in verschiedenen XPS-Dämmplattenbereichen für den Langzeitversuch in /45/ mit dem Ergebnis der Modellrechnung nach 50 Jahren aus Bild 6.

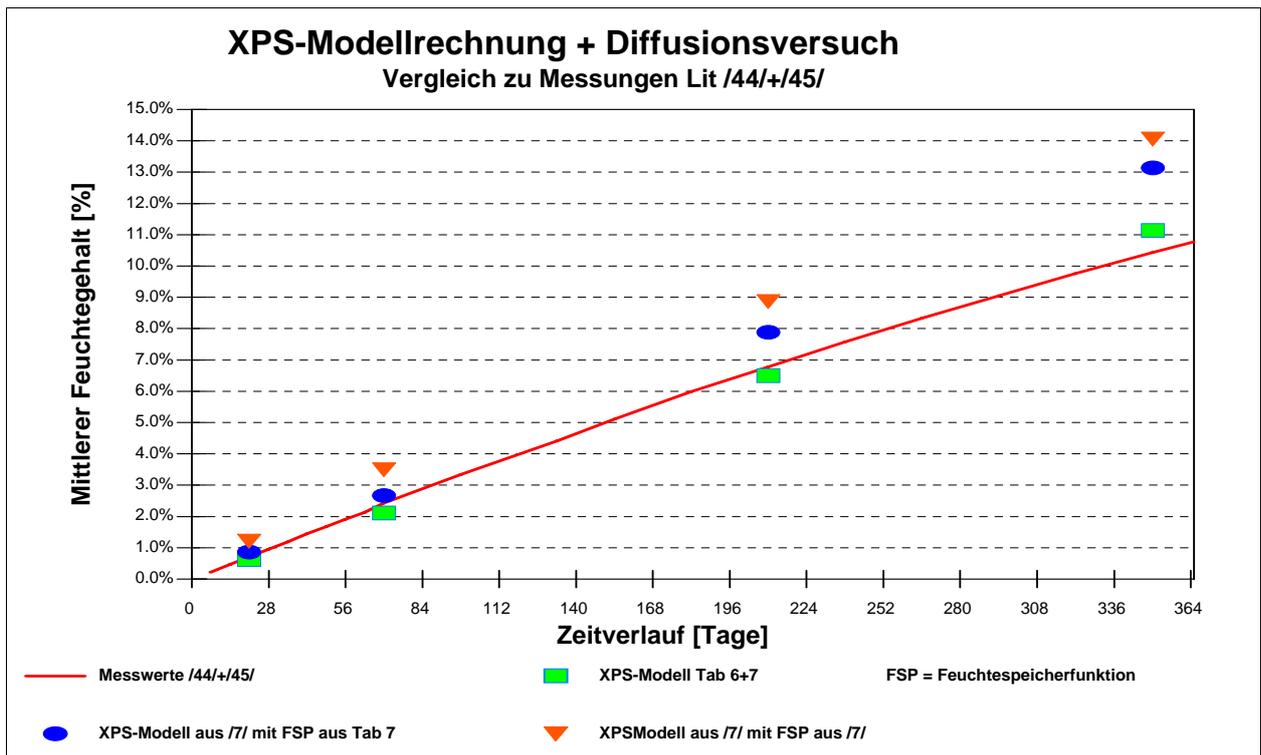
Bild 8: Versuchsanordnung im Langzeitversuch aus /19/, /44/ und /45/ zur Bestimmung der Feuchteeinlagerung durch





