

Diplomarbeit

zum Thema

Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile

von:

cand. ing.
Christian Seibt
Matrikelnummer 2898716

vorgelegt bei:

1. Prüfer:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann
Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Fachgebiet Baustoffe und Stahlbetonbau

2. Prüfer:
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer, HAWK Hildesheim

August 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	DIN-Normen und Regelwerke in der Bauwerksabdichtung	3
3	Wasserbeanspruchungen am Bauwerk.....	4
3.1	Definition der Lastfälle	4
3.1.1	Lastfall Bodenfeuchte bzw. nicht stauendes Sickerwasser nach DIN 18195-4	4
3.1.2	Lastfall nicht drückendes Wasser nach DIN 18195-4	5
3.1.3	Lastfall drückendes Wasser von außen nach DIN 18195-6.....	6
3.1.4	Lastfall drückendes Wasser von innen nach DIN 18195-7	6
3.1.5	Lastfall rückseitig einwirkendes Wasser	7
3.2	Ermittlung des Lastfalls.....	7
3.3	Bewertung des Wasserandranges nach DIN 18195.....	9
3.4	Weitere Belastungen auf das Bauwerk.....	9
3.5	Hydrogeologische Untersuchungen zur Ermittlung des Lastfalles.....	11
3.5.1	Vorerkundung	11
3.5.2	Baugrunduntersuchung.....	12
4	Nachträgliche Abdichtungsmaßnahmen	13
4.1	Sanierungskonzept	13
4.2	Anamnese.....	14
4.2.1	Bauwerksuntersuchungen vor Ort	14
4.2.2	Laboruntersuchungen	16
4.3	Diagnose.....	18
4.3.1	Abdichtungsunabhängige Feuchtigkeitseinflüsse	19
4.4	Therapie.....	20
4.5	Nachträgliche Außenabdichtung.....	20
4.5.1	Vorbereitung des Untergrundes.....	22
4.5.2	Abdichtungssysteme.....	23
4.5.3	Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen (KMB).....	25
4.5.4	Mineralische Dichtungsschlämme	28
4.5.5	Bitumendichtungsbahnen	30
4.5.6	Kaltselbstklebebahnen (KSK)	32
4.5.7	Kunststoffdichtungsbahnen.....	33
4.5.8	Flexible Dichtungsbahn.....	33
4.5.9	Bentonit.....	34
4.6	WU-Beton – Wasserdruckhaltende Innenwanne	35
4.7	Anschlüsse, Bewegungsfugen und Durchdringungen	36

4.8	Flankierende Maßnahmen	37
4.9	Nachträgliche Horizontalabdichtung	40
4.9.1	Mechanische Verfahren	41
4.9.2	Injektionsverfahren.....	44
4.10	Nachträgliche Innenabdichtung	49
4.10.1	Zementgebundene Abdichtungssysteme.....	49
4.10.2	Flächeninjektionen	50
4.11	Übersicht der Abdichtungsmaßnahmen.....	53
5	Physikalische Grundlagen des Feuchtedurchgangs durch Beton.....	54
5.1	Porosität des Betons	55
5.2	Selbsteilung des Betons	57
5.3	Feuchtespeicherung	59
5.4	Wassertransportmechanismen	63
5.5	Tatsächlicher, kombinierter Wassertransport	72
5.6	Zuordnung der Transportvorgänge zu den Lastfällen.....	74
6	Untersuchung der Feuchttransportvorgänge durch erdberührte Bauteile.....	75
6.1	Vorgehensweise	75
6.2	Problematik der Stoffkennwerte und der Modellbetrachtungen	76
6.3	Grundlagen der Arbeitsweise von WUFI.....	77
6.3.1	Wahl des numerischen Gitters.....	79
6.3.2	Wahl des Zeitschritts.....	79
6.3.3	Validierung des Programms mit Messdaten	80
6.4	Berechnung einer Betonaußenwand – WUFI	82
6.4.1	Berechnung einer Betonaußenwand ($s_d = 2,5$ m) – WUFI.....	85
6.4.2	Berechnung einer Betonaußenwand ($s_d = 160$ m) – WUFI.....	87
6.5	Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk – WUFI.....	89
6.5.1	Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk ($s_d = 2,5$ m) – WUFI	91
6.5.2	Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk ($s_d = 160$ m) – WUFI	92
6.6	Zusammenfassung der Ergebnisse – WUFI	94
6.7	Grundlagen der Arbeitsweise von Delphin.....	95
6.7.1	Wahl des numerischen Gitters.....	95
6.7.2	Validierung des Programms mit Messdaten	96
6.8	Berechnung einer Betonaußenwand – Delphin	97
6.8.1	Berechnung einer Betonaußenwand ($s_d = 2,5$ m) – Delphin.....	100
6.8.2	Berechnung einer Betonaußenwand ($s_d = 160$ m) – Delphin.....	102
6.8.3	Auswirkungen der Druckhöhe – Delphin.....	104

6.9	Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk – Delphin.....	105
6.9.1	Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk ($s_d = 2,5$ m) – Delphin.....	107
6.9.2	Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk ($s_d = 160$ m) – Delphin.....	108
6.10	Zusammenfassung der Ergebnisse – Delphin.....	109
6.11	Berechnung des Wassertransportes nach Kießl.....	110
6.12	Alternative Berechnungsvariante einer Außenwand – WUFI und Delphin.....	112
6.12.1	Durchführung der Berechnung.....	113
6.13	Alternative Berechnungsvariante einer Außenwand – Lohmeyer.....	116
6.14	Bewertung der Ergebnisse.....	117
7	Möglichkeiten und Grenzen von erdberührten Bauteilen bei höherwertiger Nutzung.....	121
7.1	Problematik der höherwertigen Nutzung von Weißen Wannern.....	121
7.1.2	Sanierung von Rissen.....	122
7.2	Innenseitige Beschichtung.....	124
7.2.1	Versuchsdurchführung zur Permeabilität einer Weißen Wanne.....	124
7.2.2	Interpretation der Versuchsergebnisse.....	125
7.2.3	Behinderung der freien Durchströmung.....	126
7.3	Auswirkungen des Feuchteintrags in den Raum – Feuchtebilanz.....	129
7.4	Aufständigung.....	131
7.5	Praktische Untersuchungen.....	132
7.6	Höherwertige Nutzung von Weißen Wannern.....	134
8	Zusammenfassung.....	136
9	Literaturverzeichnis.....	139
9.1	Normen, Richtlinien und Merkblätter.....	139
9.2	Literatur.....	141
9.3	PC-Programme.....	148
10	Befragte Personen.....	149
11	Eidesstattliche Erklärung.....	150

Abkürzungsverzeichnis

AlBau	Aachener Institut für Bauschadensforschung
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DK	Dielektrizitätskonstante
ECB	Ethylencopolymerisat-Bitumen
EnEV	Energiesparverordnung
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
EVA	Ethylen-Vinylacetat-Terpolymer
KMB	Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtung
KN	Knudsenzahl
KSK	Kaltselbstklebende Bitumen-Dichtungsbahnen
NABau	Normenausschuss Bauwesen
WTA	Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege
WU-Beton	Wasserundurchlässiger Beton
A [$\text{kg}/\text{m}^2 \sqrt{\text{s}}$]	Wasseraufnahmekoeffizient
c [g/cm^3]	Konzentration des Wasserdampfes
d [m]	Bauteildicke/Durchmesser des Rohres
d_D [m]	Bauteildicke, in der die Diffusion nach innen stattfindet
d_A [mm]	austrocknende Bauteildicke
dp [Pa]	Druckdifferenz
dx [m]	Länge des Rohres
D [cm^2/s]	Diffusionskoeffizient
D_{hygr} [M.-%]	Durchfeuchtungsgrad hygroscopisch
D_{kap} [M.-%]	Durchfeuchtungsgrad kapillar
D_w [m^2/s]	Flüssigtransportkoeffizient
D_{ws} [m^2/s]	Flüssigkeitstransportkoeffizient für den Saugvorgang
f_A [%]	Ausgleichsfeuchte des Betons
FC [g/md]	Hygrischer Feuchteleitkoeffizient
FP [$\text{g}/\text{m}^2\text{d}$]	Gesamtdruckbezogener Feuchteleitkoeffizient
FT [$\text{g}/\text{m.d.K.}$]	Thermischer Feuchteleitkoeffizient
g [m/s^2]	Erdbeschleunigung
g_w [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]	Flüssigtransportstromdichte
G_F [g]	Ausgangsgewicht (feuchte Probe)
$G_{F,\text{klima}}$ [g]	Gewicht nach Klimaschranklagerung

G_s [g]	Sättigungsgewicht
G_T [g]	Trockengewicht (getrocknete Probe)
h [m]	Steighöhe
H [m]	Wassersäule
H_{max} [m]	maximale Steighöhe
i [-]	hydraulisches Gefälle
J [g/cm ² s]	Wasserdampfdiffusionsstromdichte
I [kg/h]	Massenstrom
k [m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
m [kg/m ²]	aufgenommene Wassermenge
m_s [g/m ³]	max. Wassergehalt der Luft
n [1/h]	Luftwechselzahl
$p_{a/i}$ [Pa]	Wasserdampf-sättigungsdruck außen bzw. innen
$p_{sa/si}$ [Pa]	Wasserdampfpartialdruck außen bzw. innen
P [%]	Porosität
P_K [Pa]	kapillarer Unterdruck
Q [m ³ /s]	Durchflussmenge
Q_v [g/m ² d]	von der Luft aufnehmbare Feuchtigkeitsmenge
r [m]	Kapillarradius
R_D [J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
s [m]	Schichtdicke
s_A [m]	Austrocknungstiefe
s_d [m]	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke
t [h]	Zeit
T [K]	Temperatur
v [m/s]	Filtergeschwindigkeit
V [m ³ /m ²]	auf die Außenwandfläche bezogenes Raumvolumen
w [g/cm ³]	Wassergehalt
w_f [kg/m ³]	freie Wassersättigung
w/z [-]	Wasserzementwert
W_1 [kg/m ² h ^{0.5}]	Wasseraufnahmekoeffizient
W_2 [m/h ^{0.5}]	Wassereindringkoeffizient
$W_{hyg.}$ [M.-%]	hygroskopische Ausgleichsfeuchte
W_s [M.-%]	Sättigungswert
W_{vorh} [M.-%]	Wassergehalt/Feuchtigkeitsgehalt im Baustoff
x [m]	Wegkoordinate

Δc [%]	Wassergehaltsdifferenz in den Bauteiloberflächen
Δh [m]	Gesamtdruckunterschied [Wassersäule]
Δh_w [m]	Unterschied in der Wasserhöhe
Δl [m]	Fließweg
$\Delta \vartheta$ [K]	Temperaturdifferenz der Bauteiloberflächen [K]
φ [%]	rel. Luftfeuchtigkeit
λ	mittlere freie Weglänge eines Moleküls
μ [-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
ν [m ² /s]	kinematischer Viskositätskoeffizient
η [Pa × s]	dynamischer Viskositätskoeffizient
ρ_w [kg/m ³]	Rohdichte Wasser
σ [N/m]	Oberflächenspannung des Wasser
τ [N/mm ²]	Scherspannung

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1: Wasserbelastung [Schomburg (1998), S. 26]	5
Abb. 3.2: Wasserbeanspruchung erdberührter Bauteile, DIN 18195-4 [Deutsche Bauchemie (2002)]	5
Abb. 3.3: Wasserbeanspruchung erdberührter Bauteile, DIN 18195-6 [Deutsche Bauchemie (2002)]	6
Abb. 3.4: LF Wasser von innen und rückseitig [Deutsche Bauchemie (2002)].....	7
Abb. 3.5: Lastfälle nach DIN 18195 für Wand/Bodenplatte [Deitermann (o.J.)]	8
Abb. 3.6: Lastfälle im Wohnungsbau [Heinze Marktforschung (1998)].....	9
Abb. 4.1: Schadhafte Abdichtungen [Bonk (2001), S. 382]	14
Abb. 4.2: Anteil Abdichtungsmaterialien Wohnungsbau, LF Bodenfeuchtigkeit [Heinze Marktforschung (1998)].....	21
Abb. 4.3: Anteil Abdichtungsmaterialien Wohnungsbau, LF stauendes Sickerwasser [Heinze Marktforschung (1998)].....	21
Abb. 4.4: Anteil Abdichtungsmaterialien Wohnungsbau, LF drückendes Wasser [Heinze Marktforschung (1998)].....	21
Abb. 4.5: Marktanteile Abdichtungsverfahren [Heinze Marktforschung (1998)]	24
Abb. 4.6: Nachträgliche KMB-Beschichtung, LF nicht drückendes Wasser [WTA (1998), S. 5]	26
Abb. 4.7: Skizze Innentrog aus WU-Beton [Bonk (2001), S. 416, modifiziert].....	36
Abb. 4.8: Fugenband [Frössel (2001), S. 242].....	36

