

Numerische Simulation und Prognose des Feuchteverhaltens von Außenbauteilen und konstruktiven Details

Einführung

In Deutschland müssen jährlich 3,4 Milliarden DM ausgegeben werden, um Bauschäden an neuen und etwa ebensoviel um Schäden an sanierten Gebäuden zu beheben [1]. Eine Analyse zeigt, daß sich der weitaus größte Teil der Schäden direkt oder indirekt auf Feuchte zurückführen läßt, wobei zum einen die Funktionssicherung, z. B. der Wärmeschutz, zum anderen die Eigensicherung, z. B. die Lebensdauer der Gebäudehülle, stark beeinträchtigt wird. Von den Autoren sind Modelle für den gekoppelten Wärme-, Luft- und Feuchtetransport in kapillarporösen Baustoffen einschließlich geeigneter Computercodes (z. B. DIM 2.7...3.0) entwickelt worden, um die Temperatur-, Feuchte- und Eis-, Wasserdampf- und Luftdruckfelder sowie die ausgetauschten Energie- und Stoffströme in mehrschichtigen Außenbauteilen und konstruktiven Details unter den wirklich vorliegenden bauklimatischen Randbedingungen und Raumnutzungsbedingungen berechnen zu können [2], [3]. Im folgenden Beitrag wird die Leistungsfähigkeit der Rechenprogramme anhand aktueller Beispiele - Wärmedämmverbundsystem zur Sanierung von Betonplattenbauten, Verbesserung der Wärmedämmung eines Fachwerkes mittels einer kapillaraktiven Innendämmung, thermische Mischsanierung komplizierter Anschlüsse, Grenzen der kapillaren Entspannung von leichten Holzflachdachkonstruktionen durch eine Hygrodiode - ausführlich demonstriert. Einzelheiten zur Feuchtetransporttheorie werden nicht mitgeteilt.

Hygrisches Verhalten von thermisch sanierten Plattenbauten

Wärmedämmverbundsysteme eignen sich aus mehreren Gründen für die anstehende Sanierung von Betonkonstruktionen, die in Fertigteilbauweise errichtet worden sind. Eine klassische Dreischichtenplatte - 150 mm Stahlbeton als Tragschicht - 50 mm Dämmstoff - 60 mm Stahlbeton als Wetterschutzschicht - wird durch ein WDVS - 60 mm Mineralwolle oder PS-Schaum und 8 mm mineralischer oder Kunstharzaußenputz thermisch aufgewertet (Abb. 1). Der Wärmedurchgangswert sinkt von $k = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Einschichtenplatte) bzw. $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Dreischichtenplatte) auf $0,35$ bis $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für Abplatzungen ist keine aufwendige Betonsanierung erforderlich und Fugenprobleme lassen sich gleichzeitig mit lösen. Durch das Anheben der Temperatur in der Altkonstruktion sinkt z. B. der Feuchtegehalt in der ursprünglichen Wetterschutzschicht, so daß die Korrosion in den Bewehrungsstählen zum Erliegen kommt. Abbildung 2 zeigt das Feuchtefeld in den ersten 3 Jahren nach Aufbringen des WDVS (60 mm Mineralwolle). Als äußere Randbedingungen dienen die Stundenwerte des Berliner Klimas: Lufttemperatur, relative Feuchte, kurzweilige Strahlung, langwelliger Strahlungsaustausch sowie Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlag kombiniert zu einem Schlagregenkriterium (Belastungsbeginn im April). Der Rückgang der Betonfeuchte in der jetzt mittig liegenden ursprünglichen Wetterschutzschicht ist deutlich zu erkennen. Umgerechnet in den Maßstab der relativen Luftfeuchte ergibt sich innerhalb von 5 Jahren eine Abnahme von ca. 90% auf 65% bis 60% (100 mm WDVS), wobei eine Wand mit einem PS-WDVS zunächst langsamer austrocknet. Die Ergebnisse stimmen etwa mit den Untersuchungen von Cziesielski [4] und Gertis [5] überein. Die Feuchtepeaks an der linken

1) Technische Universität Dresden

2) Fachhochschule Lausitz, Cottbus

Außenseite folgen aus der Schlagregenbelastung (Westseite). In der kalten Jahreszeit trocknet der Außenputz wesentlich schlechter ab, Kondensat durch den raumseitig anhaltenden Dampfstrom bildet sich aber nur wenig an der kalten Seite der Außendämmung. In der warmen Jahreszeit diffundiert ein Teil der Putzfeuchte durch die Mineralwollendämmung zurück und kondensiert an der Innenseite der Außendämmung. Das Programm DIM gestattet auch die Berechnung mehrdimensionaler Feuchtefelder. In Abbildung 3 ist die hygrische Situation für einfache DIN-Randbedingungen in der Umgebung des Stahlankers dargestellt. Durch die Verzerrung des Temperaturfeldes (Erwärmung an der Außenseite des Stahlankers, Abkühlung an der Innenseite des Stahlankers, vgl. Abb. 4) verschwindet das Kondensat an der kalten Seite der neu aufgetragenen Dämmschicht, während an der kalten Seite der Kerndämmung eine geringfügige Verstärkung auftritt. Der Effekt ist aber insgesamt unbedeutend.

Kapillaraktive Innendämmung zur Verbesserung des Wärmeschutzes von Fachwerkbauten

Der mittlere Wärmedurchgangswert eines 150 mm starken Fachwerkes mit Strohlehmausfachung liegt bei $k = 1,75 \text{ W/m}^2\text{K}$. Er sollte im Rahmen einer thermischen Sanierung auf $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ verbessert werden. Da aus Denkmalschutzgründen ein WDVS ausscheidet, läßt sich dieser Wert nur mit einer geeigneten Innendämmung erreichen. Ein klassisches System mit innerer Dampfbremse erweist sich beim Fachwerk als problematisch, nicht nur weil deren beschränkte Lebensdauer doch zur Kondensatbildung an der kalten Seite der Dämmschicht führt, sondern weil z. B. der über die Fugen eindringende Niederschlag nicht auch nach innen abtrocknen und so zu einer Schädigung der Holzkonstruktion beitragen kann. Als Alternative wird eine diffusionsoffene und kapillaraktive Innendämmung vorgeschlagen. Die überhygroskopische Feuchte, verursacht durch inneres Kondensat oder eindringenden Regen, läßt sich durch die Kapillarkräfte weitgehend entspannen (siehe [6]).

Die Untersuchungen innerhalb des DFG-Schwerpunktprojektes "Bauphysik der Außenwände" sind an einem Umgebendehaus in Ebersbach, Ostsachsen (Abb. 5) durchgeführt worden. Eine kleine Wetterstation registriert die Stundenwerte der im vorigen Abschnitt genannten Klimakomponenten, wobei der Schlagregen auf die Ostwand direkt gemessen wird (Abb. 6). Die Blockwand der im Erdgeschoß befindlichen Umgebendestube ist mit 6 Innendämmvarianten (60 mm Mineralwolle, 60 mm faserdotiertes Calciumsilikat, 60 mm Holzweichfaser, 60 mm Isofloc, 60 mm Perlite, 60 mm Cellco) versehen worden. Aufgrund der hohen Eigendämmung ($s/\lambda = 1,54 \text{ m}^2\text{K/W}$) der Blockwand funktionieren aus hygrischer Sicht fast alle Systeme, lediglich hinter der Holzweichfaserschicht hat sich Schimmel gebildet. Um die Ergebnisse der numerischen Simulation mit Meßwerten vergleichen zu können, sind Temperatur- und Feuchtefühler (elektrische Widerstandsfühler im Holz, kapazitive Luftfeuchtefühler in der potentiellen Kondensationsebene, "Kurzschlußfühler" sowie Wärmeflußmeßplatten) in der Blockwand installiert worden. Die Abbildung 7 vergleicht die gemessenen und berechneten Temperaturen zwischen der faserdotierten Calciumsilikatinnendämmung und der Blockwand im Zeitraum von Januar 1995 bis April 1996. Die problematischeren Feuchtefelder werden nach Abschluß der Messungen in der Blockstube Ende 1997 ausgewertet. Im Fachwerkgeschoß sind 3 Strohlehmfelder durch Leichttonmörtel ersetzt worden. Als Innendämmung dienen hier ebenfalls die kapillaraktive Calciumsilikatplatte und zum Vergleich eine wie üblich hydrophobierte Mineralwolleplatte. Die Infrarotaufnahme Abbildung 8 zeigt zwar für die Mineralwolle den besseren Dämmwert an (Temperaturmeßstellen 3 und 5), aus hygrischer Sicht ist aber die faserdotierte Calciumsilikatplatte zu bevorzugen. Auch das Fachwerk ist mit der oben erwähnten Meßtechnik ausgerüstet worden. Die Messungen sollen

bis zum Jahr 1999 fortgesetzt werden. In den folgenden 3 Bildern sind die Feuchtefelder im Bereich Fachwerk, Leichttonmörtel, Calciumsilikatinnendämmung dargestellt. 30 Tage nach Einbringen des Leichttonmörtels belastet die hohe Einbaufeuchte sowohl die Innendämmung als auch das Holz (Abb. 9), nach 150 Tagen ist der Abtrocknungsprozeß bereits sichtbar, nach 1,5 Jahren (Abb. 11) ist die Konstruktion vollständig ausgetrocknet, und außerdem hat sich auch kein winterliches Kondensat an der kalten Seite der Dämmschicht angesammelt. Die Simulationsrechnungen sind im Gegensatz zu den Bildern 3 und 4 mit den Stundenwerten der gemessenen klimatischen Randbedingungen einschließlich des Schlagregens für den Zeitraum Herbst 1995 bis Frühjahr 1997 durchgeführt worden.