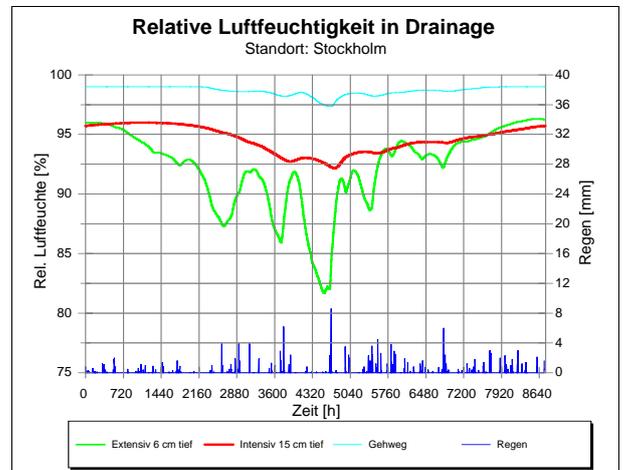
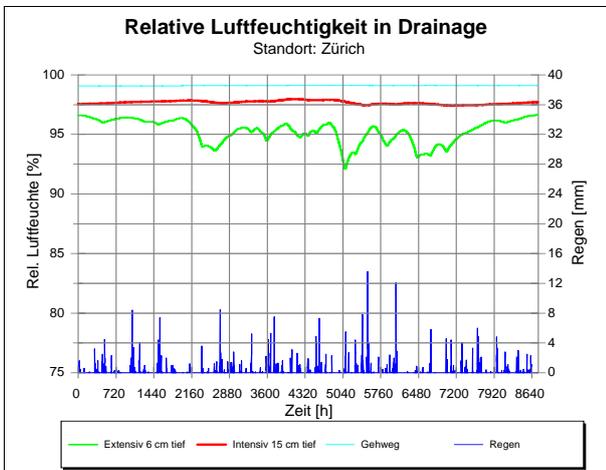
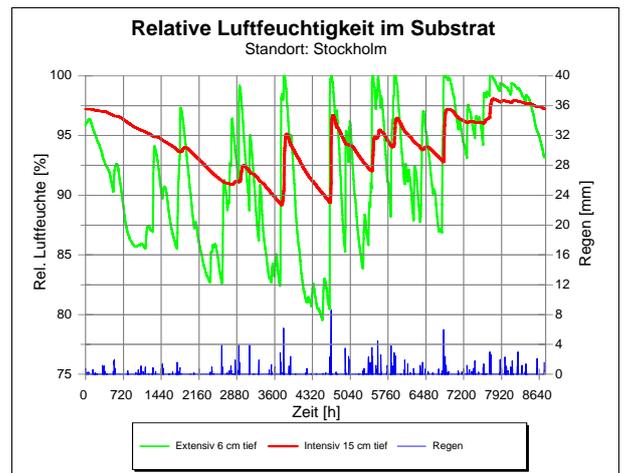
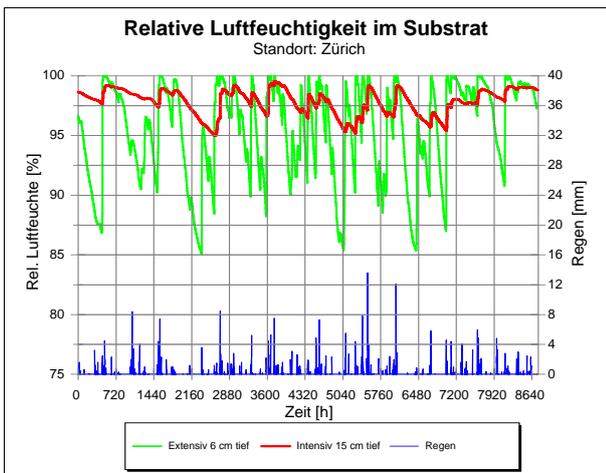
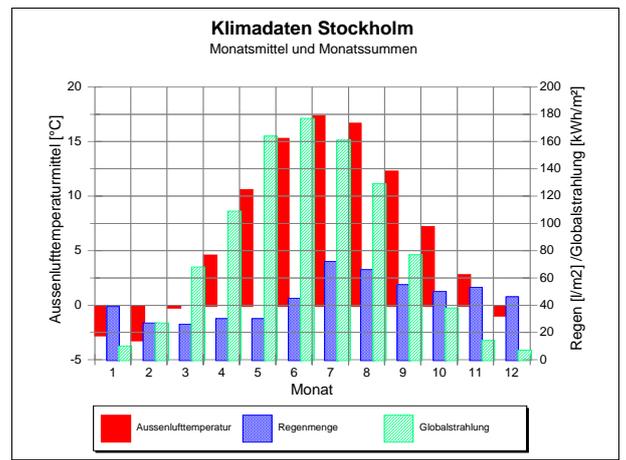
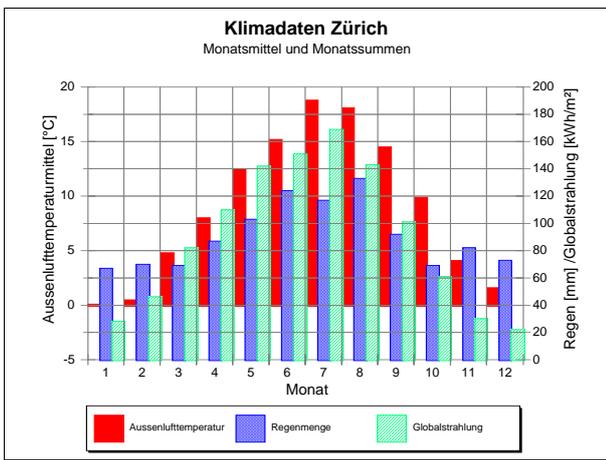
Diffusion in einer XPS-Dämmplatte vom Typ Roofmate SL-A (Dicke: 100 mm).

Bild 9: Nachberechnung des Langzeitversuchs zur Feuchteinlagerung durch Diffusion in /44/+45/ mit verschiedenen Modelleinstellungen im Rechenprogramm WUFI /9/ für den XPS-Dämmstoff Roofmate SL-A (Dicke: 100 mm).