Abb. 4.9: Rohrdurchführung, links: LF nicht drückendes Wasser, rechts: LF drückendes Wasser [Frössel (2001), S. 228]	37
Abb. 4.10: Dränage, links: mit mineralischer Dränschicht, rechts: mit Dränelementen [Cziesielski (2001), S. 96]	38
Abb. 4.11: Kontrollschacht [Frössel (2001), S. 265]	38
Abb. 4.12: Marktanteile nachträglicher Horizontalsperren [Frössel (2001), S. 138]	40
Abb. 4.13: Mauersägeverfahren, links: manuell, rechts: fahrbar [Frössel (2001), S. 128 ff.]	42
Abb. 4.14: Chromstahlblech im Mauerwerk [Frössel (2001), S. 132]	42
Abb. 4.15: links: Ausbohren einer Bohrlochreihe, rechts: Verschluss mit Dichtmörtel [Frössel (2001), S. 127]	43
Abb. 4.16: Marktanteile mechanische Horizontalsperren [Frössel (2001), S. 128]	44
Abb. 4.17: Wirkprinzipien von Injektionsstoffen [Reul (2001), S. 184]	45
Abb. 4.18: Horizontale Injektionssperre [Warnecke (2002), S. 57]	46
Abb. 4.19: Bohrlochanordnung, links: drucklose Injektion, rechts: Druckinjektion [Kabrede (2003), S. 87 ff.]	48
Abb. 4.20: Durchstoßen der mineralischen Vorinjektion [Kabrede (2003), S. 83]	48
Abb. 4.21: links: Innenabdichtung mit Dichtungsschlämme, rechts: Mauerwerkstrennung [WTA (1998)]	50
Abb. 4.22: Bildung eines Gelschleiers [Haack (2003), S. 335]	51
Abb. 4.23: Flächeninjektion, links: im Bauteil, rechts: im Baugrund [WTA (1998)]	52
Abb. 5.1: Wasserdurchlässigkeit des Zementsteins bei unterschiedlicher Kapillarporosität, abhängig vom w/z-Wert und vom Hydratationsgrad (nach T. C. Powers) [Lohmeyer (1993), S. 21]	57
Abb. 5.2: Feuchtespeicherfunktion bzw. Wassergehaltsbereich eines hygroskopisch kapillaraktiven Baustoffes [Künzel (1994), S. 8 ; Klopfer (2002), S. 344]	60
Abb. 5.3: Sorptionsisotherme eines hygroskopischen porösen Baustoffes [Krus (1995), S. 8]	60
Abb. 5.4: Übersicht der Feuchtetransportphänomene [Kießl (1983), Anhang, modifiziert]	63
Abb. 5.5: Diffusionsvorgänge [Klopfer (2002), S. 354]	68
Abb. 5.6: links: Kapillar-Depression, rechts: Kapillar-Aszension [Klopfer (1974), S. 46] ..	68
Abb. 5.7: Oberflächenspannung [Kabrede (2003), S. 27]	69
Abb. 5.8: tatsächlicher Wassertransport [Budelmann (2004), S.10]	73
Abb. 6.1: Feuchtespeicherfunktion	81
Abb. 6.2: Feuchtestrom innen WU-Beton, WUFI	84
Abb. 6.3: Feuchtefront WU-Beton nach 128 d, WUFI	84

Abb. 6.4: Feuchtefront WU-Beton nach 3 a, WUFI.....	84
Abb. 6.5: Feuchtestrom innen WU-Beton ($s_d = 2,5$ m), WUFI	86
Abb. 6.6: Feuchtefront WU-Beton ($s_d = 2,5$ m) nach 115 d, WUFI	86
Abb. 6.7: Feuchtefront WU-Beton ($s_d = 2,5$ m) nach 5 a, WUFI	86
Abb. 6.8: Feuchtestrom innen WU-Beton ($s_d = 160$ m), WUFI	87
Abb. 6.9: Feuchtefront WU-Beton ($s_d = 160$ m) nach 109 d, WUFI	88
Abb. 6.10: Feuchtefront WU-Beton ($s_d = 160$ m) nach 5 a, WUFI	88
Abb. 6.11: Feuchtestrom innen MW, WUFI	90
Abb. 6.12: Feuchtefront MW nach 14 d, WUFI.....	90
Abb. 6.13: Feuchtefront MW nach 1 a, WUFI.....	90
Abb. 6.14: Feuchtestrom innen MW ($s_d = 2,5$ m), WUFI	91
Abb. 6.15: Feuchtefront MW ($s_d = 2,5$ m) nach 18 d, WUFI	92
Abb. 6.16: Feuchtefront MW ($s_d = 2,5$ m) nach 1 a, WUFI	92
Abb. 6.17: Feuchtestrom innen MW ($s_d = 160$ m), WUFI	93
Abb. 6.18: Feuchtefront MW ($s_d = 160$ m) nach 15 d, WUFI	93
Abb. 6.19: Feuchtefront MW ($s_d = 160$ m) nach 1 a, WUFI	93
Abb. 6.20: Feuchtestrom WU-Beton, WUFI.....	94
Abb. 6.21: Feuchtestrom MW, WUFI.....	94
Abb. 6.22: Feuchtestrom WU-Beton, Delphin.....	99
Abb. 6.23: Feuchtefront WU-Beton, Delphin	100
Abb. 6.24: Feuchtestrom WU-Beton ($s_d = 2,5$ m), Delphin	101
Abb. 6.25: Feuchtefront WU-Beton ($s_d = 2,5$ m), Delphin.....	102
Abb. 6.26: Feuchtestrom WU-Beton ($s_d = 160$ m), Delphin	103
Abb. 6.27: Feuchtefront WU-Beton ($s_d = 160$ m), Delphin.....	103
Abb. 6.28: Auswirkungen der Druckhöhe auf den Feuchtestrom, Delphin	104
Abb. 6.29: Feuchtestrom MW, Delphin.....	106
Abb. 6.30: Feuchtefront MW, Delphin.....	106
Abb. 6.31: Feuchtestrom MW ($s_d = 2,5$ m), Delphin	107
Abb. 6.32: Feuchtefront MW ($s_d = 2,5$ m), Delphin	107
Abb. 6.33: Feuchtefront MW ($s_d = 160$ m), Delphin	108
Abb. 6.34: Feuchtestrom MW ($s_d = 160$ m), Delphin	108
Abb. 6.35: Feuchtestrom WU-Beton, Delphin.....	109
Abb. 6.36: Feuchtestrom MW, Delphin.....	109
Abb. 6.37: Betonprobekörper, Oberseite trocken, links: im Fußbad, rechts: unten abgedichtet [Beddoe (2004), S. 94]	112
Abb. 6.38: Arbeitsmodell nach Beddoe/Springenschmid [Alfes (2005)]	113
Abb. 6.39: Feuchtestrom innen WU-Beton, WUFI und Delphin.....	114

Abb. 6.40: Feuchtefront WU-Beton, links: Endzustand nach 5 a, rechts: Anfangs- und Endzustand, WUFI.....	115
Abb. 6.41: Feuchtefront WU-Beton nach 5 a, Delphin.....	115
Abb. 6.42: Vergleich Feuchtestrom WUFI und Delphin nach 3 a	118
Abb. 7.1: Versuchsaufbau zur Messung der Permeabilität.....	124
Abb. 7.2: Newton´sches Fließgesetz, Scherströmung [Klopfer (2002), S. 378]	127
Abb. 7.3: Aufgeständerter Boden [Cziesielski (1997), S. 707].....	131
Abb. 7.4: Aufgeständerter Fußboden [Cziesielski (1995), S. 145].....	131
Abb. 7.5: links: Objekt 1 – Hobbyraum, rechts: Objekt 2 – Gästeschlafzimmer [Oswald (2004)].....	132
Abb. 7.6: Objekt 3 – Gästeschlafzimmer [Oswald (2004)].....	133
Abb. 7.7: Weiße Wanne ohne Beschichtung	134
Abb. 7.8: Weiße Wanne mit Außendämmung	134
Abb. 7.9: Bodenaufbau mit PE-Folie und Dämmung [Oswald (2004)]	135

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Normen und Regelwerke der Bauwerksabdichtung.....	3
Tabelle 4.1: Injektionsmittel und Wirkungsprinzip.....	46
Tabelle 4.2: Abdichtungsmaßnahmen abhängig von der Wasserbeanspruchung [WTA (E 4-6-03/D)]	53
Tabelle 5.1: Rechnerische Rissbreiten für die Selbstheilung [Lohmeyer (1995), S. 193]..	57
Tabelle 6.1: Stoffkennwerte WU-Beton, WUFI	83
Tabelle 6.2: Stoffkennwerte Kalksandsteinmauerwerk, WUFI.....	89
Tabelle 6.3: Stoffkennwerte WU-Beton, Delphin	98
Tabelle 6.4: Stoffkennwerte Kalksandsteinmauerwerk, Delphin.....	105
Tabelle 6.5: Zusammenfassung der Ergebnisse	119
Tabelle 7.1: Haftzugfestigkeiten von bituminösen Klebern [Pittsburgh Corning GmbH]..	128

1 Einleitung

In der Bauwerkserhaltung und Instandsetzung nehmen nicht vorhandene oder beschädigte Abdichtungen einen erheblichen Anteil bei der Schadensanalyse eines bestehenden Gebäudes ein. Deshalb bildet eine nachträgliche Abdichtung oft die einzige Möglichkeit, feuchte und geschädigte Bauteile wieder in einen funktionalen Zustand zu versetzen.

In der vorliegenden Diplomarbeit werden die Möglichkeiten und Grenzen der nachträglichen Abdichtung erdberührter Bauteile aufgezeigt. Damit verbunden wird die Fragestellung, inwieweit eine höherwertige Nutzung von Räumen im erdberührten Bereich möglich ist, insbesondere, wenn es um eine Umnutzung von Bauwerken geht, die als Weiße Wannen ausgeführt worden sind.

Einleitend wird zunächst ein Überblick über die bestehenden Regelwerke und Richtlinien gegeben, auf die in der Praxis im Fall einer Schadenssanierung zurückgegriffen werden kann. Die Einschränkungen, die sich aus den vorliegenden Schriften hinsichtlich einer nachträglichen Abdichtung ergeben, werden erläutert.

Zudem werden die einzelnen Lastfälle vorgestellt, die im Erdreich auf das Bauwerk einwirken. Die Beurteilung der Beanspruchung, die sich aus den Bodenverhältnissen und dem anstehenden Wasser ergibt, bildet die Grundlage für die richtige Wahl der Abdichtung. Somit stellt eine realitätsnahe Einschätzung der Belastung auf ein erdberührtes Bauteil eine unabdingbare Voraussetzung dar.

Darauf aufbauend wird der Stand der Technik in der nachträglichen Bauwerksabdichtung beschrieben. Es werden die unterschiedlichen Varianten einer nachträglichen Vertikalabdichtung sowohl auf der wasserzugewandten Seite als auch auf der Negativseite als Innenabdichtung behandelt. Ebenso werden die Maßnahmen der zumeist notwendigen Horizontalabdichtungen miteinander verglichen. Da die Sohlplatte grundsätzlich eher selten von Feuchteschäden betroffen ist, werden die Maßnahmen hierfür nur am Rand erwähnt, zumal die grundsätzliche Vorgehensweise der einer nachträglichen Wandabdichtung ähnelt. Eine besondere Problematik ergibt sich diesbezüglich allerdings bei der Umnutzung von Weißen Wannen, worauf im Zuge dieser Arbeit eingegangen werden soll.

Im Einzelnen werden die eingesetzten Materialien und Verfahren beschrieben und auf ihre Einsatzmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen hin untersucht.

Für die Möglichkeiten von hochwertig genutzten Bauwerken aus wasserundurchlässigem Beton (Weiße Wanne) im erdberührten Bereich werden zunächst die physikalischen Grundlagen des Feuchtedurchgangs durch Betonbauwerke beschrieben, wobei die unterschiedlichen Feuchtespeicher- und Transportphänomene im Beton dargelegt werden. Dabei sollen die Ursachen aufgezeigt werden, die dazu führen, dass Beton überhaupt

Feuchtigkeit sowohl in flüssiger als auch in gasförmiger Form transportiert. Die Tatsache, dass ein WU-Beton wasserundurchlässig, aber nicht wasserdicht ist, ist von entscheidender Bedeutung für eine nachträgliche Umnutzung von Weißen Wannen. Die statischen und konstruktiven Besonderheiten einer Weißen Wanne werden nicht näher erläutert, da diese keinen direkten Einfluss auf die zu behandelnde Thematik haben.

Um die Feuchteströme und insbesondere den daraus resultierenden Feuchteeintrag in die Räume zu untersuchen, werden die Simulationsprogramme WUFI und Delphin angewandt, die der Berechnung des instationären Wärme- und Feuchtetransportes dienen. Ersteres wurde vom Fraunhofer Institut für Bauphysik entwickelt, Letzteres entstand am Institut für Bauklimatik an der Technischen Universität Dresden. Da die Phänomene des Feuchtetransportes noch nicht hinreichend geklärt sind und in der Fachwelt kontrovers diskutiert werden, wird bei den Berechnungen von zwei Ansätzen ausgegangen, die einen erheblichen Unterschied im Feuchteeintrag in den Raum zur Folge haben.

Darüber hinaus sollen die Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen der beiden Programme in Bezug auf die Berechnung des Feuchtedurchgangs bei erdberührten Bauteilen aufgezeigt werden. Zusätzlich werden entsprechend der Ansätze zwei vereinfachte Berechnungsweisen vorgestellt, mit denen sich der Feuchtestrom ebenfalls abschätzen lässt.