Thermische Mischsanierung kritischer Bereiche

Wenn möglich, ist eine Außendämmung (wie in Beispiel 1) einer Innendämmung (wie in Beispiel 2) vorzuziehen. Zuweilen unterliegen aber Teile der Fassade dem Denkmalschutz, oder kompliziertere Anschlüsse verlangen eine individuelle Lösung. Im folgenden werden die Feuchte- und Temperaturfelder von zwei konstruktiven Details am Gebäude Burgstraße 12 in Leipzig vorgestellt (Abb. 12, errichtet Mitte der 60er Jahre). Die Stahlbetonaustragung (1) stellt eine schwer zu behebbende Wärmebrücke dar. Die vorgeschlagene und ausgeführte Lösung zeigt Abbildung 13 (Vertikalschnitt). Die Außenseite zur Galerie ist mit 120 mm Schaumglas gedämmt und raumseitig sind Außenwand und Decke mit je 50 mm Calciumsilikat (vgl. Fachwerkkinnendämmung) aufgebessert worden. Die rote Farbe signalisiert trockene Dämmstoffe. In der Außenwand bildet sich zwischen Innendämmung und Ziegelmauerwerk nur eine geringe Menge überhygroskopisches Wasser (unterer Bildrand 2, 2 Vol%, grüne Färbung). In Abbildung 14 ist die zugehörige, inzwischen zur klassischen Bauphysik zählende Temperaturverteilung dargestellt. Eine weitere Problemzone folgt aus der unter Denkmalschutz stehenden Muschelkalkfassade im Giebelbereich (2). Die Außenlängswand und Betonstütze können zwar mit einem Mineralwolle-WDVS saniert werden, die Giebelwand erhält aber an der Innenseite wieder eine Calciumsilikatdämmung. Abbildung 15 (Horizontalschnitt) zeigt das Feuchtefeld. Hinter der Dämmung und am Anschlußpunkt zur Außenlängswand bildet sich etwas Kondensat, die Innenoberfläche bleibt aber trocken. Zur Komplettierung enthält Abbildung 16 ebenfalls das Temperaturfeld.

Leichtes Holzkassettendach mit einer Hygrodiode als Dampfsperre

Im Rahmen des IEA, Annex 24 - HAMTIE Projektes [7] ist ein leichtes Dänisches Holzkassettendach (Abb. 17) mit einer Mineralwollendämmung und einer "Hygrodiode" als Dampfbremse untersucht worden. Zur Simulation der Holzeinbaufeuchte dient ein feuchtegesättigtes Vlies über der Mineralwollenschicht. In Abb. 18 ist die erforderliche Vernetzung eines Dachausschnittes zur numerischen Simulation dargestellt. Die Berechnungen werden wieder mit dem Programm DIM 2.7 unter Verwendung des in Kopenhagen gemessenen Klimas von Juni 1990 bis Juli 1993 durchgeführt. Im Winter kondensiert wie zu erwarten die Feuchte unter der Dachhaut und belastet die Brettschalung. Im Sommer sammelt sich durch Umkehrdiffusion das Wasser am Boden des Daches (vergleiche (3) in Abb. 19) und wird durch das saugfähige Vlies in der Hygrodiode (die dampfsperrenden PE-Folienstreifen sind versetzt auf die Vlies-schicht appliziert - vergleiche Abbildungen 17 und 18) aus der Dachkonstruktion abtransportiert (vergleiche (5) in Abb. 19). In Abbildung 19 ist außerdem zu sehen, daß ein Teil der "Einbaufeuchte" in den Holzsparren (6) eindringt. Die Hygrodiode führt zu einer hygrischen Gesamtentspannung der Konstruktion (stark eingezeichnete Kurve HWD in Abb. 20). Zum

Vergleichen sind die Fälle PEW (Dach mit Einbaufeuchte und einer üblichen PE-Folie als Dampfsperre), HDD (Dach ohne Einbaufeuchte mit Hygrodiode) und PED (Dach ohne Einbaufeuchte mit PE-Folie) untersucht worden. Die k-Werte dieses Holzkassettdaches schwanken je nach Feuchtegehalt (und Feuchtebewegung) zwischen 0,35 und 0,38 W/m²K.

Begrüntes Holzdach mit einer Hygrodiode als Dampfsperre

Während die Hygrodiode im vorigen Abschnitt die gewünschte Trocknung beschleunigt, ist sie aber im folgenden Beispiel völlig überfordert. Die Abbildungen 21 und 22 zeigen den Aufbau des begrünten Holzdaches in einer Neubausiedlung in Braunau, Österreich. Bereits nach 2 Jahren zeigten sich Feuchteschäden bis zur Verrottung der Holzschalung. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen, dargestellt in den Abbildungen 23 und 24, bestätigen die Planungsfehler. Obwohl die Dachhaut unter der Grünschicht völlig wasserdicht ist, steigt infolge Wasserdampfkondensation der Feuchtegehalt in den Schalbrettern von 10 Vol% im ersten Jahr auf 25 Vol% im zehnten Jahr an (jeweils in der Bildmitte). Allmählich wird auch die Mineralwolle von oben durchfeuchtet. Im Sommer bildet sich zwar etwas Umkehrkondensat (siehe Peaks an der linken Bildseite), das über die Hygrodiode abgeleitet werden kann, aber durch die (im allgemeinen gewünschte) Reduktion der Oberflächentemperatur des Gründaches ist der Effekt überhaupt nicht relevant. Das zerklüftete Feuchtegebirge auf der rechten Bildseite entsteht durch das ständige Beregnen und Austrocknen der Substratschicht. Am Boden über der Dichtungsbahn liegt der Feuchtegehalt immer im überhygroskopischen Bereich, und deshalb beträgt die Luftfeuchte immer 100 %. Fazit: Eine einfache Holzwarmdachkonstruktion kann nicht mit einer Grünschicht bedeckt werden.

Schlußfolgerungen

Mit dem Programmpaket DIM 2.7 kann der gekoppelte Wärme-, Feuchte- und Lufttransport in ein- und mehrschichtigen Umfassungskonstruktionen, Wand- und Deckenanschlüssen sowie komplizierten konstruktiven Details berechnet werden.

Für die Sanierung von Betontafelbauten empfiehlt sich ein äußeres Wärmedämmverbundsystem. Neben der Verbesserung des Wärmeschutzes garantiert es den erforderlichen Wetterschutz. Inneres Kondensat tritt nur in geringen Mengen auf, und durch das Abtrocknen der ursprünglichen Vorsatzschale wird die Korrosion der Bewehrung unterbunden.

Bei Außenwänden mit denkmalgeschützten Fassaden läßt sich der Wärmedurchgangswert durch eine diffusionsoffene aber kapillaraktive Innendämmung auf etwa 0,6 W/m²K reduzieren, ohne daß gravierende hygrische Probleme auftreten.

Bei Warmdächern aus Holz kann eine kapillarwasserdurchlässige Dampfsperre (Hygrodiode) zu einer Entspannung der Konstruktion eingesetzt werden. Sie versagt aber vollständig bei begrünten Flachdächern aus Holz.

Literatur

- [1] Dritter Bauschadensbericht der Bundesregierung 1996
- [2] Fechner, H., Grunewald, J., Häupl, P., Stopp, H.
Die numerische Simulation des gekoppelten Feuchte-, Luft- und Wärmetransportes in kapillarporösen Baustoffen
9. Bauklimatisches Symposium, Tagungsband 1, S. 125-141, Dresden, Sept. 1994
- [3] Häupl, P., Grunewald, J., Fechner, H., Stopp, H.
Coupled heat, air and moisture transfer in building structures
Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 40, No. 7, pp. 1633-1642, 1997
- [4] Cziesielski, E.
Wärmedämmverbundsysteme als Korrosionsschutz
Mitteilung der TU Berlin, Institut für Baukonstruktionen und Festigkeit
- [5] Künzel, H. M., Gertis, K.
Plattenbausanierung durch Außendämmung
Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart
IBP-Mitteilung 305, Nr. 23, 1996
- [6] Häupl, P., Neue, J., Fechner, H.
Coupled Heat, Air and Moisture Transfer- the Base of the Durability of Facade Repair Systems
Advances in Architecture Series, Volume 3
Structures Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings, pp. 255-265,
Computational Mechanics Publications, Southampton, UK and Boston, USA, 1977
- [7] Hens, H., Ojanen, T., Künzel, H. M., Dow, G., Rode, C., Hagentoft, C. E.
IEA, Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts (HAMTIE), Task 1
Modelling, Common exercises, Summary Report, Leuven 1996

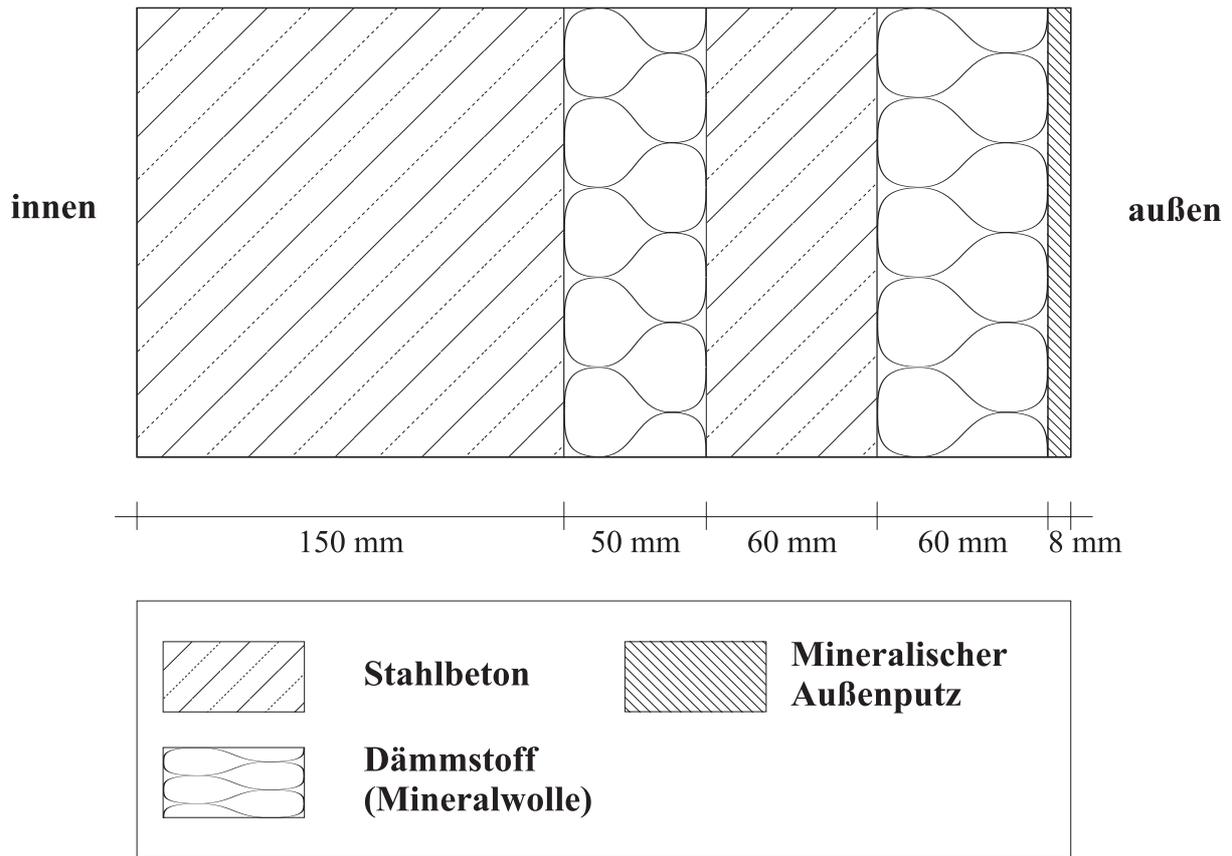


Abb. 1: Wandaufbau einer dreischichtigen Betonplatte mit 60mm Mineralwolle Wärmedämmverbundsystem