Deckschicht	Typische Systemaufbauten	
Konstruktiv geschlossen	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Begrünte Umkehrdächer (extensiv und intensiv) <input type="checkbox"/> Parkdecks, befahrbare Decken <input type="checkbox"/> Terrassen mit lose verlegten Platten auf Splitt und Vlies (Beispiel rechts) 	
Nutzungsbedingt geschlossen	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Bekieste Deckschichten auf Vlies oder wasserableitender Trennlage mit Verschlämmung, starker Moos- und/oder zeitweiser lokaler Pfützenbildung. Ein typisches Beispiel zeigt nebenstehendes Bild aus einer Untersuchung in /21/. Im gezeigten Dachbereich wurde eine Feuchtezunahme in den 50 mm dicken, als Plus-Dach aufgebrauchten XPS-Dämmplatten bis 10 vol-% innert 16 Jahren festgestellt. <input type="checkbox"/> Plattenbeläge auf Stelzlagern - Fugen verstopft. 	

Bild 10: Konstruktiv und/oder nutzungsbedingt geschlossene Deckschichten auf Umkehrdächern



Bild

- 11: Klimadaten der Standorte Zürich und Stockholm (Oben). Berechneter Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit in geschlossenen Deckschichten von Umkehrdachaufbauten in der Substratschicht (Mitte) von extensiven (Substratdicke 8 cm, Angabe in 6 cm Tiefe) und intensiven (Substratdicke 25 cm, Angabe in 15 cm Tiefe) Dachbegrünungen sowie in der Drainageschicht (Unten) inklusive Deckschichten mit Gehwegplatten in Feinsplitt.

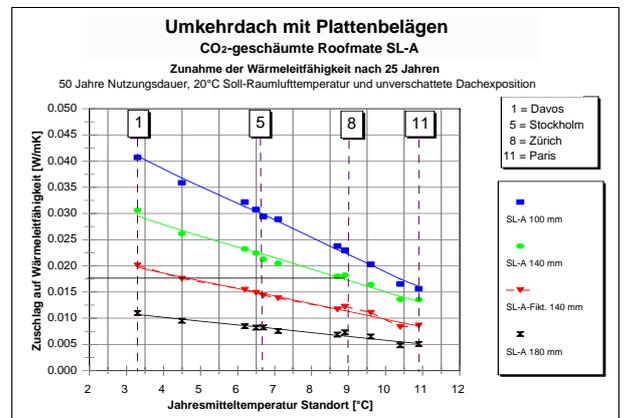
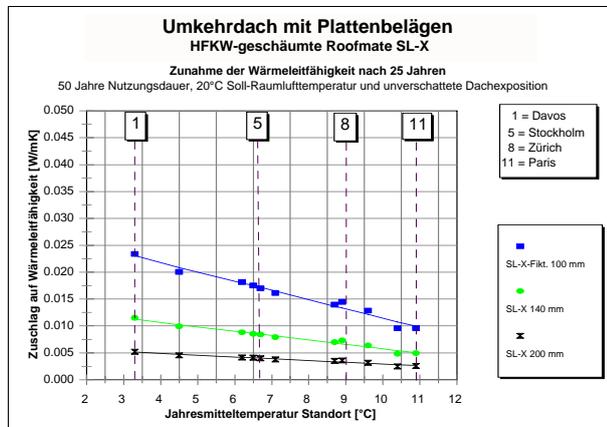
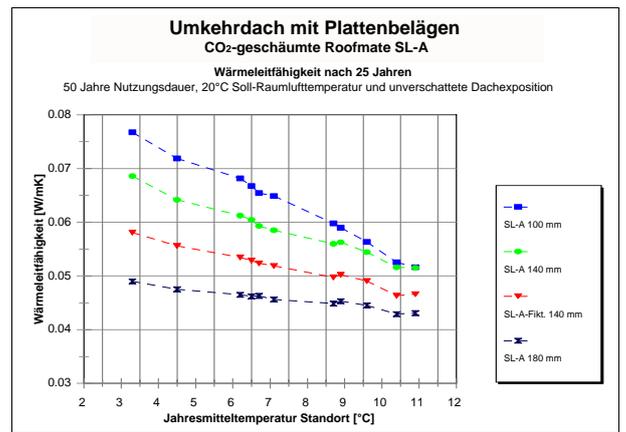
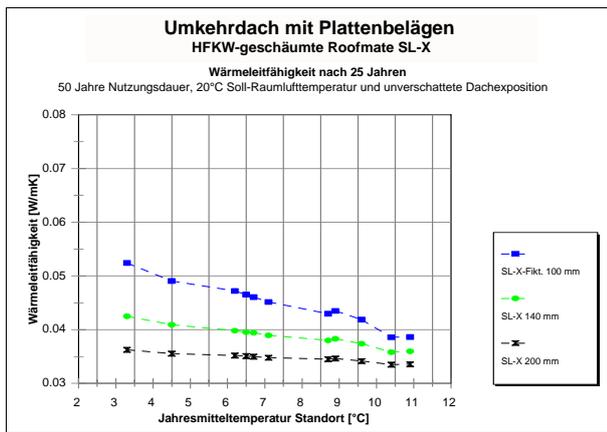
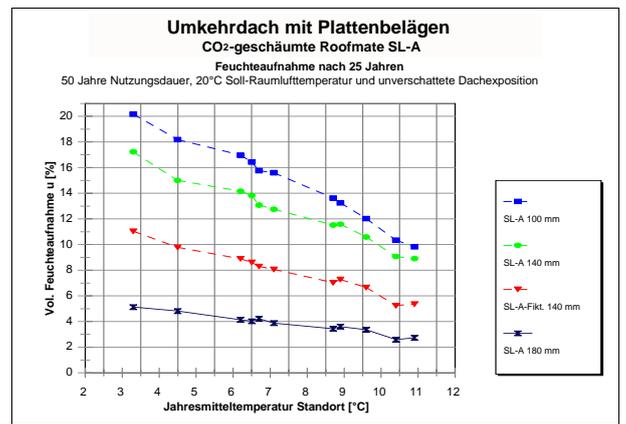
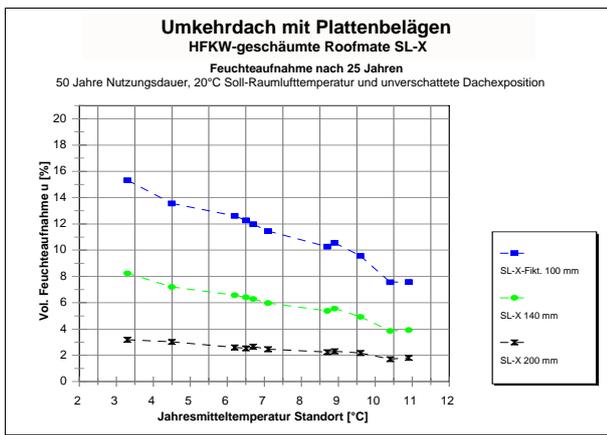