Neben der Untersuchung einer Betonaußenwand soll vergleichend der Feuchtetransport durch ein Mauerwerk simuliert werden, wobei die Bauteile jeweils mit einer mehr oder weniger diffusionsoffenen Beschichtung beaufschlagt werden. Dadurch wird der verminderte Feuchteeintrag in den Raum deutlich. Außerdem werden unter anderem Versuche aufgenommen, die an der ETH Zürich durchgeführt wurden, um zu diskutieren, ob sich hinter einer Negativabdichtung womöglich ein auf der Außenseite anstehender hydrostatischer Druck durch Grundwasser hinter einer Innenbeschichtung aufbaut.

Aus den Ergebnissen der Berechnungen und der Versuche werden abschließend Möglichkeiten und Probleme aufgezeigt, die sich bei einer angestrebten höherwertigen Nutzung von Weißen Wannen ergeben.

2 DIN-Normen und Regelwerke in der Bauwerksabdichtung

Für die Planung und Ausführung von Bauwerksabdichtungen erdberührter Bauteile stehen einige Normen, technische Regelwerke, Richtlinien und Merkblätter zur Verfügung. Eine Übersicht der wesentlichen Schriften ist der Tabelle 2.1 zu entnehmen, wobei der Inhalt jeweils nur gekürzt wiedergegeben ist.

Bezeichnung	Herausgeber
DIN 1961 "VOB – Teil B"	NABau
DIN 4095 "Baugrund, Dränung zum Schutz baulicher Anlagen"	NABau
DIN 18229 "VOB – Teil C"	NABau
DIN 18336 "VOB – Teil C"	NABau
DIN 18195 Teil 1-10 "Bauwerksabdichtungen"	NABau
Richtlinie für Bitumendickbeschichtung	Deutsche Bauchemie
Richtlinie für flexible Dichtungsschlämme	Deutsche Bauchemie
Richtlinie für mineralische Dichtungsschlämme	Deutsche Bauchemie
WTA-Merkblatt 4-6-98 "Nachträgliche Abdichtung erdberührter Bauteile"	WTA

Tabelle 2.1: Normen und Regelwerke der Bauwerksabdichtung

Für die spezielle Anwendung in der nachträglichen Abdichtung erdberührter Bauteile existieren allerdings keine Normen. Somit müssen die an einem Sanierungskonzept beteiligten Sachkundigen auf die bestehenden Regelwerke und Richtlinien zurückgreifen. Grundsätzlich basiert die Ausführung von Bauwerksabdichtungen auf der DIN 18195 Teil 1 bis 10.

Im Hinblick auf die Bauwerkserhaltung und Instandsetzung wird allerdings auf die folgende Passage hingewiesen: "Diese Norm gilt nicht für [...] nachträgliche Abdichtungen in der Bauwerkserhaltung oder in der Baudenkmalpflege, es sei denn, es können hierfür Verfahren angewendet werden, die in dieser Norm beschrieben werden."¹

Es wird deutlich, dass im Bereich der Bauwerkserhaltung und in der nachträglichen Aufbringung einer Abdichtung auf alternative Richtlinien und Merkblätter zurückgegriffen werden muss. Eines dieser Schriften ist zum Beispiel das Merkblatt der WTA „Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile“, in dem sich durchaus wieder Verweise auf die DIN 18195 gerade in Bezug auf die Lastfälle, die Abdichtungsmaterialien und deren Verwendung befinden.

Im Literaturverzeichnis sind weitere Merkblätter der WTA aufgeführt, die bei einer nachträglichen Abdichtung ebenfalls eine gute Hilfestellung geben.

¹ DIN 18195 (2000), Teil 1

3 Wasserbeanspruchungen am Bauwerk

3.1 Definition der Lastfälle

Die Wahl der einzusetzenden Abdichtungsart ist im Wesentlichen von der Angriffsart des Wassers und von der Nutzung des Bauwerks abhängig. Des Weiteren ist die Feststellung der Bodenart (stark durchlässig oder wenig durchlässig), der Geländeform und des Bemessungswasserstandes am jeweiligen Gebäudestandort notwendig. Bei dem Bemessungswasserstand handelt es sich um den höchsten nach Möglichkeit aus einer langjährigen Beobachtung ermittelten Grundwasserstand bzw. Hochwasserstand.

Darüber hinaus müssen die thermischen und mechanischen Beanspruchungen, die auf das Bauteil einwirken, berücksichtigt werden.

Die DIN 18195 unterscheidet die drei aufgeführten Lastfälle, die im Folgenden näher beschrieben werden:²

- Bodenfeuchte
- nicht drückendes Wasser
- drückendes Wasser

3.1.1 Lastfall Bodenfeuchte bzw. nicht stauendes Sickerwasser nach DIN 18195-4

Bodenfeuchte

Die Bodenfeuchte (siehe Abbildung 3.2, links) stellt grundsätzlich den Lastfall mit der geringsten Beanspruchung dar und übt keinen hydrostatischen Druck auf das Bauteil aus.

Da mit einer solchen Einwirkung ständig zu rechnen ist, muss sie als Mindestbelastung immer angesetzt werden. Es handelt sich um im Erdreich vorhandenes, kapillar gebundenes Wasser. Dieses Saug-, Haft- und Kapillarwasser wird durch Kapillarkräfte auch entgegen der Schwerkraft fortgeleitet.

Nicht stauendes Sickerwasser (nicht bindiger Boden)

Eine der Bodenfeuchte vergleichbare Belastung ist das nicht stauende Sickerwasser in stark durchlässigen Böden (Durchlässigkeitsbeiwert $k > 10^{-4}$ m/s)³, welches durch Niederschläge verursacht wird.

² Vgl. Frössel (2001), S. 210 ff.

³ Vgl. NABau (2000), Teil 1

Voraussetzung für ein ausschließliches Ansetzen dieses Lastfalls ist, dass das Baugelände unter der Fundamentsohle sowie das Verfüllmaterial aus nicht bindigen Böden wie zum Beispiel Sand oder Kies bestehen. Es muss gewährleistet sein, dass das in tropfbar-flüssiger Form vorliegende Wasser von der Geländeoberkante bis zum Grundwasserstand absickern kann.

3.1.2 Lastfall nicht drückendes Wasser nach DIN 18195-4

Nicht stauendes Sickerwasser (bindiger Boden)

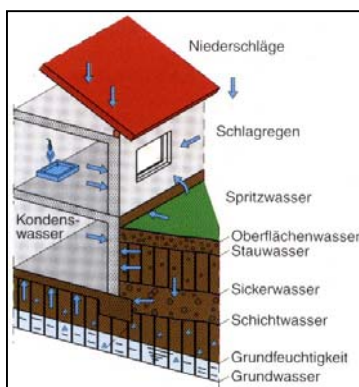


Abb. 3.1: Wasserbelastung
[Schomburg
(1998), S. 26]

Bei nicht drückendem Wasser handelt es sich um Oberflächen-, Sicker- oder Schichtwasser (siehe auch Abbildung 3.1), welche auf das Bauwerk keinen hydrostatischen Druck ausüben. Oberflächenwasser kann bei starken Niederschlägen und insbesondere bei Hanglagen auftreten.⁴

Das Schichtwasser tritt dort auf, wo in bindigen Böden Schichten mit wasserundurchlässigem Material eingelagert sind. An diesen Stellen fließt das Wasser ab und kann unter Umständen einen hydrostatischen Druck aufbauen.

Die DIN 18195 setzt den Lastfall des nicht stauenden Sickerwassers bei bindigen Böden (Durchlässigkeitsbeiwert

$k > 10^{-4} \text{ m/s}$)⁵ ebenfalls mit dem der Bodenfeuchtigkeit gleich (siehe Abbildung 3.2, rechts), allerdings nur unter der Voraussetzung, dass eine dauerhaft funktionsfähige Dränung nach DIN 4095 vorhanden ist. Dadurch wird ein sich aufbauender hydrostatischer Druck auf das Bauwerk verhindert.

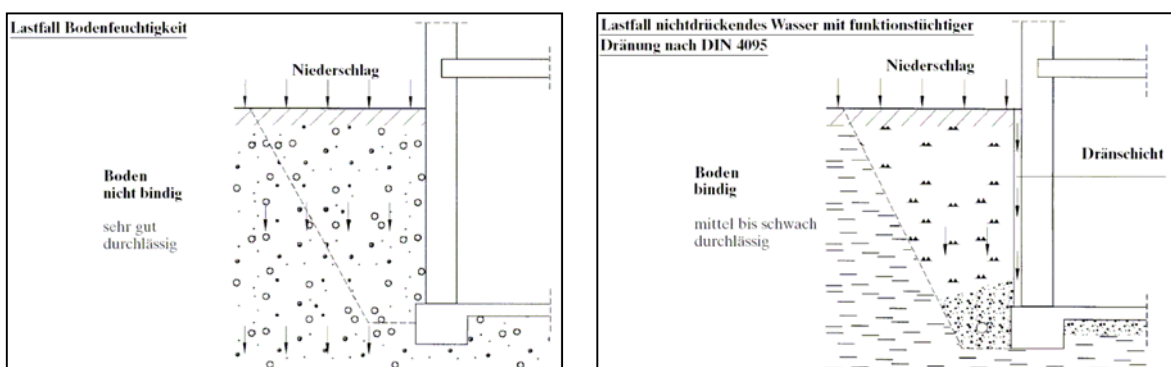


Abb. 3.2: Wasserbeanspruchung erdberührter Bauteile, DIN 18195-4
[Deutsche Bauchemie (2002)]

⁴ Vgl. Hilmer (2003), S. 1

⁵ Vgl. NABau (2000), Teil 1

3.1.3 Lastfall drückendes Wasser von außen nach DIN 18195-6

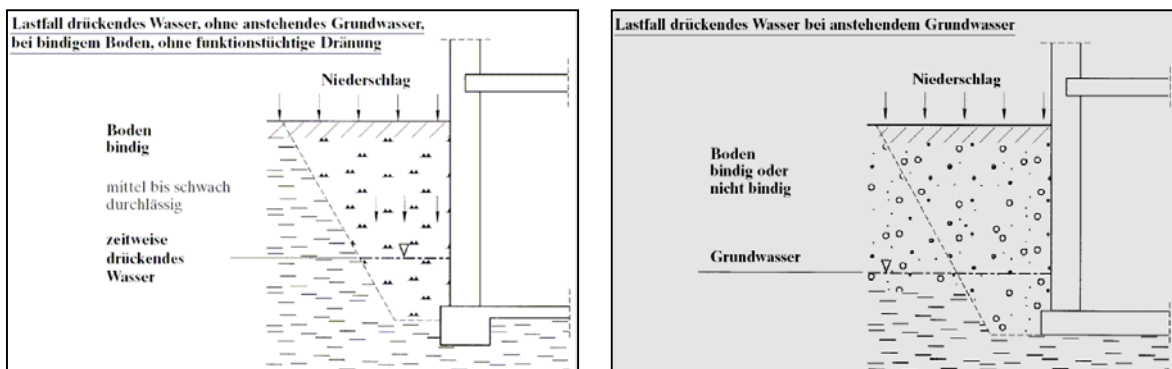
Stauendes Sickerwasser

Drückendes Wasser ist Stau-, Schichten- oder Oberflächenwasser. Um Stauwasser handelt es sich, wenn Sickerwasser auf eine wasserundurchlässige Schicht trifft und sich darüber aufstaut. Es wird ein dauerhafter hydrostatischer Druck erzeugt, sobald keine funktionstüchtige Dränung nach DIN 4095 vorhanden ist, um das Wasser abzuleiten (siehe Abbildung 3.3, links). Zudem darf die Eintauchtiefe des Schichtenwassers 3 m von der Oberkante des Fundaments aus nicht überschreiten.

Grundwasser

Wenn Grundwasser ansteht (siehe Abbildung 3.3, rechts), ist immer von drückendem Wasser auszugehen. Hierbei sind alle Hohlräume des Bodens ausgefüllt, wobei es sich sowohl um fließendes als auch um stehendes Wasser handeln kann. Es bildet sich über nahezu undurchlässigen Schichten, da sich dort das versickernde Wasser sammelt.

Es ist anzumerken, dass das Bauwerk mit mindestens 1,1facher Sicherheit gegen Auftrieb bemessen sein muss.⁶



**Abb. 3.3: Wasserbeanspruchung erdberührter Bauteile, DIN 18195-6
[Deutsche Bauchemie (2002)]**

3.1.4 Lastfall drückendes Wasser von innen nach DIN 18195-7

Die Norm beschreibt in Teil 7 die Beanspruchungen von Wasser, das von innen einen hydrostatischen Druck auf die Abdichtung ausübt wie zum Beispiel bei Trinkwasserbehältern, Wasserspeicherbecken und Schwimmbecken (siehe Abbildung 3.4). Auf diesen Aspekt wird hier nicht näher eingegangen.

⁶ Vgl. Pohl (1998), S.30

3.1.5 Lastfall rückseitig einwirkendes Wasser

Hierbei handelt es sich nicht um einen Lastfall im Sinne der DIN 18195 (siehe Abbildung 3.4). Rückseitig einwirkendes Wasser ist Wasser, das auf die Haftseite der Abdichtung wirkt. Es kann auf Grund von Niederschlägen, die sich während des Bauzustandes im Bauwerk sammeln, auftreten. Eine solche Belastung kann bei allen Lastfällen auftreten.