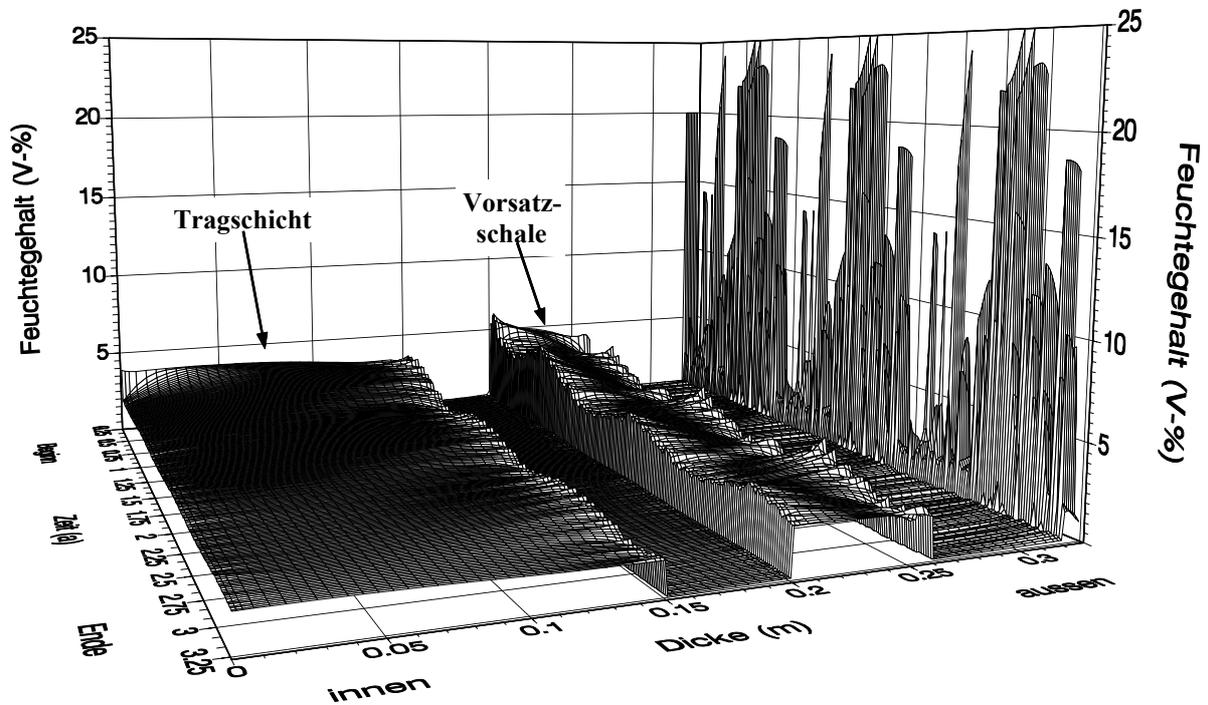


Abb. 2: Verlauf des Feuchtefeldes in der Konstruktion Abb. 1 in den ersten drei Jahren der Belastung durch das Berliner Klima von 1980 (Westwand)

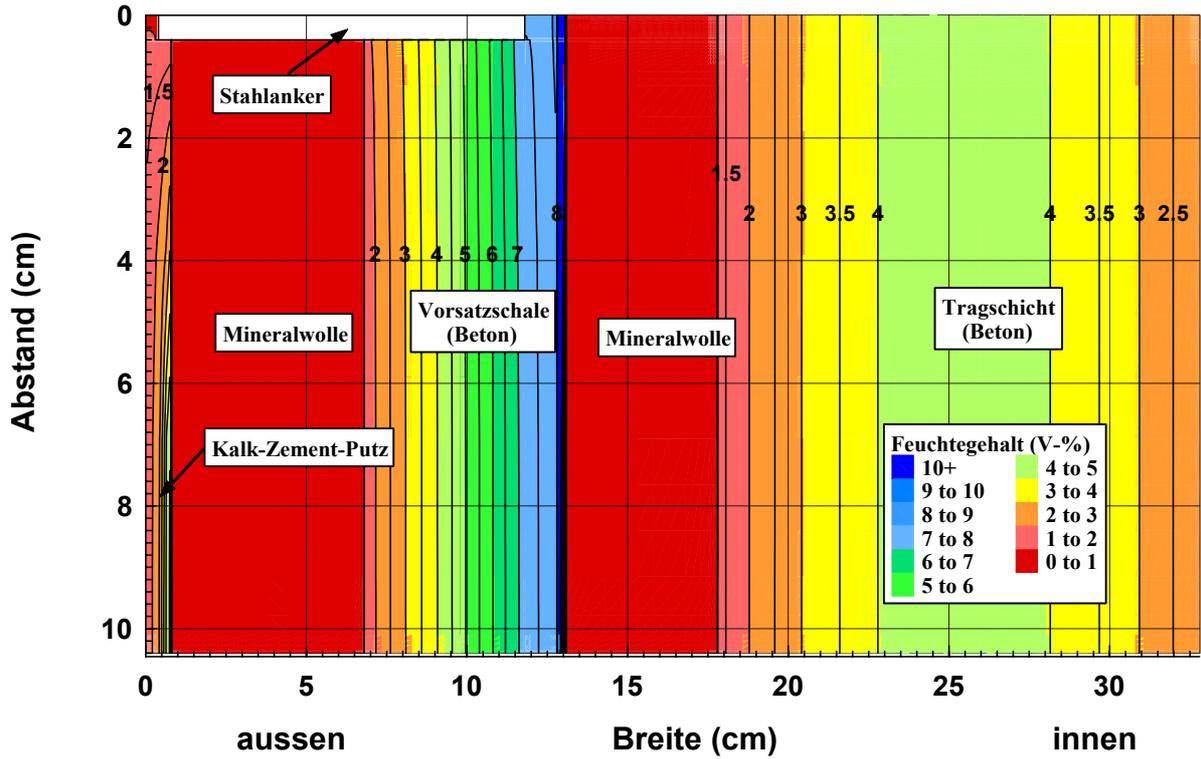


Abb. 3: Feuchtefeld in der Umgebung eines Stahlankers nach 60 Tagen
 Klima: konstant $\vartheta_e = -10^\circ\text{C}$, $\varphi_e = 80\%$, $\vartheta_i = 20^\circ\text{C}$, $\varphi_i = 50\%$

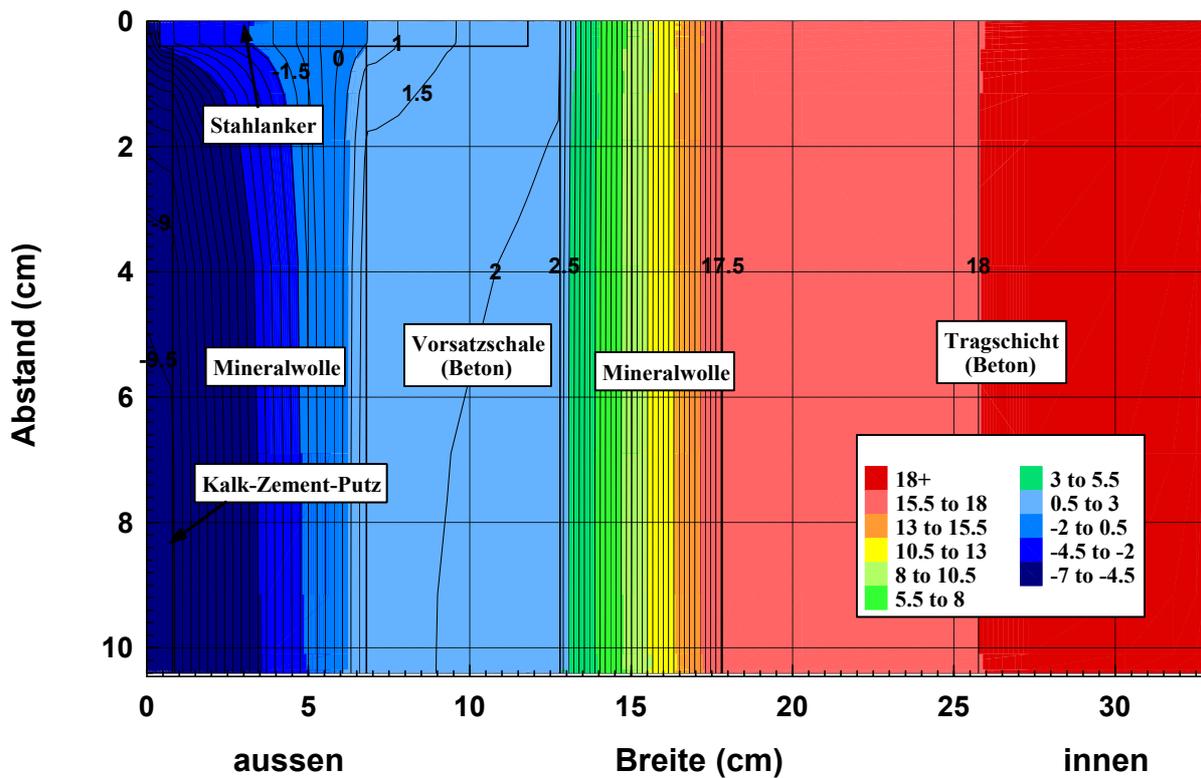


Abb. 4: Temperaturfeld in der Umgebung eines Stahlankers nach 60 Tagen
 Klima: konstant $\vartheta_e = -10^\circ\text{C}$, $\varphi_e = 80\%$, $\vartheta_i = 20^\circ\text{C}$, $\varphi_i = 50\%$