Bild 12: Umkehrdachaufbauten mit Deckschichten aus Plattenbelägen

Feuchteaufnahme durch Diffusion (**Oben**), Wärmeleitfähigkeit (**Mitte**) und resultierender $\Delta_{\lambda_{50,20^{\circ}\text{C}}}$ -Zuschlag (**Unten**) bei 50 Jahre Nutzungsdauer, 20°C Soll-Raumlufttemperatur und unverschatteter Dachexposition für HFKW-geschäumte XPS-Dämmplatten (**Linke Seite**) und CO₂-geschäumte XPS-Dämmplatten (**Rechte Seite**) mit unterschiedlichen Dämmschichtdicken. Für den $\Delta_{\lambda_{50,20^{\circ}\text{C}}}$ -Zuschlag sind lineare Näherungsgeraden in Abhängigkeit der Jahresmitteltemperatur am Standort angegeben. Für die Dämmplatte SL-A-Fikt 140 mm wurden erhöhte Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen über den gesamten Dämmplattenquerschnitt berücksichtigt.

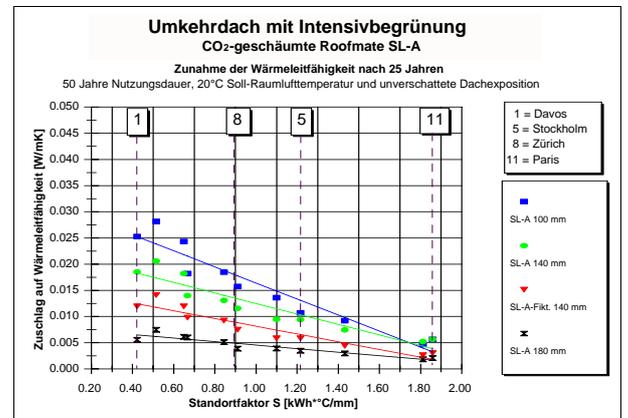
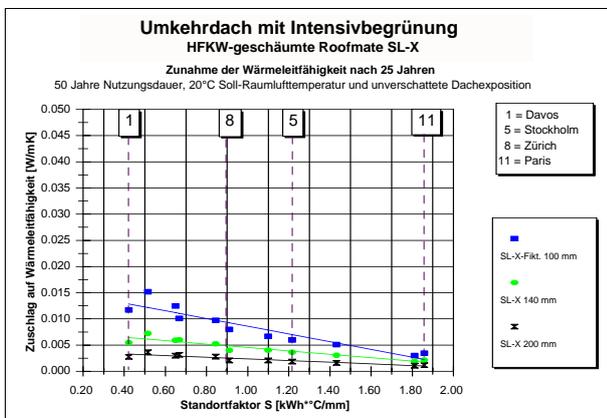
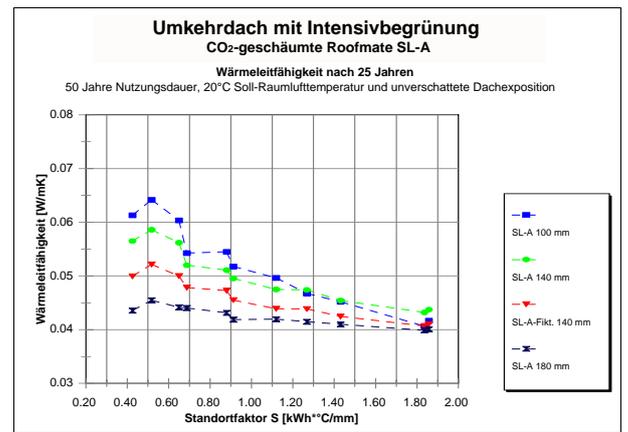