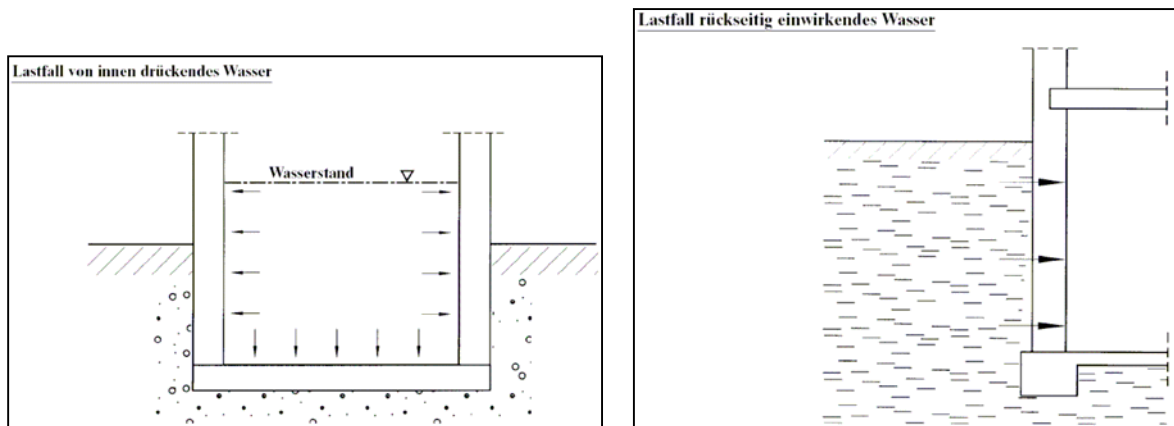


Abb. 3.4: LF Wasser von innen und rückseitig [Deutsche Bauchemie (2002)]

3.2 Ermittlung des Lastfalls

Das Flussdiagramm in Abbildung 3.5 zeigt in übersichtlicher Darstellung die Ermittlung des Lastfalles bei erdberührten Wänden und Bodenplatten nach DIN 18195.

Zunächst erfolgt die Ermittlung des Bemessungswasserstandes. Daraus ergibt sich abhängig von der Bodenart, der vorhandenen Dränung und der Eintauchtiefe der Belastungsfall, nach der die Abdichtung gewählt werden muss.

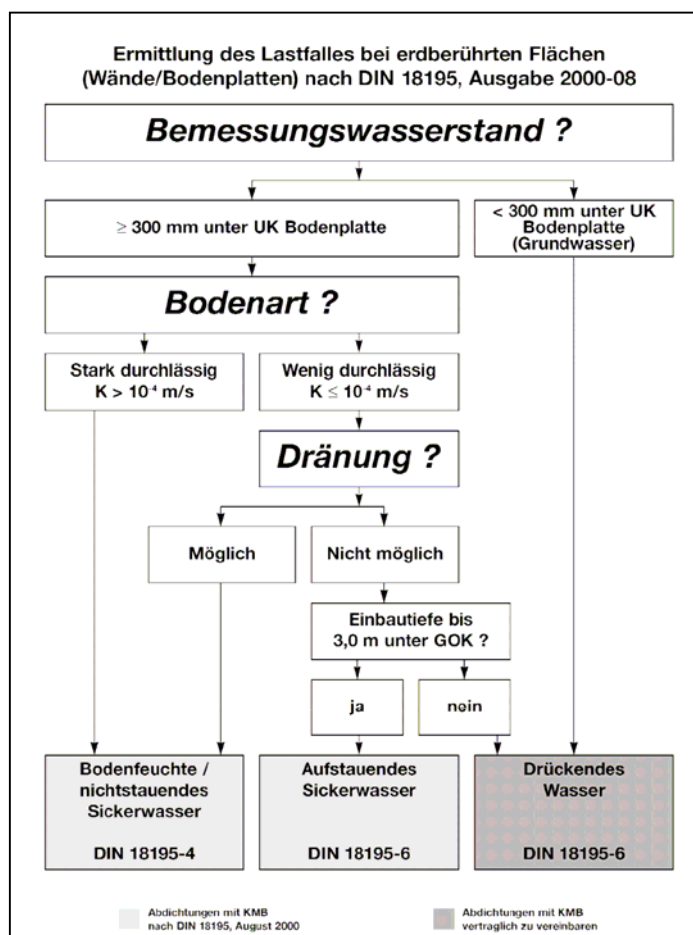


Abb. 3.5: Lastfälle nach DIN 18195 für Wand/Bodenplatte [Deitermann (o.J.)]

Die Abbildung 3.6 veranschaulicht die Lastfälle im Wohnungsbau, nach denen die Bauwerksabdichtung in der Regel geplant und ausgeführt wird. Die Angaben sind einer Marktbefragung der Heinze Marktforschung aus dem Jahr 1998 entnommen. Es muss allerdings beachtet werden, dass im Zuge der Überarbeitung der Teile 1-6 der DIN 18195 (2000-08) die Situation des nichtstauenden Sickerwassers (Abschnitt 3.1.2) dem Lastfall der Bodenfeuchte zugeordnet ist.

Die alte DIN 18195 (1983-08), auf die sich die Umfrageergebnisse noch beziehen, hat alle Lastfälle in bindigem Boden dem aufstauenden Sickerwasser zugeordnet, unabhängig davon, ob eine Dränung vorhanden war oder nicht. Dadurch dürfte sich mittlerweile der prozentuale Anteil des Lastfalles der Bodenfeuchtigkeit erheblich erhöht haben.

Die gleiche Einschränkung gilt jeweils für die anderen im weiteren Verlauf aufgeführten Statistiken, die der Heinze Marktforschung entnommen sind.

Aktuellere Marktanalysen zu der behandelten Thematik waren nicht aufzufinden.

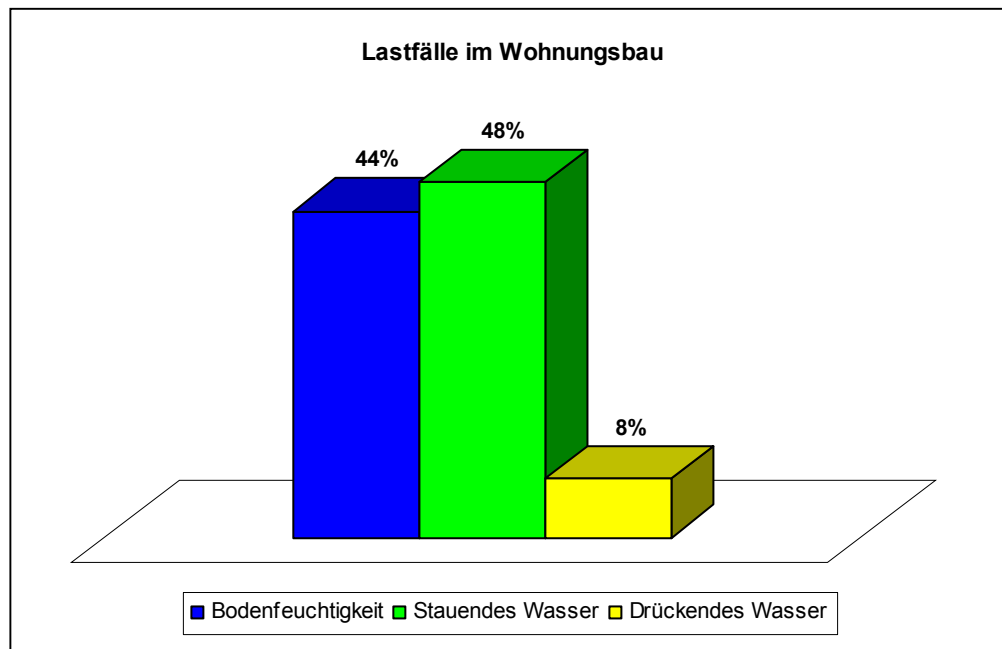


Abb. 3.6: Lastfälle im Wohnungsbau [Heinze Marktforschung (1998)]

3.3 Bewertung des Wasserandranges nach DIN 18195

Es stellt sich die Frage, ob es sinnvoll und gerechtfertigt ist, die beschriebenen Einwirkungen aus den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 zu einem Lastfall zusammenzufassen.

Werden die Ausführungen unter physikalischen Aspekten betrachtet, unterscheidet sich die Wasserbeanspruchung auf eine erdberührte Außenwand bei anstehendem nicht bindigem Boden über dem Grundwasserspiegel nicht von der Beanspruchung, die auf eine Wand in bindigem Boden unter Berücksichtigung einer Dränage einwirkt. In beiden Fällen läuft das Wasser ohne einen hydrostatischen Druck zu erzeugen an der Wandabdichtung vorbei und versickert entweder im Baugrund oder in der Dränage.

Eine höhere Beanspruchung ist lediglich dann zu erwarten, wenn die Dränage nicht funktionsfähig oder nicht ordnungsgemäß ausgeführt ist. Davon kann allerdings nicht ausgegangen werden, da die Drännorm DIN 4095 klare Konstruktionsregeln liefert und auf dem Markt eine große Anzahl von einfach einzubauenden Dränelementen erhältlich ist.⁷

3.4 Weitere Belastungen auf das Bauwerk

Zusätzlich müssen natürlich noch weitere in der DIN 18195 nicht berücksichtigte Lastfälle beachtet werden, für die größtenteils besondere Maßnahmen erforderlich sind.

Darunter fallen die im Folgenden angesprochenen Punkte.⁸

⁷ Vgl. Oswald (1998), S. 41

⁸ Vgl. WTA (1999), S. 20

Hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme

Die hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme erfolgt durch wasserlösliche Salze wie zum Beispiel Chloride, Nitrate oder Sulfate, jeweils in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit. Für die Entstehung und den Transport der Salze muss Wasser im Baustoff vorhanden sein.

Chloride können unter anderem über Spritzwasser, welches durch Streusalze belastet ist, in den Baustoff gelangen. Sulfate und Nitrate werden beispielsweise durch Sickerwasser aus schadhafte Abwasserleitungen an den Baustoff transportiert.

Ein weiterer Weg der hygroskopischen Wasseraufnahme ist die kapillar aufsteigende Feuchtigkeit, die durch einen Unterdruck in den Kapillarporen erzeugt wird.

Der hygroskopische Feuchtegehalt ist erreicht, sobald sich ein Gleichgewicht zwischen dem Feuchtegehalt der Luft und dem Feuchtegehalt des Baustoffs eingependelt hat. Dieser Zustand wird als Ausgleichs- oder Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet.

Durch eingelagerte leichtlösliche Salze im Baustoff steigt die Ausgleichsfeuchte stark an.

Tauwasser

Tauwasser fällt an bzw. aus, wenn die Taupunkttemperatur der umgebenden Luft auf der Bauteiloberfläche oder im Bauteil unterschritten wird.

Die Gefahr von Tauwasser ist besonders im Sommer in unbeheizten Kellern gegeben. Dies liegt darin begründet, dass die warme Außenluft absolut gesehen einen erheblich höheren Feuchtegehalt aufweist als die kühlere Kellerraumluft. Wenn nun die feuchte, warme Außenluft in die kühleren Räume gelangt, steigt die relative Luftfeuchtigkeit an und es kann an den Bauteiloberflächen zur Taupunkttemperaturunterschreitung und somit zur Tauwasserbildung kommen.

Havarieschäden und Belastungsänderungen

Diese können zum Beispiel entstehen durch Rohrbrüche, Rückstau von Abwässern, unwirksam gewordene Dränagen, Bergsenkungen, Wurzeldurchwuchs oder Veränderungen der Grundwasserverhältnisse.

Schädigende Bestandteile im Wasser

Hierzu zählen nach DIN 4030 unter anderem Mineralsäuren (Schwefel-, Salz- und Salpetersäure), Schwefeldioxid und Hydrogenchlorid.

3.5 Hydrogeologische Untersuchungen zur Ermittlung des Lastfalles

Als unbedingte Voraussetzung für die Planung der richtigen Abdichtungsmaßnahmen eines Bauwerks ist die Erkundung des Baugrunds und der Grundwasserverhältnisse nötig. Die DIN 4020 „Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke“ und die DIN 1054 „Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“ unterscheiden in Bezug auf den Schwierigkeitsgrad der Untersuchungen drei geotechnische Kategorien: (1) ein geringes, (2) ein normales und (3) ein hohes Risiko.⁹

Da es schwierig ist, die Wasserbeanspruchung auf ein Bauwerk festzustellen, sollte immer ein Baugrundsachverständiger an den Untersuchungen beteiligt sein.

Im Folgenden wird kurz die Vorgehensweise erläutert, die zu der richtigen Einschätzung der Bodenverhältnisse und dem damit verbundenen Lastfall führen soll.

3.5.1 Vorerkundung

Hierbei gilt es, bereits vorhandene Unterlagen zu sichten, um einen ersten Eindruck von den bestehenden Verhältnissen zu gewinnen. Einige Aspekte sind stichpunktartig aufgeführt.¹⁰

- Topographische Karten: Hiermit können Rückschlüsse auf die Größe, die Form und die Oberflächengestalt des Einzugsgebietes gezogen werden.
- Geologische Karten: Diese geben einen Anhalt über die zu erwartenden Bodenverhältnisse. Es kann bereits ein erster Hinweis auf den Umfang der Untersuchungen gegeben werden.
- Hydrogeologische Karten: Solche Karten sind selten vorhanden und oft unzuverlässig. Nach Möglichkeit sind langjährige Pegelmessungen zu Rate zu ziehen, die allerdings auch nicht in jeder Stadt zur Verfügung stehen.
- Oft können auch bereits vorhandene Baugrundgutachten oder Bohrprotokolle der Umgebung, etwa aus Kanalisationsmaßnahmen, dem Bauherren einen erheblichen Kostenvorteil bringen.
- Selbstverständlich muss immer eine Ortsbegehung stattfinden, um sich ein Bild des Standortes und der Umgebung machen zu können.