Abb. 5: Umgebäudehaus in Ebersbach, Ostsachsen

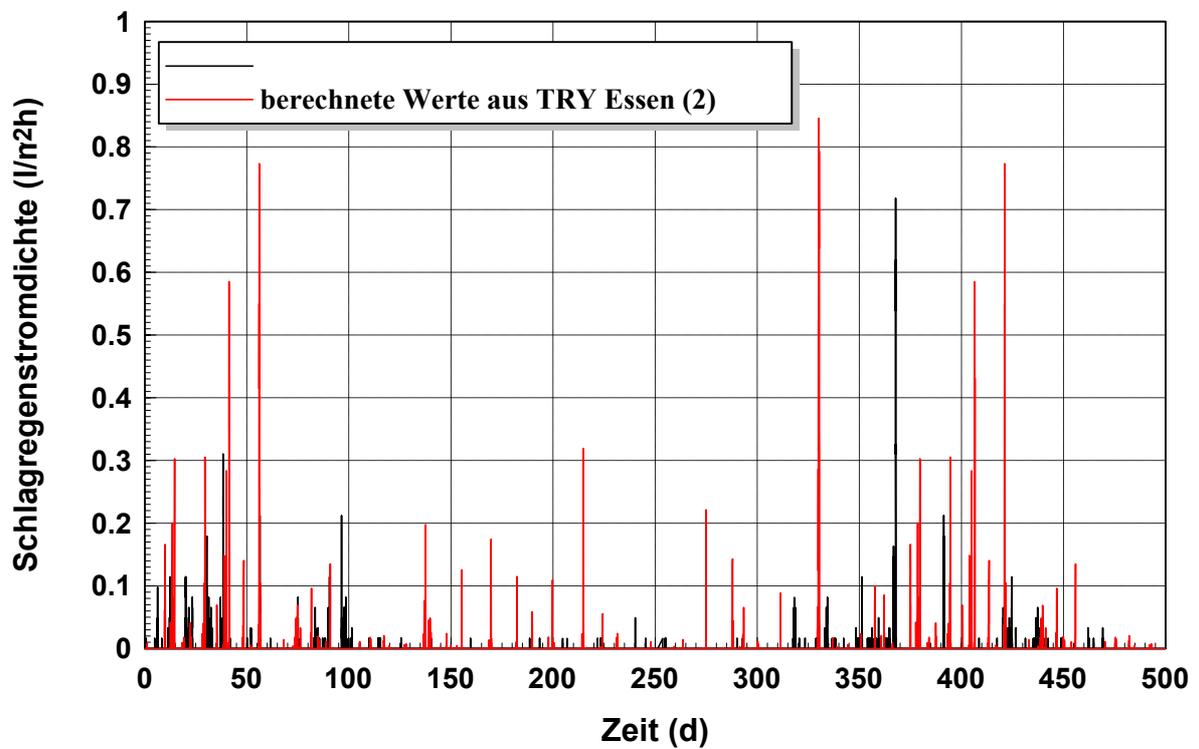


Abb. 6: Schlagregen auf eine Ostwand: ① direkt am Gebäude in Ebersbach gemessen
 ② berechnet aus den Daten des Referenzjahres Essen

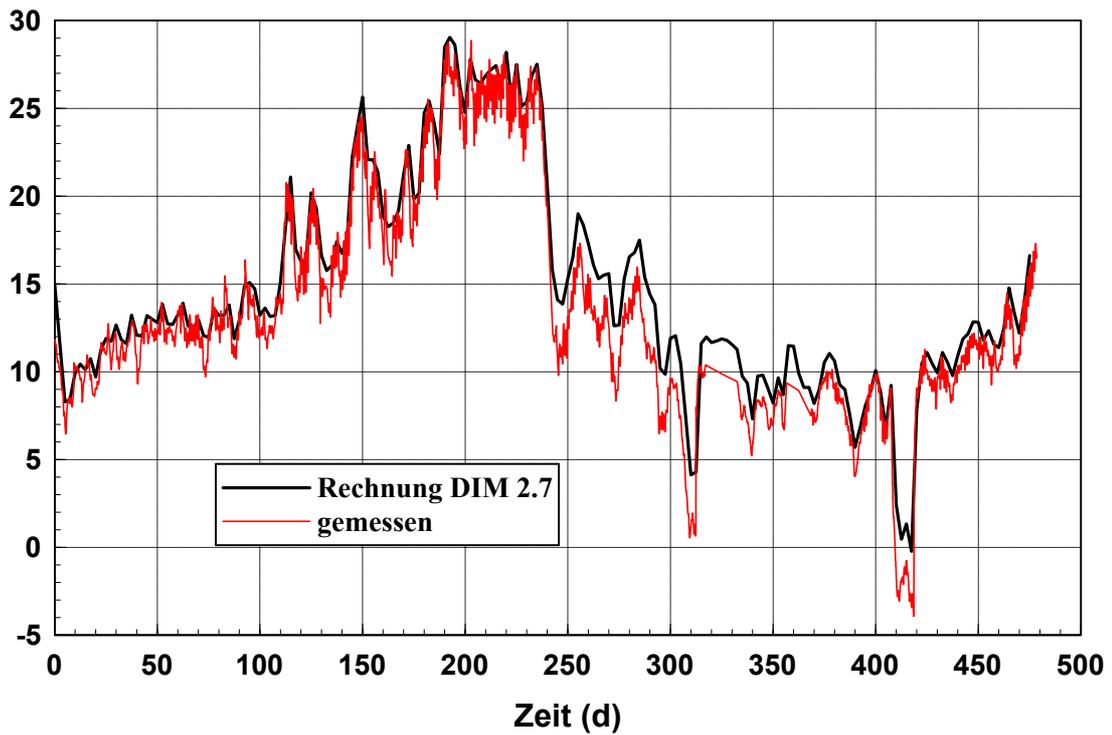


Abb. 7: Vergleich des gemessenen und berechneten Temperaturverlaufes zwischen Holz und Calciumsilikat-Innendämmung (Master-Klima-Platte) vom 1.1.95 bis 22.4.96

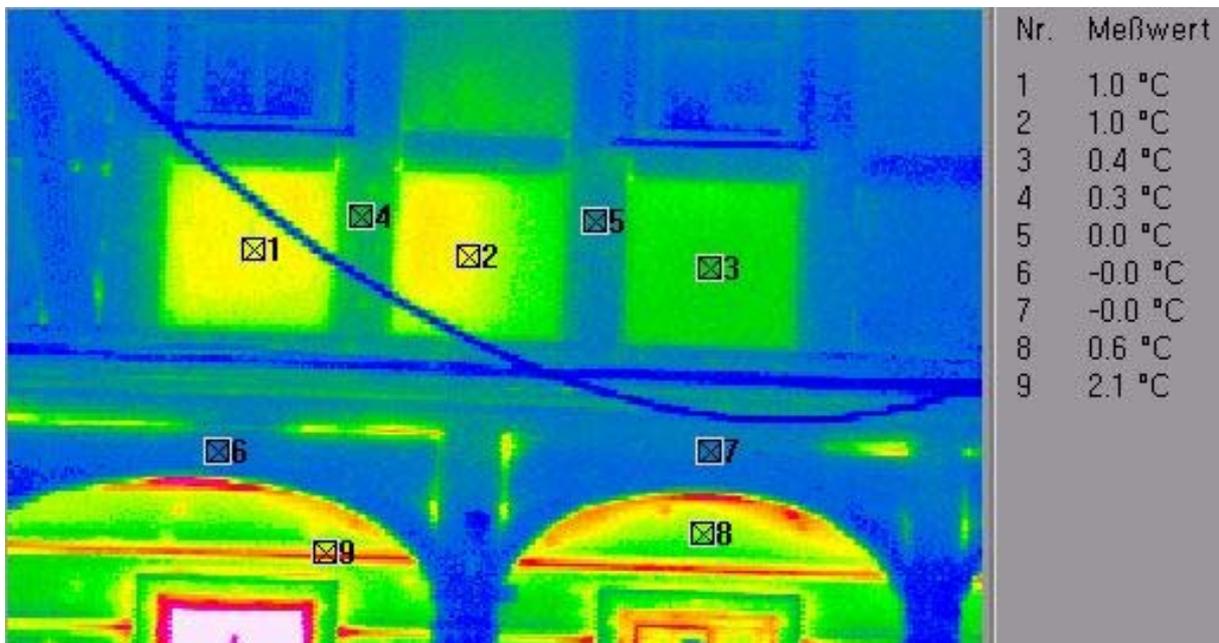


Abb. 8: Infrarotaufnahme des ersten und zweiten Stockwerks an der Ostseite des Umgebäudehauses in Ebersbach (mit Temperaturmeßpunkten)

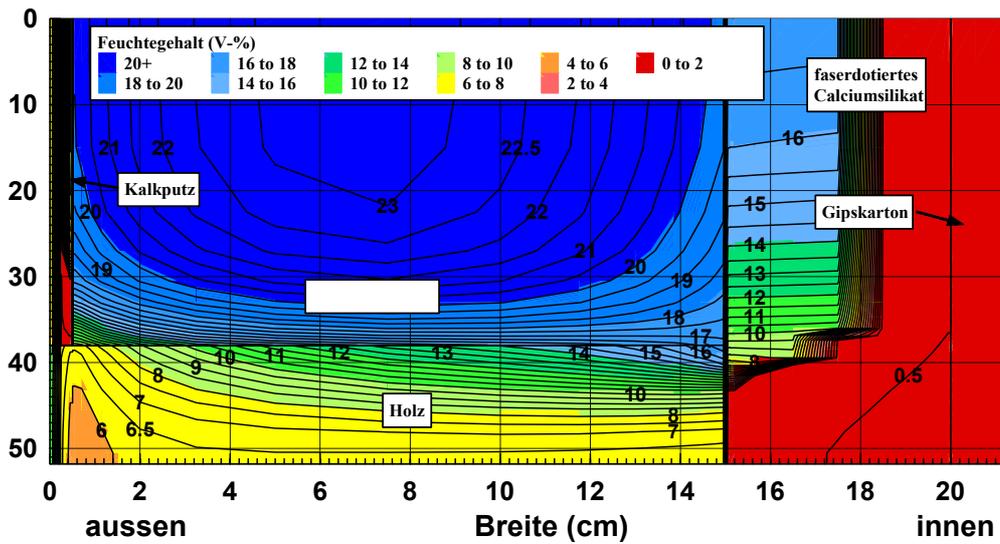


Abb. 9: Feuchteverteilung im Fachwerk 32 Tage nach Einbringen des Leichttonmörtels