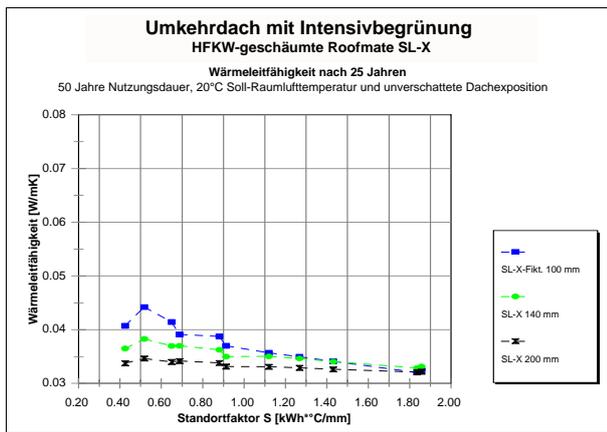
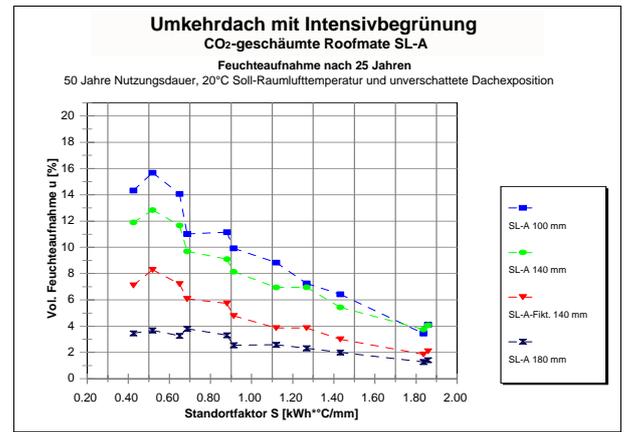
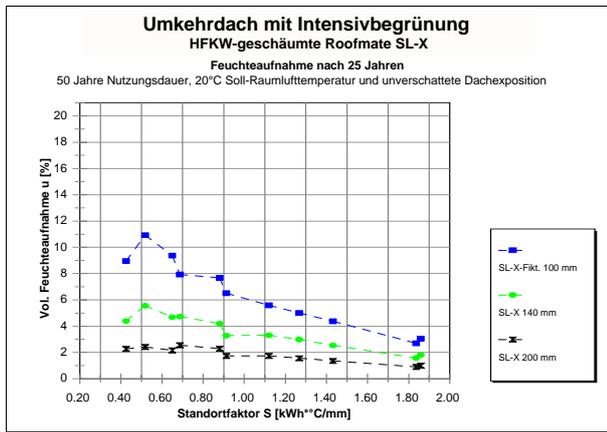


Bild 13: Umkehrdachaufbauten mit Deckschichten aus intensiven Dachbegrünungen

Feuchteaufnahme durch Diffusion (**Oben**), Wärmeleitfähigkeit (**Mitte**) und resultierender $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuslag (**Unten**) bei 50 Jahren Nutzungsdauer, 20°C Soll-Raumlufttemperatur und unverschatteter Dachexposition für HFKW-geschäumte XPS-Dämmplatten (**Linke Seite**) und CO₂-geschäumte XPS-Dämmplatten (**Rechte Seite**) mit unterschiedlichen Dämmschichtdicken. Für den $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuslag sind lineare Näherungsgeraden in Abhängigkeit Standortfaktors S angegeben. Für die Dämmplatte SL-A-Fikt 140 mm wurden erhöhte Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen über den gesamten Dämmplattenquerschnitt berücksichtigt.