⁹ Vgl. Hilmer (2003), S. 8

¹⁰ Vgl. Smoltczyk (1990), S.46 ff.

3.5.2 Baugrunduntersuchung

Durch Schürfgruben, Bohrungen (siehe DIN 4021 und DIN 4022), Sondierungen (siehe DIN 4094) und Festigkeitsmessungen können die Art, Beschaffenheit, Ausdehnung, Lagerung und die Mächtigkeit der Bodeneigenschaften in situ festgestellt werden. Im Baugrundgutachten werden dann die Baugrundverhältnisse zusammenfassend dargestellt.

Ziel ist es auch, Aussagen über die Grundwasserverhältnisse (niedrigster, mittlerer und höchster Grundwasserstand) sowie über vorhandenes Stau- und Schichtenwasser zu erhalten und Bodenproben für Laborversuche zu gewinnen. Bei der Vorlage von Langzeitpegelmessungen sollten diese zur Beurteilung herangezogen werden. Ebenso ist es wichtig, in Feld- oder Laborversuchen die Durchlässigkeit der einzelnen Bodenschichten zu ermitteln (siehe DIN 18130).

Aus dem Flussdiagramm in Abbildung 3.5 ist ersichtlich, dass die Bestimmung des Lastfalles neben der Ermittlung des Grundwasserstandes im Wesentlichen von der Bodenart und dem damit verbundenen Durchlässigkeitsbeiwert abhängt.

Für die Feldversuche gibt das Beiblatt 1 zur DIN 4020 verschiedene Versuche zur Ermittlung der genannten Kenngröße vor.¹¹

Im Labor kann der Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s] entweder nach empirischen Formeln aus der Korngrößenverteilung oder nach der DIN 18130-1 ermittelt werden. Die Probenentnahme für die Laboruntersuchungen kann unter anderem in Schürfgruben erfolgen.

Durch Wasseranalysen muss auch die chemische Beschaffenheit des Wassers untersucht werden, um beispielsweise das Entstehen von Kalkablagerungen erkennen zu können. Hierfür beschreibt die DIN 4030 „Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase“ die Vorgehensweise.

Die genaue Beschreibung der Labor- und Feldversuche ist nicht Thema dieser Ausarbeitung, weshalb ausschließlich auf die genannten Normen verwiesen wird.

¹¹ Vgl. NABau (2003), S. 26 ff.

4 Nachträgliche Abdichtungsmaßnahmen

Grundsätzlich stehen in der nachträglichen Abdichtung von erdberührten Bauteilen unterschiedliche Verfahren und Materialien zur Verfügung.

Zum einen besteht die Möglichkeit einer Vertikalabdichtung. Diese kann sowohl außen als auch innen ausgeführt werden, wobei Letztere die weniger wirksamere Lösung darstellt und eine Außenabdichtung somit angestrebt werden sollte.¹² Die Entscheidung zugunsten einer Innenabdichtung ist meist im schwierigen Freilegen der Kellerwand von außen begründet. So können beispielsweise Probleme wegen eines angrenzenden Nachbargebäudes, dem Queren von Versorgungsleitungen oder einer Beeinträchtigung der Standsicherheit des Gebäudes auftreten.

Zum anderen kann eine nachträgliche Horizontalabdichtung eingesetzt werden, um das Bauwerk gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit zu schützen. Ziel muss es immer sein, die vertikale äußere Abdichtung an eine funktionsfähige Horizontalabdichtung anzuschließen, und somit eine wannenartige Umschließung des Bauteils zu erreichen.¹³

Im Weiteren werden verschiedene Abdichtungsstoffe und -verfahren näher beschrieben. Sie ergeben sich einerseits aus der DIN 18195. Diese gibt allerdings wie zu Beginn bereits erwähnt keine Hilfestellung bezüglich der Ausführung einer nachträglichen Abdichtung. Dienlich ist das Merkblatt der WTA zur nachträglichen Abdichtung erdberührter Bauteile, welches auf in der Praxis überwiegend eingesetzte Materialien verweist, die zum Teil in der DIN 18195 nicht berücksichtigt werden. Dazu zählen unter anderem die Verwendung von Dichtungsschlämmen und von WU-Beton.

4.1 Sanierungskonzept

Neben den in Abschnitt 3.5 beschriebenen Untersuchungen zur Beurteilung des Lastfalls müssen noch weitere Punkte berücksichtigt werden, die zu einem richtigen und vollständigem Abdichtungskonzept führen. Hierzu gehören die vollständige Erkundung des Bauteilzustands sowie ausführliche Bauwerks- und Laboruntersuchungen.

Ein vollständiges Sanierungs- bzw. Abdichtungskonzept lässt sich allgemein in drei Teilbereiche einteilen: Anamnese, Diagnose und Therapie.

¹² Vgl. Reul (2001), S. 188

¹³ Vgl. WTA (1999), S. 3

4.2 Anamnese

Hier werden alle Informationen über die Baugeschichte, das Bauegefüge und die Schäden gesammelt. Ziel ist es, besonders im Hinblick auf die Denkmalpflege, den Gebäudezustand möglichst umfassend zerstörungsfrei zu untersuchen.¹⁴ Es muss also festgestellt werden, um welche Schadensformen bzw. -bilder es sich handelt, das heißt, wo treten Feuchteschäden auf und wo gibt es eventuell Besonderheiten bezüglich des Ausmaßes oder des Verlaufes.

Zudem gilt es, Aussagen über den Aufbau des Regelquerschnitts und über die Standsicherheit zu erlangen. Ein wesentlicher Aspekt betrifft den Zustand und die Lage der vorhandenen Abdichtungen. Es muss ermittelt werden, um welches Material es sich handelt und ob beispielsweise eine funktionsfähige Horizontalsperre vorhanden ist.

Ebenso muss das Vorhandensein einer funktionsfähigen Drainage geklärt werden.

4.2.1 Bauwerksuntersuchungen vor Ort

Bevor die in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen aufwendigeren Laboruntersuchungen durchgeführt werden, sollte zunächst festgestellt werden, ob es sich ausschließlich um örtlich begrenzte Fehlstellen in der Abdichtung, eine schlechte Ausführung der Durchdringungen oder um mangelnde Abdichtungsübergänge zwischen den Außenwänden und der Betonsohle handelt (siehe Abbildung 4.1). Dadurch können Aufgrabungsarbeiten auf bestimmte Bereiche beschränkt werden.

Im Folgenden werden kurz einige Verfahren zur Lokalisierung von Abdichtungsleckagen beschrieben.¹⁵

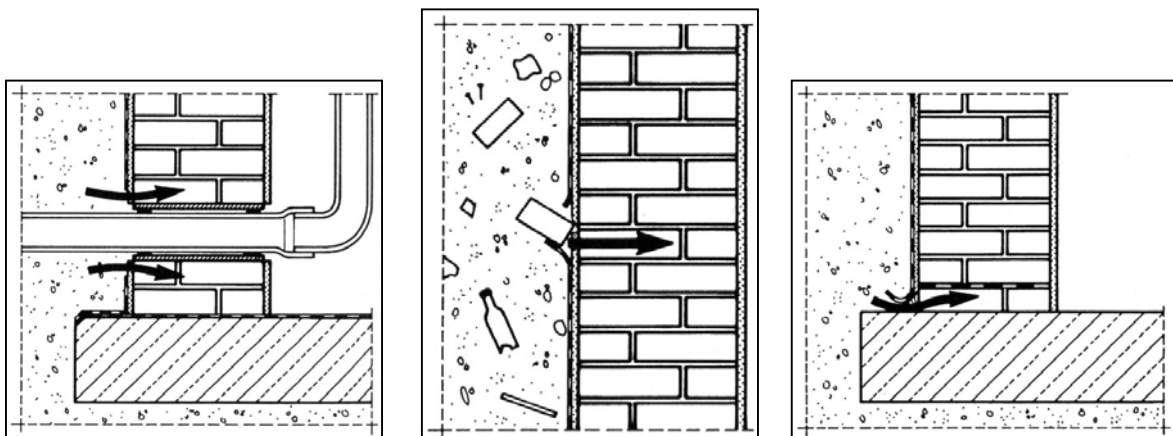


Abb. 4.1: Schadhafte Abdichtungen [Bonk (2001), S. 382]

¹⁴ Vgl. Warnecke (2002), S. 11

¹⁵ Vgl. Hariri (2004), S. 135 ff.

Elektrische Verfahren

Dabei werden zwei Messprinzipien unterschieden. Einige Geräte messen den Widerstand zweier Elektroden, die in den Baustoff eingebracht werden. Andere messen die elektrische Kapazität durch Ermittlung der Dielektrizitätskonstanten des Baustoffes.

Als Grundlage für eine Sanierungsplanung ist der Einsatz problematisch, da die Ergebnisse stark vom Salzgehalt des Bauteiles abhängen. Lediglich unter der Voraussetzung eines salzfreien Baustoffes bieten sie eine gute Hilfestellung bei der Anzeige von Feuchtetrends.

Mikrowellenverfahren

Bei den Mikrowellenmessverfahren wird der Unterschied zwischen der Dielektrizitätskonstanten (DK) von Wasser (ca. 80) und der DK der Baustoffe (ca. 3-6) gemessen. Die Messergebnisse werden nicht wie bei den elektrischen Verfahren durch Salzverunreinigungen beeinflusst. Die meisten Geräte können die Feuchte sowohl an der Bauteiloberfläche als auch im Volumen des Bauteils ermitteln.

Nachteilig ist der negative Einfluss von Metallen oder Hohlräumen im Bauteil.

Thermographie

Die Thermographie erlaubt die quantitative Ermittlung von durchfeuchteten Zonen. Diese werden durch Messung der Wärmestrahlung sichtbar, die wegen unterschiedlichen Feuchten im Bauteil verschieden stark ist.

Es lassen sich vor allem gute Hinweise auf Fehlstellen bei Fußbodenheizungen finden. Bei der Ortung von schädlichen Kellerabdichtungen ist dieses Verfahren auf Grund von Wärmebrücken mit Vorsicht zu genießen.

Neutronensonde

Dieses Verfahren basiert darauf, dass Neutronen beim Auftreffen auf einen Wasserstoffkern gebremst werden. Hierüber kann eine Angabe über den relativen Feuchtegehalt getroffen werden.

Bei der Ortung von Leckagen ist es ein sinnvolles, jedoch recht teures Hilfsmittel.¹⁶

¹⁶ Vgl. Arendt (1990), S. 101

Farbversuch

Das vorhandene Wasser im Erdreich wird mit fluoreszierenden Mitteln gefärbt. Dies hat den Sinn, dass insbesondere an Rohrdurchführungen die Farbstoffe im Bauwerksinneren wieder austreten sollen.

Nachteilig ist, dass die Farbstoffe durch den Beton oder das Mauerwerk teilweise gefiltert werden und die ungefähre Lage der Undichtigkeit bekannt sein muss.¹⁷

Calcium-Carbid-Methode

Mit dem so genannten CM-Gerät lässt sich direkt auf der Baustelle der Feuchtegehalt einer Baustoffprobe durch eine chemische Reaktion bestimmen.

Entnommene Baustoffproben werden zerkleinert, gewogen und dann gemeinsam mit einer gläsernen Calciumcarbidampulle und einer Stahlkugel in eine Druckflasche gefüllt. Durch Schütteln der Vorrichtung wird die Ampulle durch die Stahlkugel zerstört und das freiwerdende Calciumcarbid reagiert mit dem im Prüfraum vorhandenen Wasserdampf, wobei Acetylgas entsteht. Dieses erzeugt einen vom Wassergehalt der Probe abhängigen Überdruck, der an einem an der Druckflasche angeschlossenen Manometer abgelesen werden kann.

Mit Hilfe einer Eich-tabelle und dem zu Beginn gemessenen Gewicht der Probe wird der Wassergehalt bestimmt.

4.2.2 Laboruntersuchungen

Eine weitere Möglichkeit, den Feuchtegehalt in Baustoffen zu bestimmen, ist neben der Calcium-Carbid-Messung die gravimetrische Bestimmung mittels der Darr-Methode. Da diese eine in der Praxis weit verbreitete Methode zur Untersuchung der Feuchtebelastung darstellt, wird die Vorgehensweise nachfolgend erläutert. Mit den hierdurch erzielten Messergebnissen ist im Gegensatz zu dem CM-Verfahren eine höhere Genauigkeit zu erzielen.

Probenentnahme

Die Probenentnahme sollte in mehreren übereinander liegenden Schichten erfolgen. Somit ergibt sich einerseits ein Aufschluss über den Bauteilaufbau, andererseits lässt eine Bohrung durch den gesamten Querschnitt eventuell den Verlauf der Feuchteverteilung erkennen. Für eine spätere Auswertung ist ebenfalls das Raumklima wie Lufttemperatur, Luftfeuchte und Oberflächentemperatur zu messen.