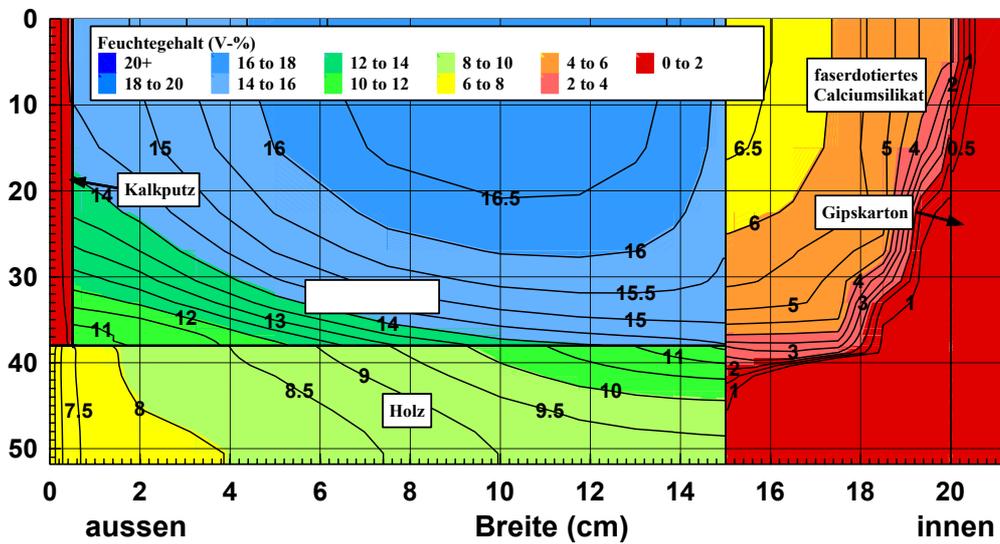


Abb. 10: Feuchteverteilung im Fachwerk 150 Tage nach Einbringen des Leichttonmörtels

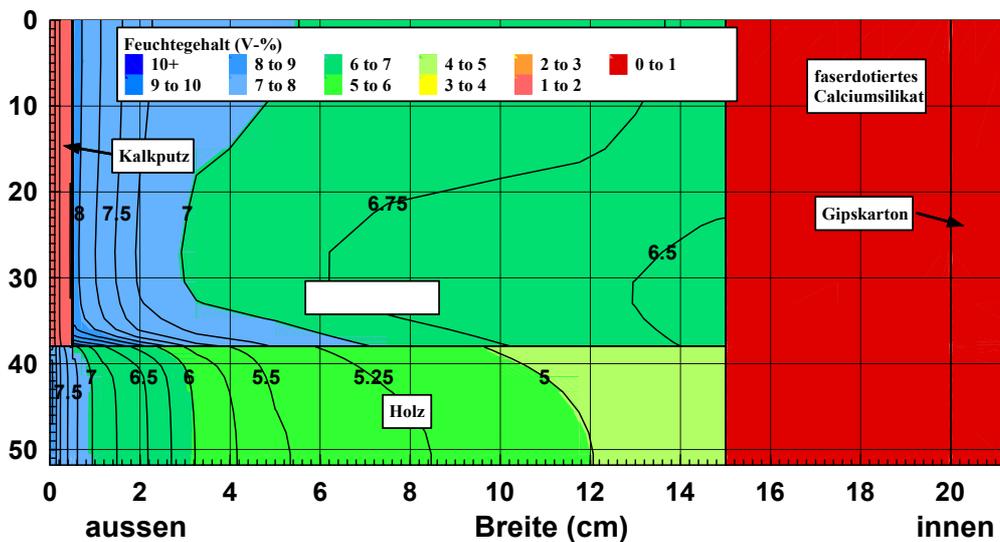


Abb. 11: Feuchteverteilung im zweiten Winter (1,5 Jahre) nach Einbringen des Leichttonmörtels

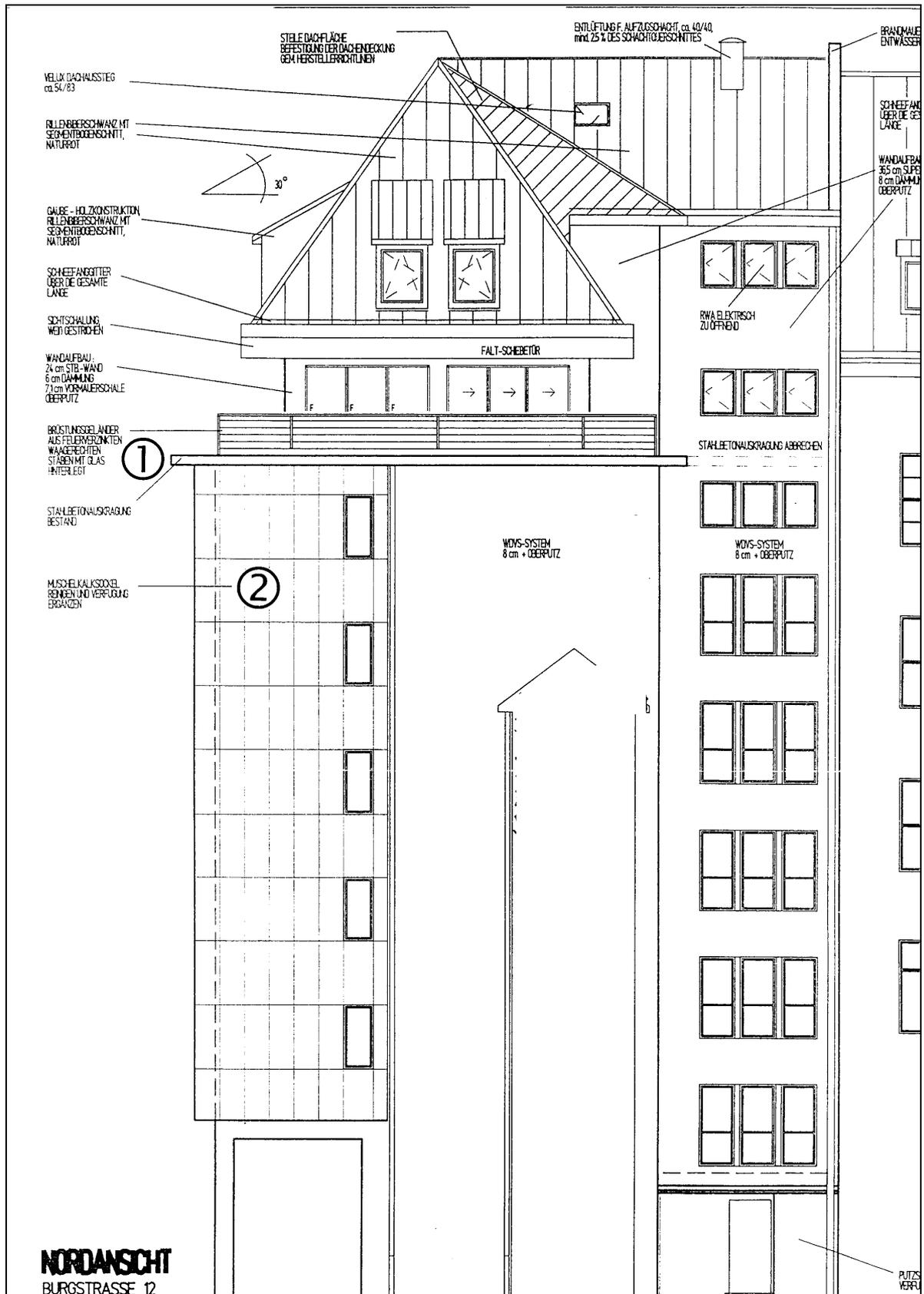


Abb. 12: Ansicht des Gebäudes in der Burgstraße 12 in Leipzig mit Darstellung der Berechnungsgebiete: ① Traufenüberstand ② Außenlängswand mit Muschelkalkfassade

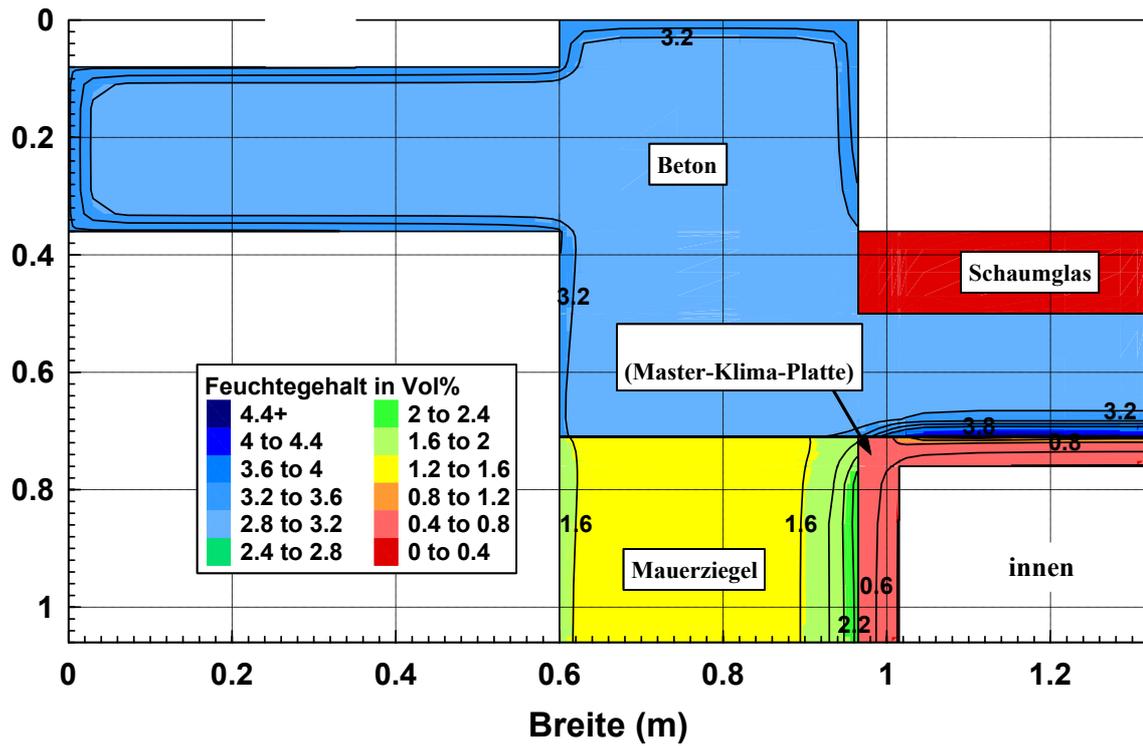


Abb. 13: Feuchtefeld im Bereich des Traufenüberstandes, Gebäude Burgstraße 12, Leipzig