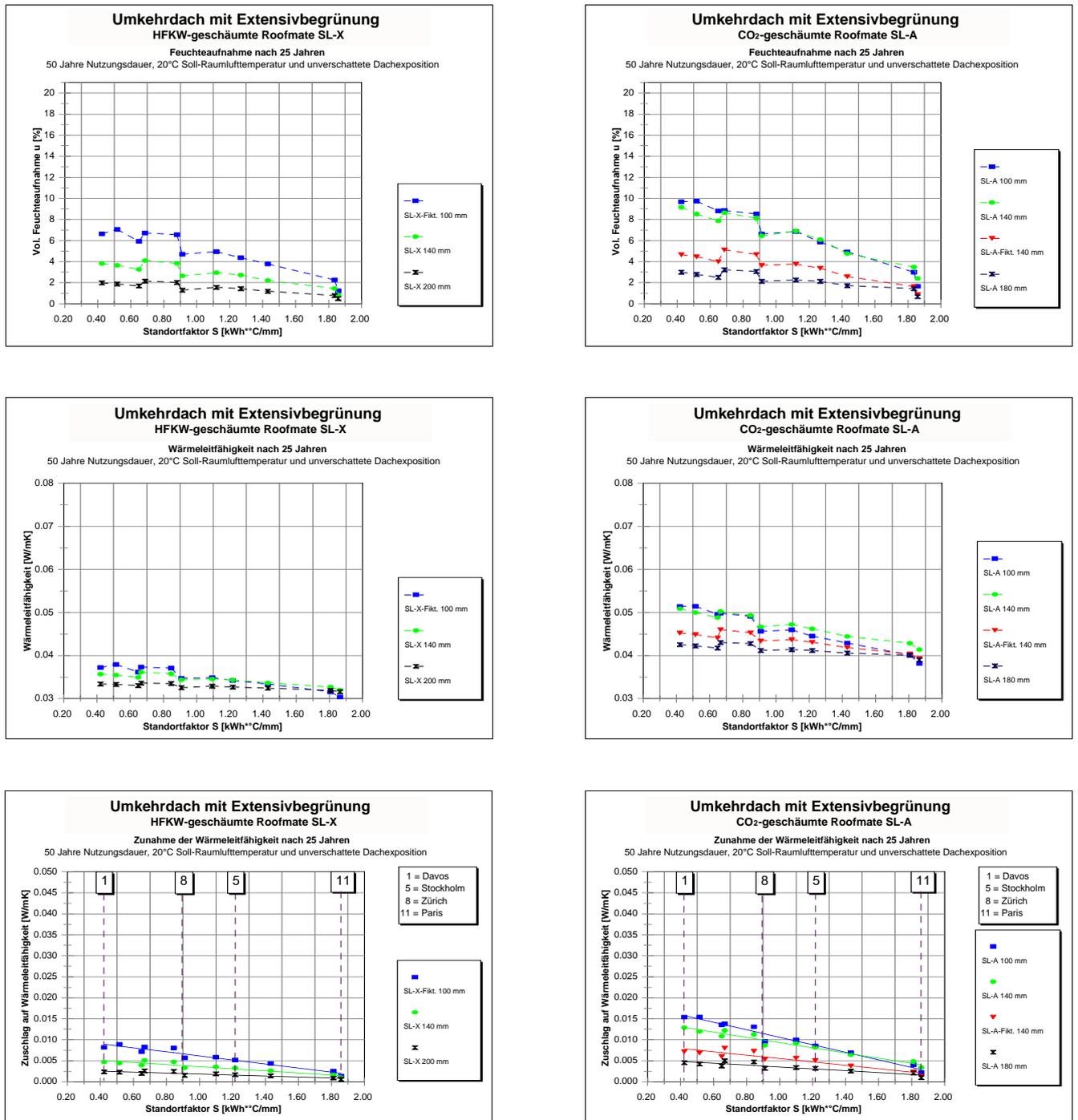


Bild 14: Umkehrdachaufbauten mit Deckschichten aus **extensiven Dachbegrünungen**

Feuchteaufnahme durch Diffusion (**Oben**), Wärmeleitfähigkeit (**Mitte**) und resultierender $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag (**Unten**) bei 50 Jahren Nutzungsdauer, 20°C Soll-Raumlufttemperatur und unverschatteter Dachexposition für HFKW-geschäumte XPS-Dämmplatten (**Linke Seite**) und CO₂-geschäumte XPS-Dämmplatten (**Rechte Seite**) mit unterschiedlichen Dämstoffdicken. Für den $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschlag sind lineare Näherungsgeraden in Abhängigkeit Standortfaktors S angegeben. Für die Dämmplatte SL-A-Fikt 140 mm wurden erhöhte Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen über den gesamten Dämmplattenquerschnitt berücksichtigt.