¹⁷ Vgl. Bonk (2001), S. 384

Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes

Die Ermittlung erfolgt durch Gewichtsverlust im Trockenofen bei 105 °C. Nach Erreichen der Gewichtskonstanz kann die vorhandene Feuchte mit Gleichung 4.1 berechnet werden.

$$W_{\text{vorh}} = \frac{G_{\text{F}} - G_{\text{T}}}{G_{\text{T}}} \text{ [M.-\%]} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

mit	W_{vorh}	Wassergehalt/Feuchtigkeitsgehalt im Baustoff
	G_{F} [g]	Ausgangsgewicht (feuchte Probe)
	G_{T} [g]	Trockengewicht (getrocknete Probe)

Bestimmung der hygroscopischen Ausgleichsfeuchte

Zur Bestimmung der hygroscopischen Feuchtigkeitsaufnahme werden die getrockneten Proben 20 Tage in einem Klimaschrank bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 90 % gelagert und wiederum gewogen. Die hygroscopische Ausgleichsfeuchte (Gleichgewichtsfeuchte) ergibt sich aus Gleichung 4.2.

$$W_{\text{hygr}} = \frac{G_{\text{F,Klima}} - G_{\text{T}}}{G_{\text{T}}} \text{ [M.-\%]} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

mit	W_{hygr}	hygroscopische Ausgleichsfeuchte
	$G_{\text{F,Klima}}$ [g]	Gewicht nach Klimaschranklagerung
	G_{T} [g]	Trockengewicht (getrocknete Probe)

Eine erhöhte Gleichgewichtsfeuchte ist immer Indiz für eine erhöhte Salzbelastung.

Ermittlung der Sättigungsfeuchte

Die Sättigungsfeuchte stellt den oberen Grenzwert des Wasseraufnahmevermögens einer Probe dar. Die Ermittlung kann über das kapillare Saugen erfolgen, wobei die Sättigungsfeuchte erreicht ist, wenn an der Oberfläche der Probe Feuchtigkeit auftritt. Die Berechnung ist der Gleichung 4.3 zu entnehmen.

$$W_{\text{S}} = \frac{G_{\text{S}} - G_{\text{T}}}{G_{\text{T}}} \text{ [M.-\%]} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

mit	W_{S}	Sättigungswert
	G_{S} [g]	Sättigungsgewicht
	G_{T} [g]	Trockengewicht (getrocknete Probe)

Durchfeuchtungsgrad

Hygroskopisch

Der hygroskopische Durchfeuchtungsgrad D_{hygr} ist das Verhältnis der hygroskopischen Ausgleichsfeuchte zur Sättigungsfeuchte.

$$D_{\text{hygr}} = \frac{W_{\text{hygr}}}{W_S} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

Wenn $D_{\text{hygr}} = 1,0$ ist, bedeutet dies, dass eine Reduzierung des vorhandenen Feuchtegehaltes der Wand durch konstruktive Maßnahmen wie zum Beispiel durch Sperrschichten nicht mehr möglich ist.¹⁸

Kapillar

Der kapillare Durchfeuchtungsgrad D_{kap} ist das Verhältnis der vorhandenen Feuchte zur Sättigungsfeuchte.

$$D_{\text{kap}} = \frac{W_{\text{vorh}}}{W_S} \quad (\text{Gl. 4.5})$$

Der Wert gibt Auskunft über das freie Porenvolumen, das heißt, das Volumen, welches zur Verfügung steht, um abdichtende oder verfestigende Produkte in den Baustoff einzubringen. Wenn der kapillare Durchfeuchtungsgrad 50 % übersteigt, sind Injektionsverfahren (siehe Abschnitt 4.8.2) zur Verminderung der aufsteigenden Feuchte wegen des geringen Saugvermögens nur noch beschränkt wirksam.

Sobald D_{kap} den Wert von 90 % übersteigt, besteht die Gefahr von Abplatzungen durch Frosteinwirkung.¹⁹

4.3 Diagnose

Während der Diagnose werden die Schäden analysiert, das heißt, es wird festgestellt, wo die Ursachen aller auftretenden Feuchteschäden liegen.

- Liegt der Fehler zum Beispiel in einer defekten bzw. beschädigten Abdichtung?
- Hat sich der Wasserandrang verändert, so dass die Abdichtungsmaßnahme nicht mehr ausreicht?
- Ist eine funktionstüchtige Horizontalsperre vorhanden? ...usw.

¹⁸ Vgl. Warnecke (2002), S. 55

¹⁹ Vgl. Warnecke (2002), S. 55

Es gilt also zu untersuchen, ob die Ursachen in der Fehleinschätzung der Wasserbeanspruchung liegen (Planungsfehler), ob falsches Abdichtungsmaterial verwendet wurde (Materialfehler), ob das Problem in einer falschen Ausführung liegt (Verarbeitungsfehler), ob die spätere Raumnutzung falsch eingeschätzt worden ist oder womöglich flankierende Maßnahmen wie Dränagen oder Schutzschichten fehlen.

Um die verschiedenen Fragestellungen zu klären, werden die Ergebnisse der Laboruntersuchungen genauso wie die Eindrücke aus der Inaugenscheinnahme des Bauwerks und eventueller Untersuchungen vor Ort herangezogen.

4.3.1 Abdichtungsunabhängige Feuchtigkeitseinflüsse

Um eine komplexe und womöglich kostenintensive Schadensdiagnostik zu vermeiden, sollte zunächst ausgeschlossen werden, ob es sich bei dem anfallenden Feuchteschaden überhaupt um einen Abdichtungsfehler handelt oder ob abdichtungsunabhängige Feuchtigkeitseinflüsse den Schaden verursachen. Neben der Überprüfung von Undichtigkeiten bei Wasserleitungen, Abfluss- und Heizungsrohren sollten die Einflüsse von Tauwasser, Bauwasser und Niederschlägen betrachtet und ausgeschlossen werden.²⁰

Die Ursache von Tauwasser wurde bereits in Abschnitt 3.4 beschrieben. Ein relativ sicherer Hinweis für Tauwasserbildungen ist die Tatsache, dass diese mit Beginn der kühleren Jahreszeit verschwinden.

Eine weitere Möglichkeit zur Klärung liegt in der zeitparallelen Messung der Luft- und Oberflächentemperaturen sowie der Luftfeuchte, verbunden mit einer anschließenden Auswertung.

Bauwasser, beispielsweise aus überschüssigem Anmachwasser oder aus Niederschlägen, gelangt im Zuge der Bauphase beinahe immer in den abgedichteten Kellertrog. Die Abführung durch Pumpen oder den Weg der Verdunstung geschieht über einen längeren Zeitraum. Das Auftreten einer Wasserlache wird dann oft auf anstehendes Grundwasser und eine fehlerhafte Abdichtung zurückgeführt.

Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Sättigungfeuchte, bei der alle Poren und Kapillaren mit Wasser gefüllt sind, bei Beton $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^3$ beträgt.²¹ Daraus folgt, dass bei einer 5.000 m^3 großen Sohlplatte bis zu 1.100 m^3 Wasser enthalten sein können. Dieses verdunstet mit der Zeit und es kann bei schlechter Lüftung zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit zusammen mit erheblichen Tauwasserbildungen kommen.

Außerdem sollte untersucht werden, ob womöglich anfallende Niederschläge während der Nutzung an Kellertreppen, Zufahrtsrampen oder ähnlichem aufgefangen wurden.

²⁰ Vgl. Bonk (2001), S. 379

²¹ Vgl. Künzel (1974), S. 46

4.4 Therapie

Die Therapie beinhaltet den Sanierungsvorschlag des Abdichtungskonzeptes. Es wird entschieden, ob es zum Beispiel möglich ist, das vorhandene Abdichtungssystem auszubessern oder ob ein nachträgliches Aufbringen eines neuen Systems notwendig ist.

Auf die unterschiedlichen Verfahren und Möglichkeiten zur nachträglichen Abdichtung von erdberührten Bauteilen wird im Folgenden näher eingegangen. Des Weiteren erfolgen eine Bewertung und eine Eingrenzung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Systemkomponenten.

Grundsätzlich muss immer die ehemalige, gegenwärtige und zukünftige Nutzung des Bauteils erfasst und mit beachtet werden. Insbesondere, wenn es darum geht, verhältnismäßig feuchte Keller wie zum Beispiel alte Lagerräume als hochwertig nutzbare Räume abzudichten, um dort Bibliotheksarchive oder EDV-Plätze unterzubringen, gilt es die Durchführungsmöglichkeiten zu prüfen.

Auf die Darstellung der Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung von hochwertig genutzten Räumen im erdberührten Bereich wird an späterer Stelle dieser Arbeit eingegangen.

4.5 Nachträgliche Außenabdichtung

Aus den Graphiken 4.2 bis 4.4, die in Abhängigkeit vom Lastfall eine Übersicht über die Verteilung der Abdichtungsverfahren im Wohnungsbau zeigen, wird zunächst ersichtlich, dass in der Abdichtungstechnik vor allem die Bitumendickbeschichtungen einen erheblichen Marktanteil eingenommen haben. Im Objektbau ist die prozentuale Verteilung der verschiedenen Materialien ähnlich, weshalb auf eine Darstellung verzichtet wird.

Die Angaben stammen aus einer Marktbefragung der Heinze Marktforschung aus dem Jahr 1998, wobei die in Abschnitt 3.2 erwähnten Einschränkungen zu berücksichtigen sind.

Auf die unterschiedlichen Abdichtungsmaterialien wird noch näher eingegangen werden.

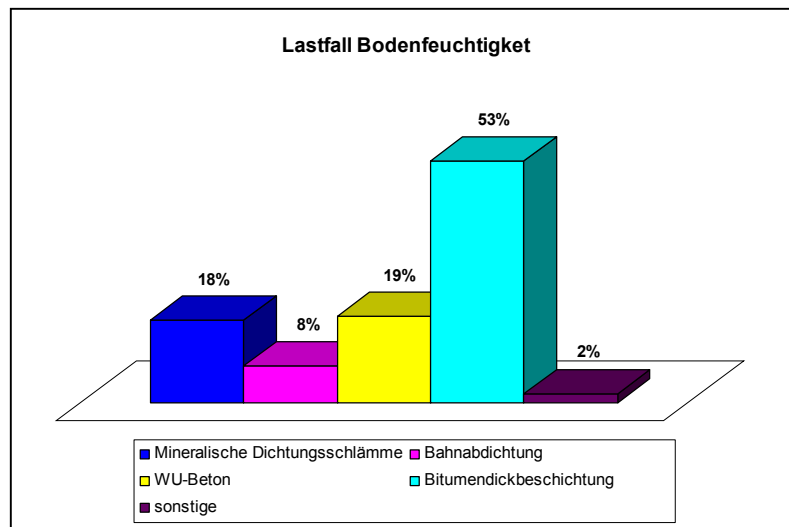


Abb. 4.2: Anteil Abdichtungsmaterialien Wohnungsbau, LF Bodenfeuchtigkeit [Heinze Marktforschung (1998)]

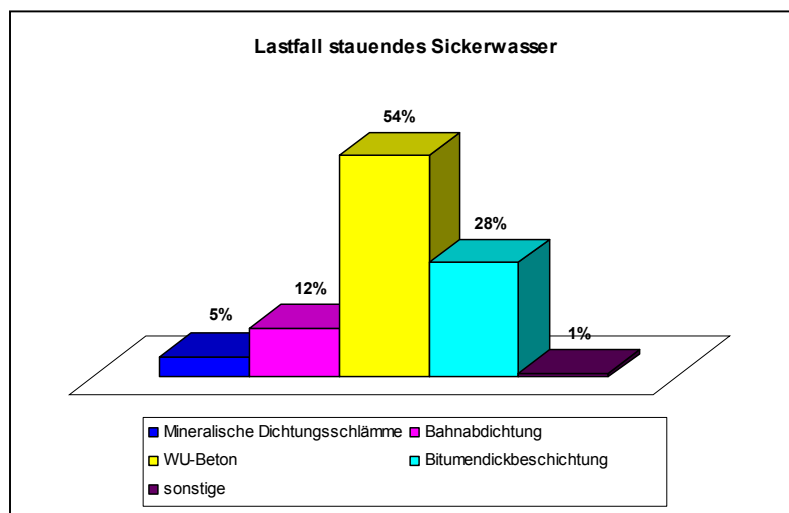


Abb. 4.3: Anteil Abdichtungsmaterialien Wohnungsbau, LF stauendes Sickerwasser [Heinze Marktforschung (1998)]

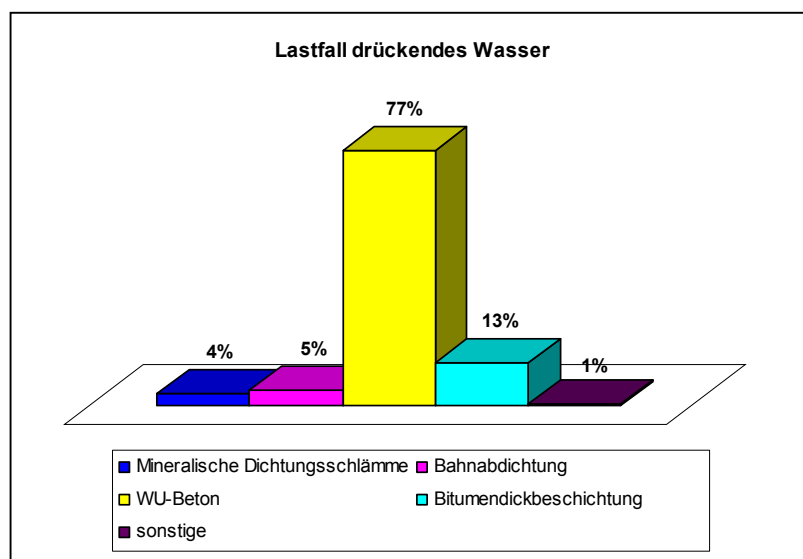


Abb. 4.4: Anteil Abdichtungsmaterialien Wohnungsbau, LF drückendes Wasser [Heinze Marktforschung (1998)]

Bei einer nachträglichen Vertikalabdichtung ist eine Außenabdichtung anzustreben und somit anderen Abdichtungssystemen vorzuziehen. Grundsätzlich gilt, dass eine vertikale äußere Abdichtung an eine horizontale Abdichtung angeschlossen werden muss. Auf diese Weise soll eine wannenartige Umschließung der Bauteile erreicht werden.