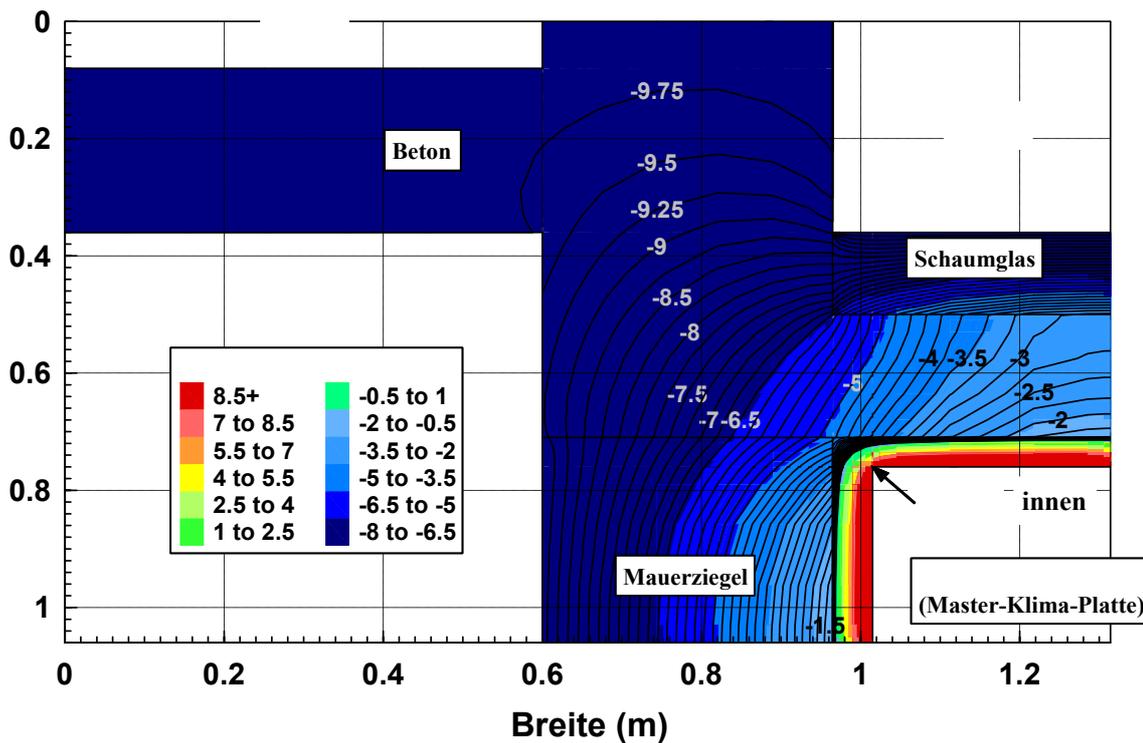


Abb. 14: Temperaturfeld im Bereich des Traufenüberstandes, Gebäude Burgstraße 12, Leipzig

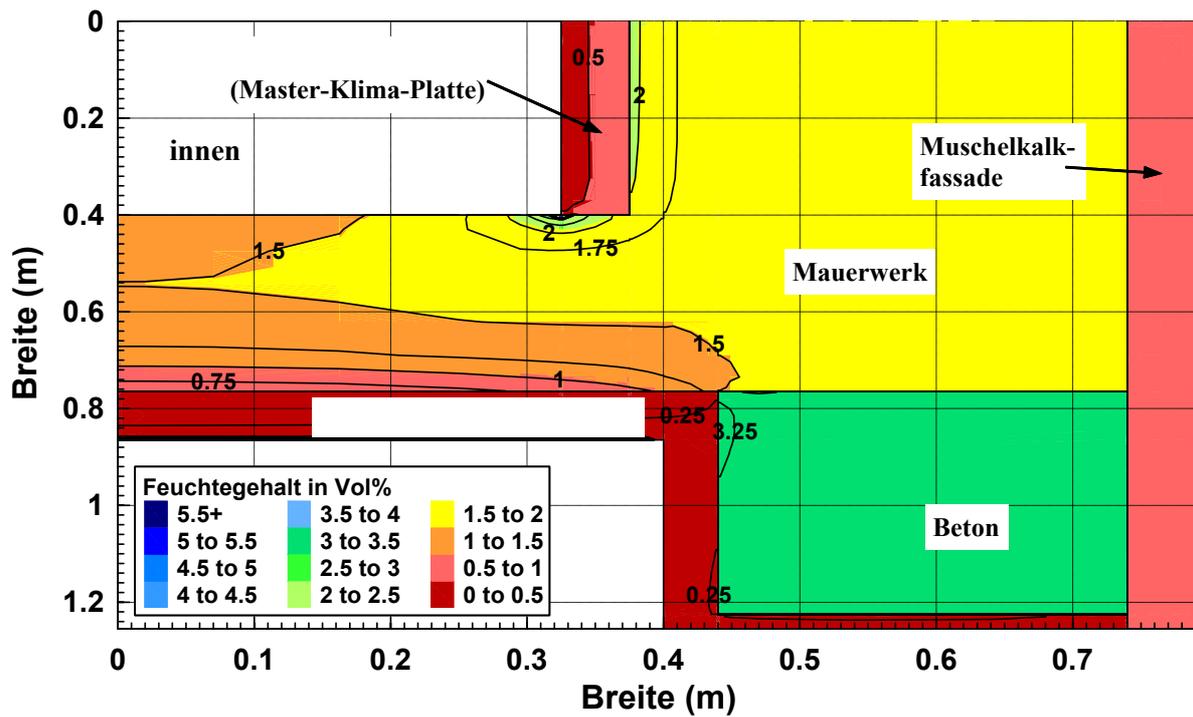


Abb. 15: Feuchtefeld im Bereich der denkmalgeschützten Giebelwand Gebäude Burgstraße 12, Leipzig

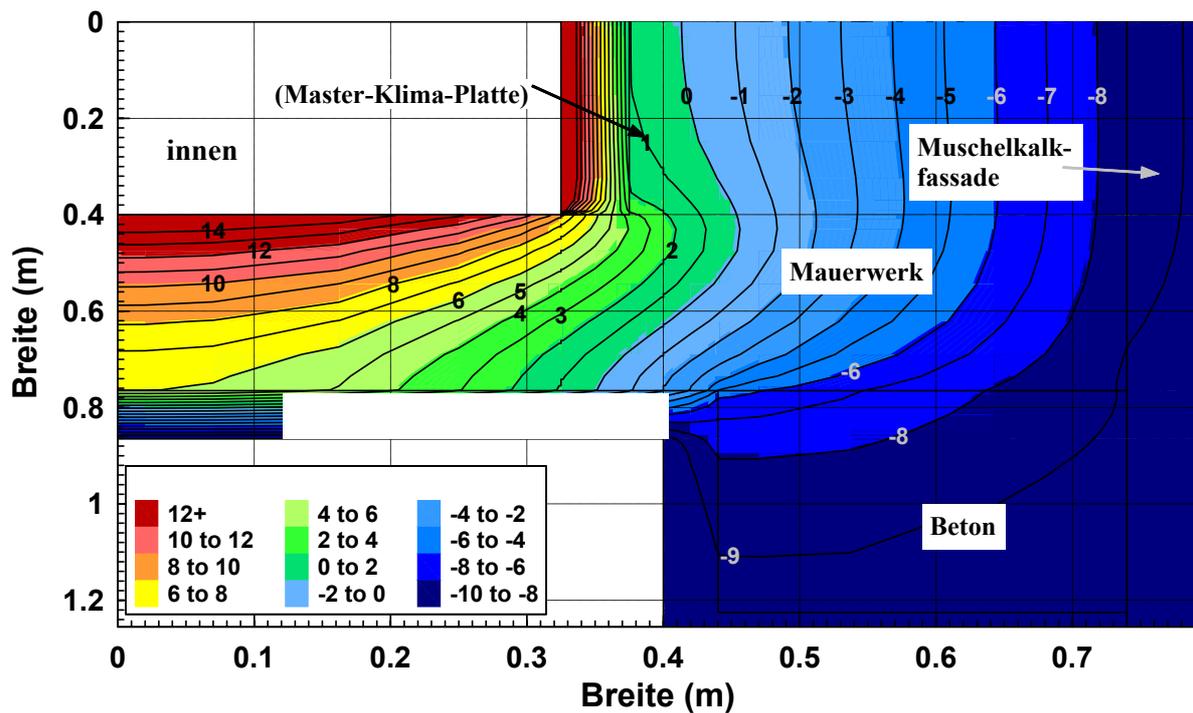


Abb. 16: Temperaturfeld im Bereich der denkmalgeschützten Giebelwand Gebäude Burgstraße 12, Leipzig

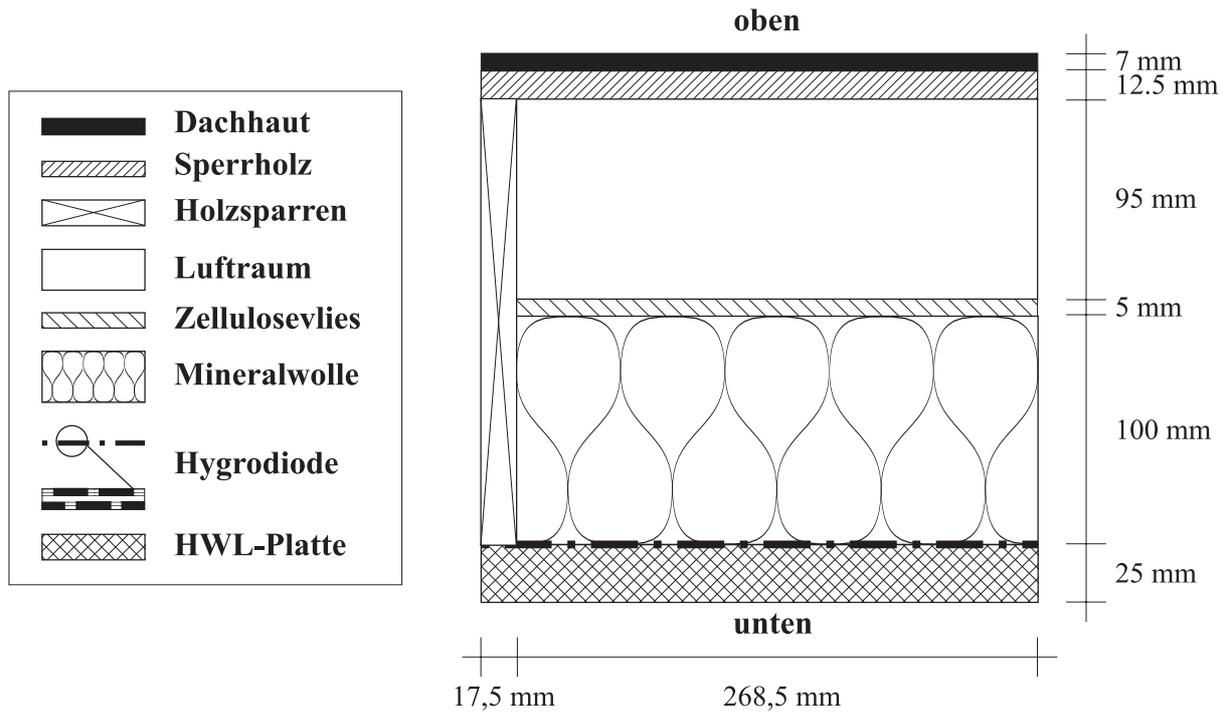


Abb. 17: Aufbau eines leichten Holzkassettendaches (Dänemark)