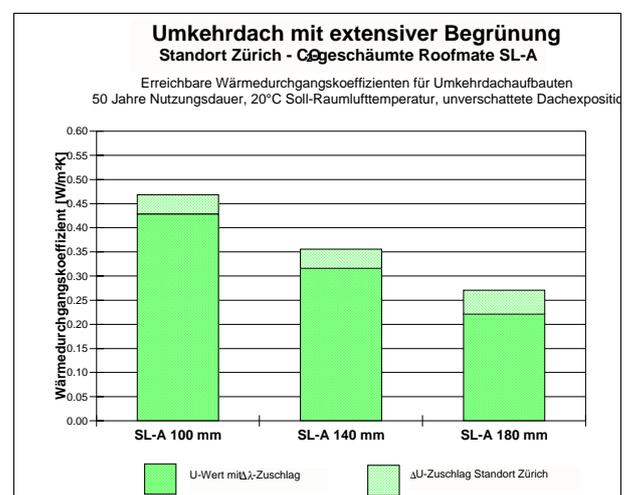
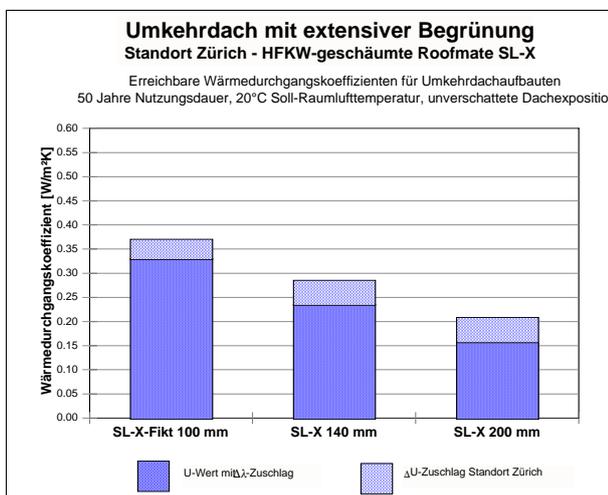
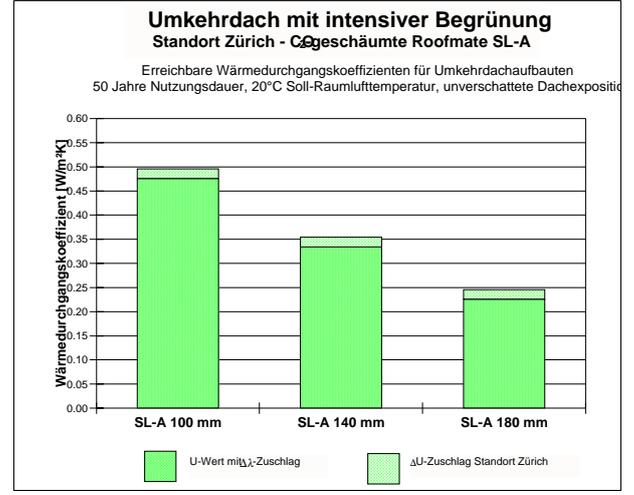
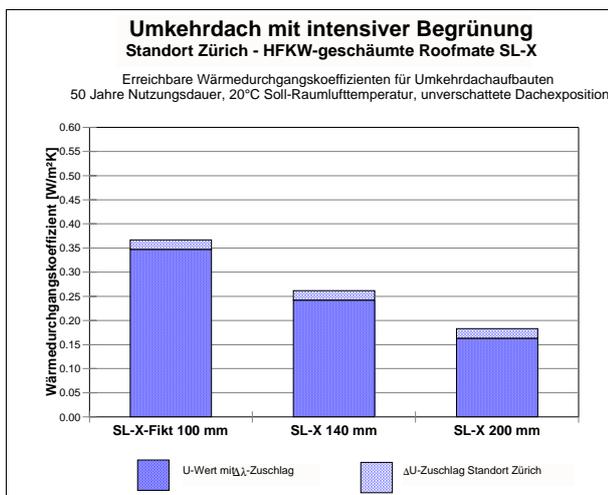
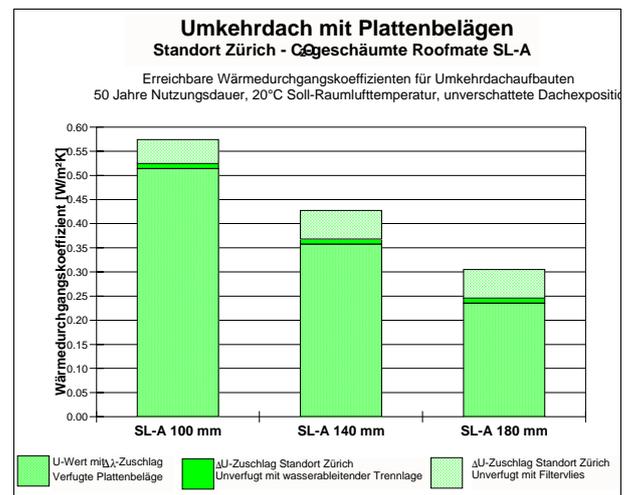
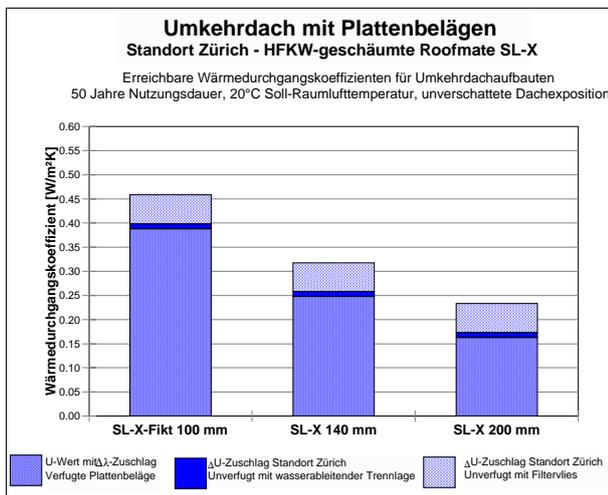


Bild 15: Wärmedurchgangskoeffizienten für Umkehrdachaufbauten mit Deckschichten aus Plattenbelägen (**Oben**), intensiver (**Mitte**) und extensiver (**Unten**) Begrünung am Standort Zürich unter Berücksichtigung des ΔU_r -Zuschlags und der $\Delta U_{r,20^\circ C}$ -Zuschläge bei 50 Jahren Nutzungszeit, 20°C Soll-Raumlufttemperatur und unverschatteter Dachexposition.