Auf die Ausführungsmöglichkeiten wird später noch ausführlich eingegangen. Die nachträgliche Außenabdichtung gilt für die drei zu Beginn erläuterten Lastfälle bzw. Wasserbeanspruchungen der DIN 18195.

Im Kellerbereich muss eine Abdichtung vorhanden sein und es ist sicherzustellen, dass die verschiedenen Abdichtungssysteme untereinander verträglich sind. Ebenso müssen alle Anschlüsse, Durchdringungen und Bauwerksfugen mit abgedichtet werden.

Die einzelnen Arbeitsschritte der verschiedenen Systeme richten sich nach der Art der Abdichtungsmaterialien, den Untergrund- und Objektbedingungen sowie dem Lastfall.

Bevor auf die unterschiedlichen Verfahren und Produkte eingegangen wird, soll zunächst die prinzipielle Vorgehensweise beschrieben werden.

4.5.1 Vorbereitung des Untergrundes

Um eine nachträgliche Außenabdichtung im erdberührten Bereich aufbringen zu können, muss das gesamte abzudichtende Bauteil vollständig freigelegt werden. Das Ausheben des Arbeitsraumes kann entweder manuell oder maschinell erfolgen. Hierbei sind die DIN 4123 und die DIN 4124 zu beachten, die sich unter anderem mit der Gebäudesicherung im Bereich von Ausschachtungen und mit den Arbeitsraumbreiten beschäftigen.

Wenn es sich um einen punktuellen bzw. örtlichen Schaden handelt, ist ein Aushub bis etwa 0,5 m unter die Fehlstelle vorzusehen. Ein Untergraben des Fundamentes ist auszuschließen, damit die Standsicherheit des Gebäudes nicht gefährdet wird. Für die Abdichtung ist ein geeigneter und tragfähiger Untergrund zu schaffen.

Geeignet sind die folgenden mineralischen Untergründe:²²

- Beton (DIN 1045)
- Mauerwerk (DIN 1053)
- Putz der Mörtelgruppe P II und P III (DIN 18550)
- Estrich (DIN 18560)

Der Untergrund muss gereinigt und hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit beurteilt werden. So muss unter Umständen der alte Putz entfernt und das Bauteil von losen und haftungsmindernden Stoffen befreit werden. Hierfür sind nach Möglichkeit keine Methoden mit Wasser anzuwenden (z.B. Wasserdruckstrahlen), da sich sonst vorhandene schädliche Salze lösen und tiefer in das Bauteil eindringen können.

²² Vgl. Frössel (2001), S. 216

Lose Mauerwerksfugen müssen mindestens 2 cm ausgekratzt und neu verfugt werden, so dass eine vollständige und bündige Verfugung gegeben ist.

Bei vorhandenem losem Mauerwerk muss dieses neu vermauert werden, wobei mürbe Steine bis zu ihrem festen Kern abgeschlagen werden. Vorhandene Ausbrüche oder Vertiefungen am freigelegten Bauteil sind mit geeigneten Mörteln auszubessern. Bei Unebenheiten kann ein Flächenausgleich mit einem Ausgleichsputz erfolgen.

Wenn es sich bei der Kellerwand um eine Betonwand handelt, müssen vorhandene Fehlstellen und Kiesnester mit einem Betoninstandsetzungsmaterial ausgeglichen werden. Hierfür eignen sich zum Beispiel Zementmörtel gemäß DIN 1045-2 oder ENV 206-1.²³ Eventuell vorhandene Risse können etwa mit Polyurethanharzen (PUR) verpresst werden.²⁴

Die Abdichtungen dürfen nicht über scharfkantige Ecken geführt werden. Deshalb müssen Außenecken gebrochen und mit einer Dichtungsschlämme eingestrichen werden. Um die Innenecken auszurunden, müssen dort Hohlkehlen mit einem Radius von etwa 5 cm aus Dichtungsmörteln oder Bitumendickbeschichtungen ausgeführt werden.

Vor dem Beginn der neuen Abdichtungsarbeiten muss die Beschaffenheit der vorhandenen Abdichtung festgestellt werden. Bei einer ausreichenden Haftung und bei Verträglichkeit mit dem neuen Abdichtungssystem kann sie bestehen bleiben.

Handelt es sich bei der vorhandenen Abdichtung allerdings um Teerpech, muss diese vollständig abgetragen werden. Die Kontrolle kann über eine Brennprobe erfolgen, bei der ein Stück des Materials auf einer Messerspitze bis zum Brennen erhitzt wird.²⁵ Wenn die entstehenden Dämpfe weiß sind, handelt es sich um Bitumen. Sind sie allerdings gelb, ist eine teerhaltige Abdichtung verwendet worden und muss entfernt werden.

Da im Wand-Sohlen-Bereich mit einer erhöhten Feuchtebelastung gerechnet werden muss, ist im Fundamentbereich und mindestens 25 cm an der aufgehenden Wand die vorhandene Abdichtung restlos zu entfernen und mit zwei Lagen Dichtungsschlämme zu beschichten. Hiermit wird ein tragfähiger Untergrund gewährleistet und eine Belastung durch rückseitig einwirkende Feuchtigkeit auf die Abdichtung verhindert.

4.5.2 Abdichtungssysteme

Die Materialien, die für die Außenabdichtungen eingesetzt werden können, ergeben sich prinzipiell aus der DIN 18195. Darüber hinaus werden Dichtungsschlämme und WU-Betone verwendet. Es wird allerdings deutlich, dass die in der DIN aufgeführten Bahnabdichtungen in der nachträglichen Bauwerksabdichtung nur wenig zum Einsatz kommen.

²³ Vgl. Budelmann (2004), S.64

²⁴ Vgl. Budelmann (2004), S.86

²⁵ Vgl. Sauerbier (2002), S. 56

Generell übliche Abdichtungssysteme sind:

- Wasserdichter Sperrputz der Putzgruppe P III (Zementputz)
- Zementgebundene starre oder flexible Dichtungsschlämme
- WU-Beton
- Wasserdichte Schweißbahn auf Bitumenbasis
- Wasserdichte Kunststoffbahn oder -folie
- Flexible Abdichtungsbahn mit Weichschaumstoffschicht
- 1- oder 2-komponentige Bitumendickbeschichtungen

In Abbildung 4.5 sind die Marktanteile (Stand 1998) der genannten Abdichtungsmaterialien aufgeführt. Die Graphik beinhaltet sowohl den Neu- als auch den Altbau. Bei Letzterem liegt der Anteil der Dickbeschichtungen mit 80 % allerdings noch wesentlich höher.²⁶ Diese bilden mit Abstand die häufigste Art der Abdichtung. Es ist anzumerken, dass im Objektbau der prozentuale Anteil der Bitumendickbeschichtungen im Vergleich zu WU-Beton gleich ist.

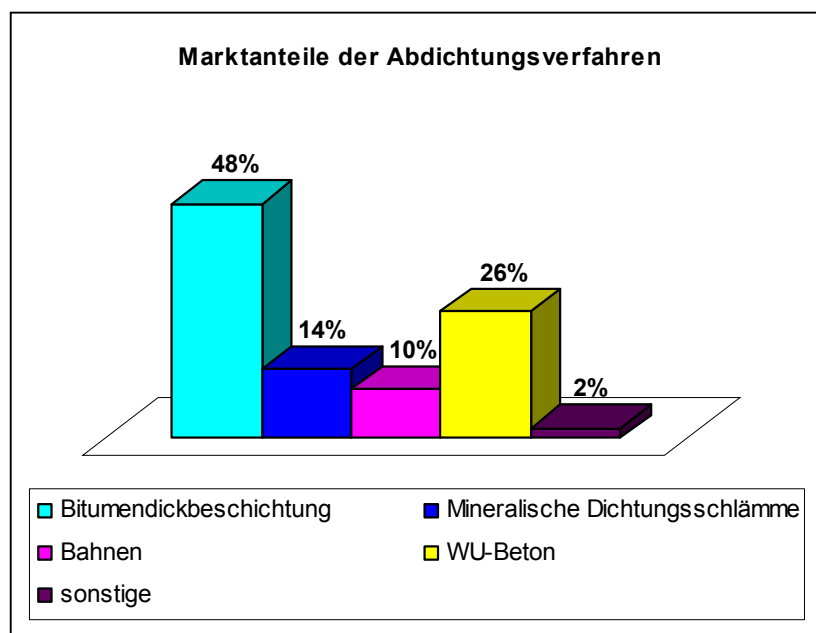


Abb. 4.5: Marktanteile Abdichtungsverfahren [Heinze Marktforschung (1998)]

²⁶ Vgl. Frössel (2001), S. 217

4.5.3 Kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen (KMB)

Neben den Dichtungsschlämmen bilden die KMB im Bereich der Abdichtungen von erdbe-rührten Bauteilen, insbesondere beim Wohnungsbau, die am häufigsten angewandte Aus-führungsweise.²⁷ Es handelt sich um ein- oder zweikomponentige Spachtelmassen auf der Basis von Bitumenemulsionen, welche aus Bitumen und Wasser in Emulgieranlagen hergestellt werden.

Ein- und zweikomponentige Systeme unterscheiden sich im Wesentlichen in der Dauer des Austrocknungsprozesses. Bei den erstgenannten entweicht das Wasser relativ lang-sam und es besteht die Gefahr eines Abwaschens durch Regen.

Bei Letzteren wird durch Zugabe von hydraulischen Härtings- oder Reaktionspulvern eine frühzeitigere Regenbeständigkeit erreicht.

Die Dickbeschichtungen sind in die DIN 18195 aufgenommen und werden durch die Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen mit kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen (KMB) ergänzt.²⁸

Wirkungsprinzip

Die Trockenschicht bildet eine wasserdichte Schicht, die rissüberbrückende und zähe-lastische Eigenschaften aufweist.

Einsatzgebiet/Anwendungsbereich

Bitumendickbeschichtungen werden wie folgt eingesetzt:²⁹

- gegen Bodenfeuchtigkeit
- gegen nicht drückendes Wasser
- gegen drückendes Wasser bis zu einer Eintauchtiefe von 3 m (stauendes Sicker-wasser)
- Abdichtung von Nassräumen
- Horizontalabdichtung unter Fliesen u.a.
- als Kleber für Perimeterdämmung oder Sockelplatten

Die Dickbeschichtungen werden im Streich-, Roll-, Spachtel- oder Spritzverfahren aufge-bracht und sind somit wesentlich leichter zu verarbeiten als bahnenförmige Abdichtungen. Die KMB bieten einen erheblichen Vorteil, wenn es um die Abdichtung von unebenen Un-tergründen, Rohrdurchbrüchen, komplizierten Bauwerksgeometrien und senkrechten Flä-

²⁷ Vgl. Kohls (2000), S. 29

²⁸ Vgl. Deutsche Bauchemie (2001)

²⁹ Vgl. Frössel (2001), S. 237

chen geht. Sie sind sowohl für senkrecht als auch für waagrecht gerichtete Bauteile einsetzbar. Ebenso haben sie sich als kapillardichtende und dampfdichte Schicht für die Wände von hochwertig genutzten Kellerräumen bewährt.

Das Hauptproblem bei der Anwendung von Dickbeschichtungen liegt in der Gewährleistung der richtigen Trockenschichtdicke. Untersuchungen bei Schadensfällen haben ergeben, dass oft nur eine 0,1 mm dicke Schicht aufgetragen wurde.³⁰ Bereits beim geringsten Lastfall der Bodenfeuchte ist allerdings schon eine Mindesttrockenschichtdicke von 3 mm notwendig.³¹

Die Schichtdickenkontrolle erfolgt durch Messen der Nassschichtdicke durch mindestens 20 Messungen je 100 m². Bei einem 2-lagigen Auftrag mit einem Gewebe als Verstärkungseinlage müssen die Schichtdicken getrennt kontrolliert werden. Nachteilig ist außerdem die Empfindlichkeit gegen mechanische Beschädigung und gegen UV-Einwirkung. Ein Beispiel für eine nachträgliche Abdichtung mit KMB ist der Abbildung 4.6 zu entnehmen.