HAM5 2-D, Hygrodiode

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Dachhaut	16	17	1	
18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	5,25
35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	5,25
52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	1
69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	1
86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	4
103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	20
120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	20
137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	20
154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	20
171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	5
188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	2
205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	2
222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	1
239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	1
256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	4
273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	5
290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	20
307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	20
324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	20
341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	20
358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	8
375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	2
392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	0,03
409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	0,03
426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	0,07
443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	0,07
460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	0,03
477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	0,03
494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	1
511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	4
528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	15
545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	4
562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	1
1	2	6,5	6,5	1,5	1	2	6,5	9	30	30	30	30	30	30	20	50	

Höhe (mm)

Breite (mm)

Abb. 18: Vernetzung des Daches Abb. 17 zur numerischen Simulation

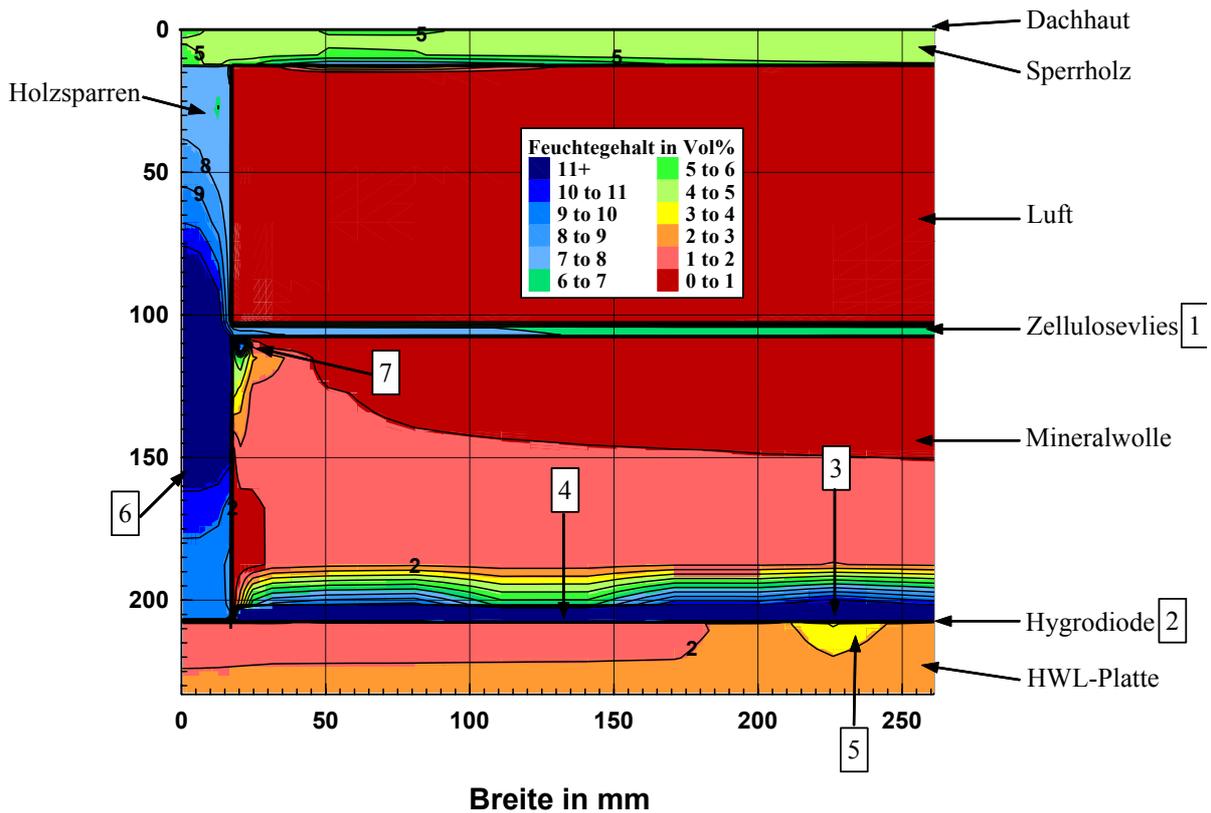


Abb. 19: 2D-Feuchtefeld in der Dachkonstruktion Abb. 17 im ersten Sommer (21. Juli 1990)

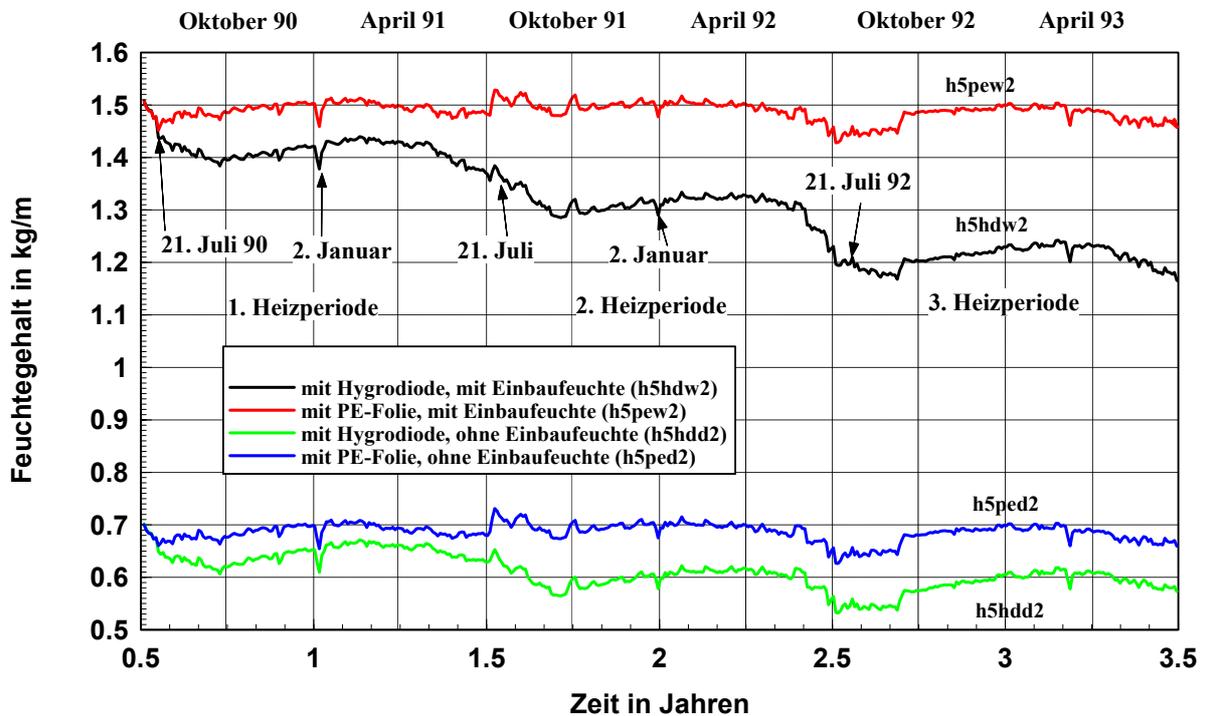


Abb. 20: Abnahme des Gesamtfeuchtegehaltes in kg/m über einen Zeitraum von 3 Jahren für die Fälle HDW, PEW, HDD und PED

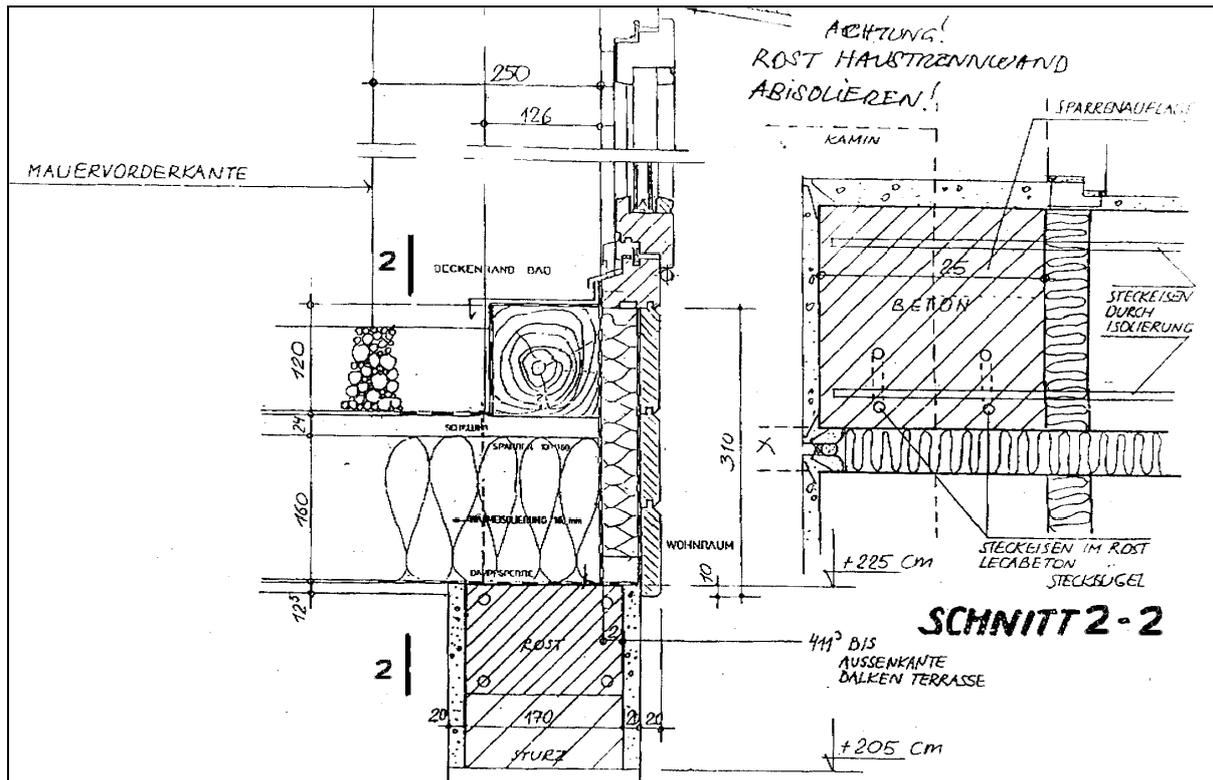


Abb. 21: Aufbau des Anschlusses des begrüntes Holzdaeches an die Außenwand mit Darstellung des Berechnungsgebietes (Schnitt 2 - 2)