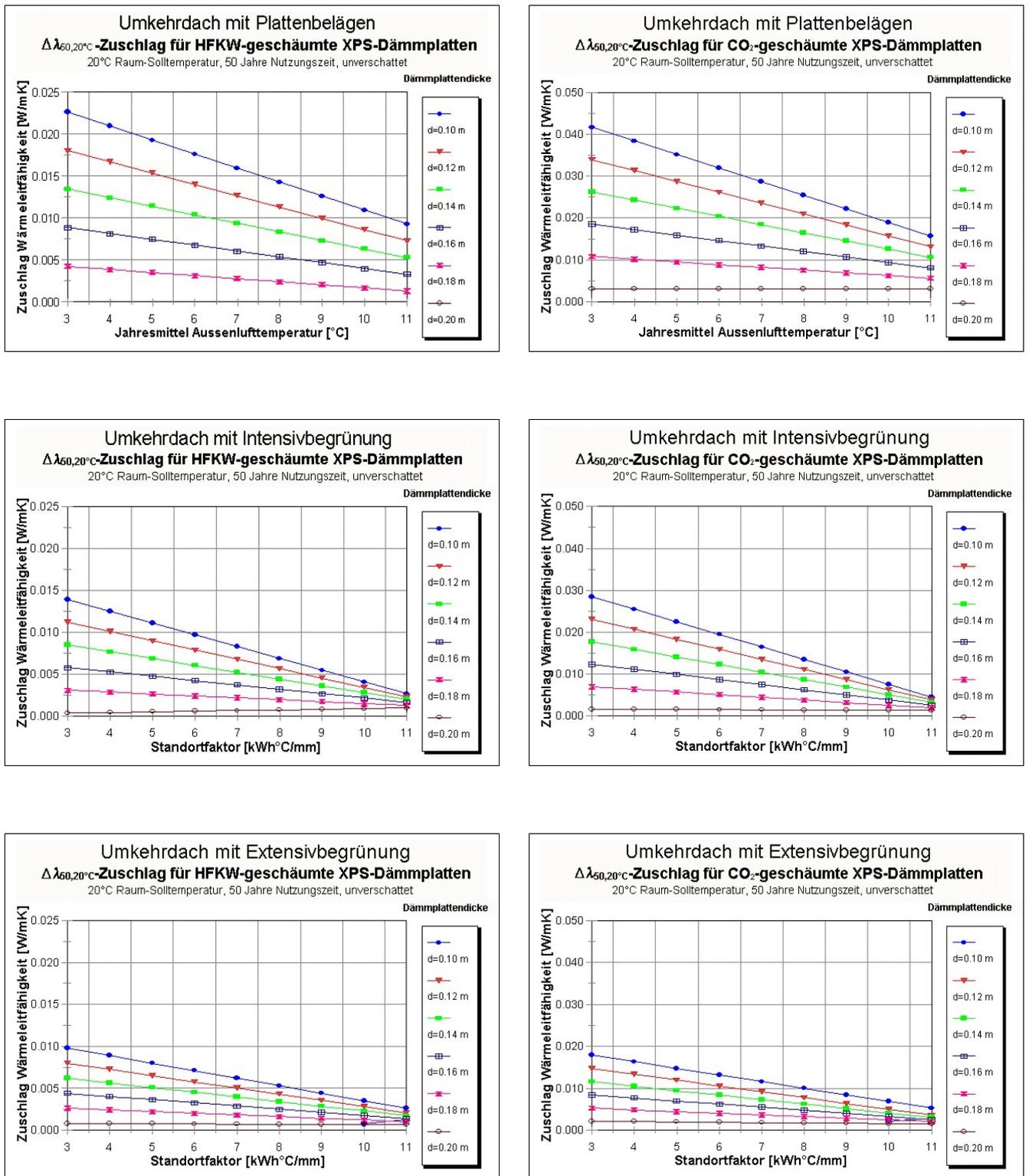


Bild 16: Näherungslösung für $\Delta\lambda_{50,20^\circ\text{C}}$ -Zuschläge auf die deklarierte Wärmeleitfähigkeit $\Delta\lambda_D$ von XPS-Dämmstoffen in Umkehrdachaufbauten mit verschiedenen Dämmstoffdicken, Deckschichten.

Linke Seite: Schäumgas HFKW

Rechte Seite: Schäumgas CO₂

Diese Werte basieren auf den Gleichungen 11 - 16 und beinhalten eine ausreichende Planungssicherheit. Sie sollten angewandt werden, solange keine detaillierten technischen Daten bezüglich eines allfällig herstellerabhängigen Wasserdampfdiffusionsverhaltens vorliegen und damit entsprechende produktespezifische Nachdimensionierungen durchgeführt werden können.