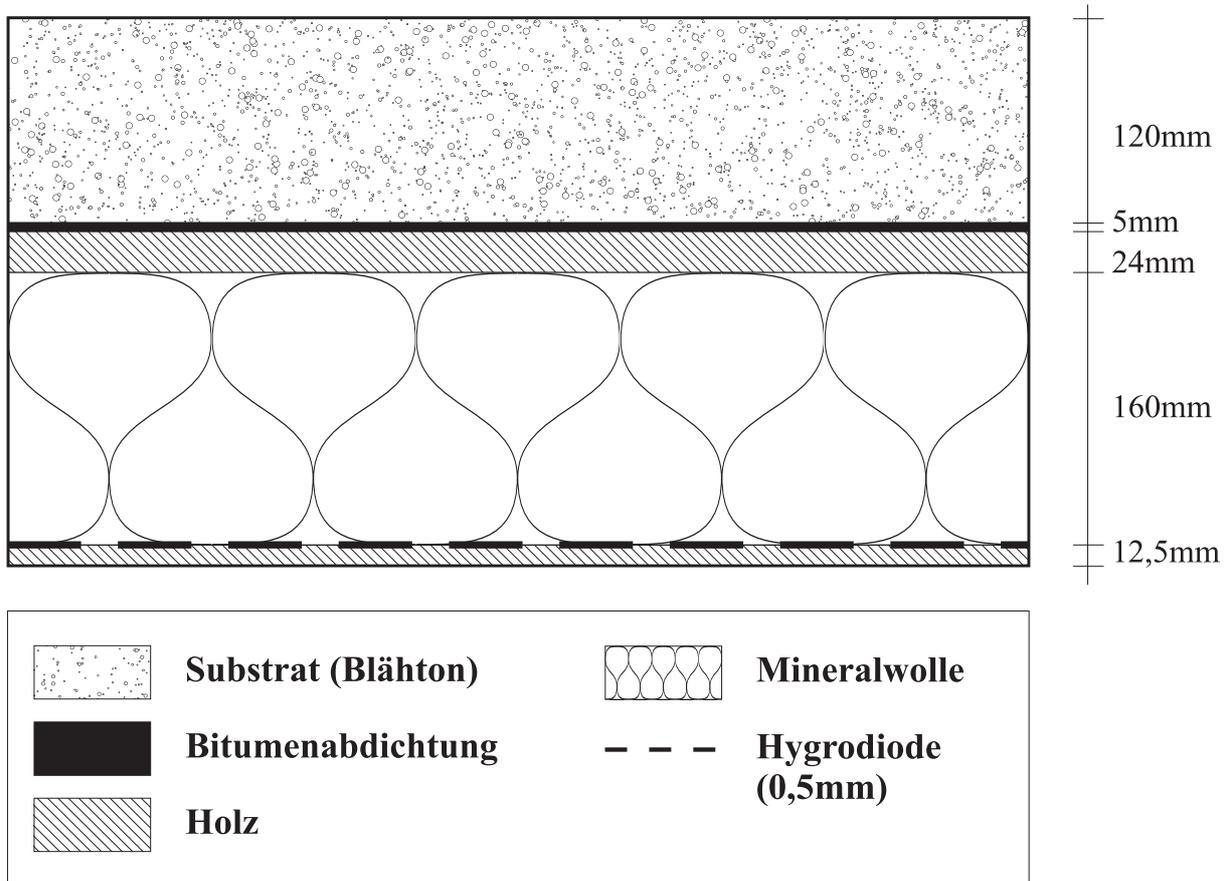


Abb. 22: Begrüntes Holzdaech mit Hygrodiode als Dampfsperre (siehe Abb. 21), Siedlung Braunau (Österreich)

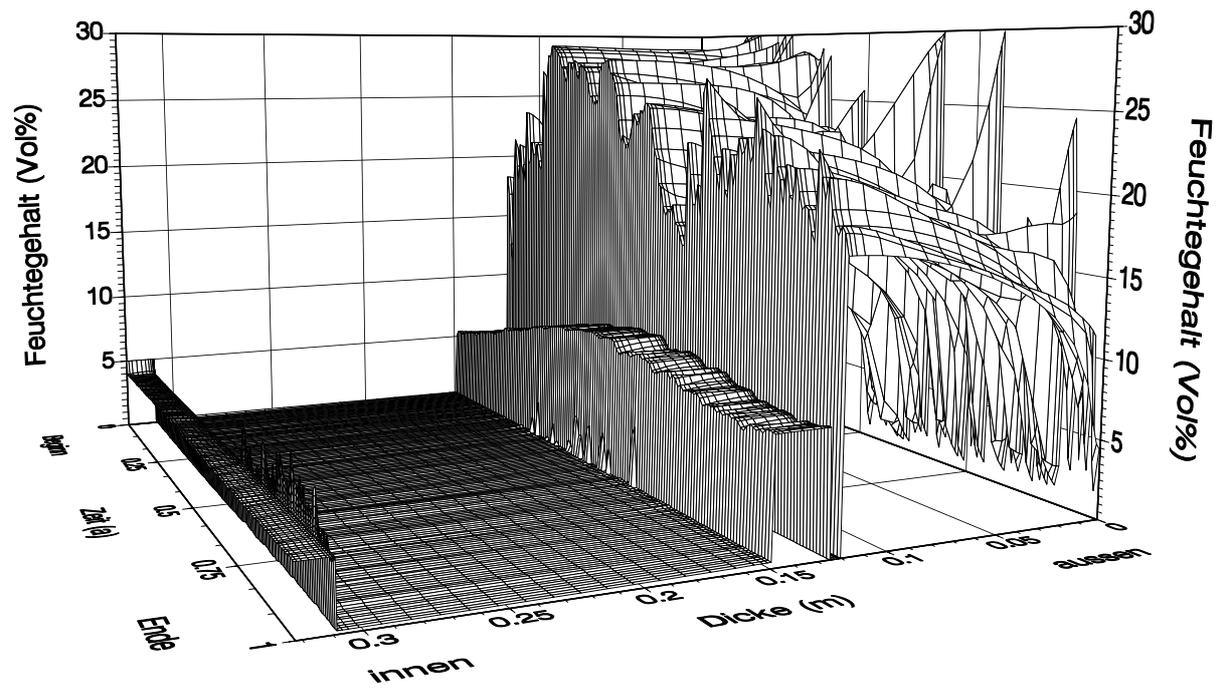


Abb. 23: Feuchtefeld im begrüntem Holzdach im Verlauf des ersten Jahres bei Belastung mit dem Testreferenzjahr Essen

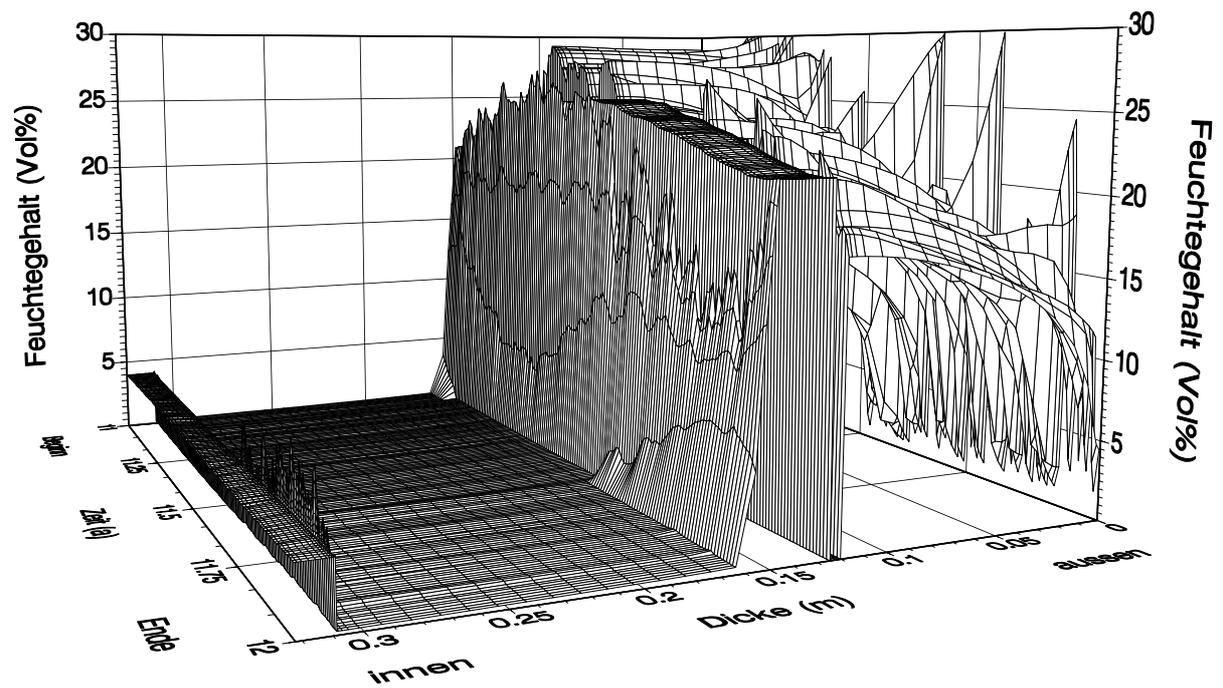


Abb. 24: Feuchtefeld im begrüntem Holzdach im Verlauf des ersten Jahres bei Belastung mit dem Testreferenzjahr Essen