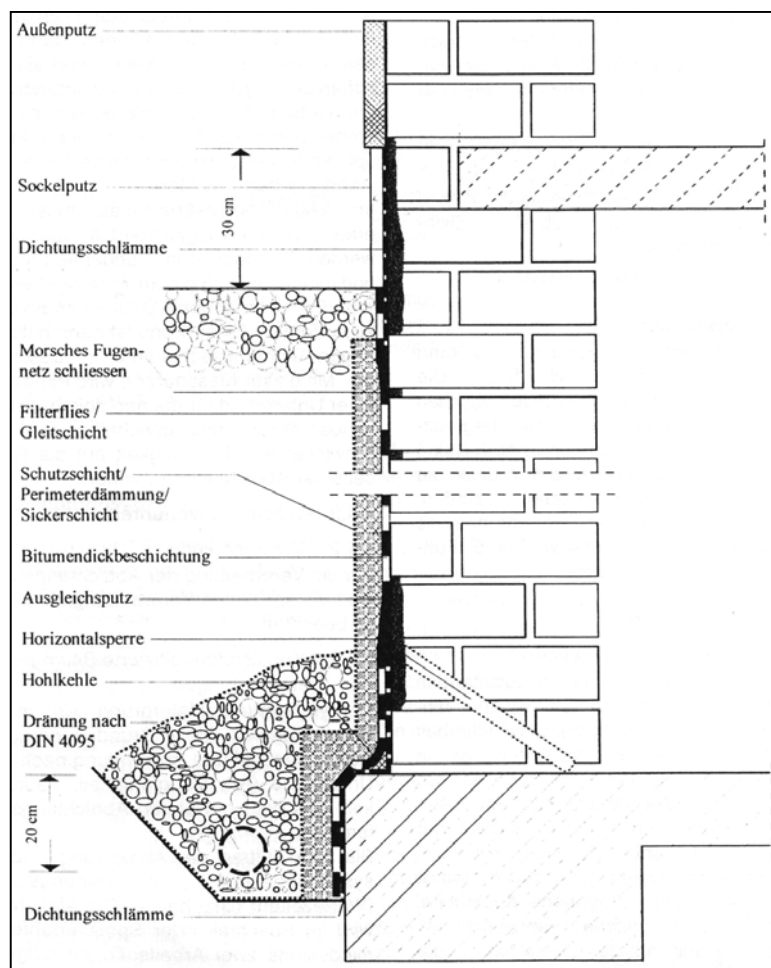


Abb. 4.6: Nachträgliche KMB-Beschichtung, LF nicht drückendes Wasser [WTA (1998), S. 5]

³⁰ Vgl. Oswald (1997), S. 111

³¹ Vgl. Deutsche Bauchemie, S. 22

Sanierung von KMB

Einerseits führen die falsche Beurteilung der tatsächlichen Wasserbeanspruchung und andererseits eine fehlerhafte Ausführung häufig zu Schadensfällen an Bauteilen im erdbe-rührten Bereich. Dies beinhaltet unter anderem das Fehlen von Schutzmaßnahmen wie zum Beispiel der Schutz vor mechanischer Beanspruchung vor, während und nach der Verarbeitung.

Nachträgliches Abdichten defekter KMB-Abdichtungen

Zunächst wird ein Arbeitsraum etwa 50 cm um die Fehlstellen herum ausgehoben. Die Aushubtiefe richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten (siehe auch Abschnitt 4.5.1). Anschließend ist die Oberflächenbeschaffenheit zu beurteilen. Haftungs-mindernde Teile und KMB-Abdichtungen, die nicht mehr ausreichend mit dem Untergrund verbunden sind, müssen entfernt werden. Wenn in der Wand Fehlstellen wie zum Beispiel Vertiefungen oder Mauerwerksausbrüche festgestellt werden, müssen diese mit geeignetem Mörtel geschlossen werden. Die Ränder der vorhandenen Dickbeschichtung sind an den nachzu-bessernden Stellen anzuschrägen.

Die festsitzende Dickbeschichtung wird mit einem Haftvermittler geprimert und dann mit der KMB kratzgespachtelt. Erst nach einer ausreichenden Durchtrocknung der Spachte-lung erfolgt das Auftragen der Neuabdichtung aus dem gleichen oder einem verträglichen Material in der entsprechenden Schichtdicke. Mit geeigneten Schutzmaßnahmen wird der Schädigung der Abdichtung entgegengewirkt.³²

Berichtigung der Schichtdicke von KMB

Für den Fall, dass die vorhandene Schichtdicke nicht der dazugehörigen Wasserbean-spruchung entspricht (3 mm bei Bodenfeuchte und nicht drückendem Wasser, 4 mm bei aufstauendem Sickerwasser), kann die Sanierung durch das nachträgliche Aufbringen ei-ner Dickbeschichtung des gleichen Materials erfolgen.³³ Dafür muss die vorhandene Dickbeschichtung zunächst gereinigt und mit einem bitumenhaltigen Haftgrund als Voran-strich versehen werden. In diese wird zur Sicherstellung der Standfestigkeit der neuen KMB Quarzsand gestreut.³⁴

³² Vgl. Kabrede (2003), S. 115 ff.

³³ Vgl. Deutsche Bauchemie (2001), S. 22

³⁴ Vgl. Cziesielski (2001), S. 411

Nachträgliches Abdichten beschädigter Hohlkehle

Nach dem vollständigen Freilegen der Außenabdichtung wird der nicht funktionsfähige Bereich komplett entfernt. Dies geschieht 25 cm oberhalb der Sohlplatte, auf dem Fundamentvorsprung und auf der Stirnseite der Betonsohle. Ziel ist es, nach der Reinigung einen tragfähigen, mineralischen Untergrund zu erhalten. Der Übergangsbereich von der Wand zum Boden wird dann mit einer Hohlkehle (Radius etwa 4 bis 5 cm) ausgerundet.

Nach der Durchtrocknung des Hohlkehlenbereiches wird der freigelegte Sohlenwandanschluss im Schlämmverfahren vorgedichtet, um eine rückseitige Durchfeuchtung auszuschließen. Nachdem der zweite Schlämmanstrich getrocknet ist, wird der Primer vollflächig aufgetragen. Nach vollständiger Verfilmung des Haftvermittlers wird die KMB-Spachtelung mit den geforderten Schichtdicken (3 bzw. 4 mm) aufgebracht.³⁵

4.5.4 Mineralische Dichtungsschlämme

Mineralische Dichtungsschlämme sind ein- oder zweikomponentige Werk trockenmörtel, die auf der Baustelle unter der Zugabe von Anmachwasser hergestellt werden. Sie werden sowohl beim Neubau als auch in der Altbausanierung eingesetzt. Hierfür kommen zum einen starre Schlämme aus Zement als Bindemittel, Feinsand sowie chemische und physikalische Zusätze und zum anderen flexible Dichtungsschlämme mit einem hohen Kunststoffdispersionsanteil zum Einsatz. Diese bieten den Vorteil, nachträglich entstehende Risse bis zu 0,25 mm zu überbrücken. Starre Dichtungsschlämme hingegen werden überwiegend dort aufgebracht, wo das Schwinden von Bauteilen bereits weitestgehend abgeklungen ist.

Zu erwähnen ist, dass Dichtungsschlämme in der DIN 18195 „Bauwerksabdichtungen“ nicht aufgeführt werden und dadurch die Ausführungs- und Planungsdetails in den einschlägigen Richtlinien näher behandelt werden (siehe Abschnitt 2, Tab. 2.1).

Wirkungsprinzip

Die Wirkungsweise der Dichtungsschlämme beruht auf einer ausschließlich mechanischen Abdichtung, das heißt, wegen ihrer physikalischen Eigenschaften wird das Wasser nicht durch eine erhöhte Grenzflächenspannung abgewiesen. Die Wirkungsfaktoren basieren zum größten Teil auf der Kapillarunterbrechung und der Oberflächenhydrophobierung.³⁶

Durch Zuschlagstoffe wie Quarzsand und Quarzmehl mit einer sehr geringen Kornabstufung entsteht ein Porensystem ohne Grobporen und mit einer stark reduzierten Anzahl

³⁵ Vgl. Kabrede (2003), S. 116 ff.

³⁶ Vgl. Grunau (1990), S. 105

von Kapillarporen. Dadurch bildet sich auf dem Bauteil eine wasserdichte Schicht mit einem niedrigen Diffusionswiderstand. Somit kann Wasser in flüssigem Zustand nicht mehr eindringen, als Wasserdampf hingegen ist dies möglich. Porenverengende und hydrophobierende Zusätze haben bei Wasserzutritt eine quellende Wirkung und erhöhen zusätzlich die Dichtigkeit des Mörtels.

Es ist zu beachten, dass eine mineralische Dichtungsschlämme nur dann vollständig hydratisieren kann, wenn ihr das Anmachwasser nicht zu schnell entzogen wird. Ein Vor-nässen des Untergrundes und eine ausreichende Nachbehandlung mit Feuchthalten sind somit erforderlich.

Einsatzgebiet/Anwendungsbereich

Flexible Dichtungsschlämme können bei Vertikalabdichtungen und bei Horizontalabdichtungen für die Lastfälle Bodenfeuchtigkeit, nicht drückendes Wasser und drückendes Wasser bis zu einer Eintauchtiefe von 3 m verwendet werden (aufstauendes Sickerwasser).

Sie können für die folgenden Abdichtungsaufgaben eingesetzt werden:³⁷

- Vertikalabdichtung von erdberührten Bauteilen
- Horizontalabdichtung von erdberührten Bauteilen
- Vertikalabdichtung des spritzwassergefährdeten Sockelbereiches
- Horizontalabdichtung des Wandfußpunktes
- Abdichtung gegen von innen drückendes Wasser
- Abdichtung gegen rückseitig einwirkendes Wasser
- Abdichtung gegen zeitweise von innen einwirkendes Wasser während der Bau-phase

Vornehmlich werden Dichtungsschlämme im Sinne der DIN 18195 gegen Bodenfeuchtigkeit und nicht drückendes Wasser, hauptsächlich Sicker- und Oberflächenwasser, eingesetzt. Des Weiteren werden sie bei der nachträglichen Innenabdichtung von Nassräumen, Kellerfußböden und -wänden verwendet.³⁸

Starre Dichtungsschlämme können wie folgt eingesetzt werden:³⁹

- Innenabdichtung von Behältern, bei denen die Rissbildung bereits abgeklungen ist, etwa bei Instandsetzungen
- Zwischenabdichtung zum Schutz für Abdichtungen, die keinem rückseitig einwirkendem Wasser ausgesetzt werden dürfen, beispielsweise als Schutz für Dichtungsbahnen, Folien und Bitumendickbeschichtungen

³⁷ Vgl. Deutsche Bauchemie (1999), S. 11

³⁸ Vgl. Frössel (2001), S. 225

³⁹ Vgl. Deutsche Bauchemie (2002), S. 5

- Schutz für Abdichtungen, die einen trockenen Untergrund benötigen, speziell in der Sanierung von nassem Mauerwerk
- Spritzwasserschutz im Sockelbereich
- Horizontale Abdichtung in und unter aufgehenden Wänden gegen aufsteigende Feuchtigkeit
- nachträgliche Innenabdichtung

4.5.5 Bitumendichtungsbahnen

Die Bitumen- und Polymerbitumenbahnen sind in der DIN 18195 in Tabelle 4 aufgeführt. Grundsätzlich unterscheidet man nach der Herstellung Destillations-, Hochvakuum-, Oxidationsbitumen und polymermodifizierte Bitumen. Der Erstgenannte fällt als Rückstand bei der Destillation von Rohölen an und ist die Grundlage der anderen Bitumenarten.⁴⁰ Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Vorgänge wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Durch Zugabe von Kunststoffen erhält man polymermodifizierte Bitumen, die noch schlagzäher, weniger kälteempfindlich und wärmostabiler sind. Die Dichtungsbahnen werden mit einer Trägereinlage aus Glasfasern oder Polyesterfasern ausgeführt, wobei Letztere bei ständiger Feuchte einen wesentlich besseren Verbund zum Bitumen aufweisen.

Bei den eingesetzten Schweißbahnen sind die Bitumendeckschichten auf der Trägereinlage so bemessen, dass durch spezielle Verfahren mit offener Flamme die Bahnen ohne zusätzliche Klebebitumen verarbeitet werden können.

Die Verfahren zur Verarbeitung von Bitumenbahnen werden im Folgenden kurz erläutert:⁴¹

Bürstenstreichverfahren

Auf waagerechten Flächen wird die Klebmasse mit einer Bürste vor der aufgerollten Bitumenbahn aufgetragen. Daraufhin wird die Bahn in die Masse eingerollt. Auf senkrechten Flächen werden sowohl der Untergrund als auch die Abdichtungsbahn mit Klebmasse beaufschlagt.

⁴⁰ Vgl. Hauptverband der deutschen Bauindustrie (1995), S. 1 ff.

⁴¹ Vgl. NABau (2000), S. 6 ff.

Gießverfahren

Auf waagerechten Flächen wird die Klebmasse aus einem Gefäß vor die Bahn gegossen, um diese darin auszurollen und einzubetten. Auf senkrechten Flächen wird die Masse in den Zwickel zwischen der angedrückten Bahnrolle und dem Untergrund gegossen. Das Gießverfahren wird dem Bürstenstreichverfahren vorgezogen.

Gieß- und Einwalzverfahren

Das Einbauverfahren erfolgt analog zu dem Gießverfahren. Allerdings sind die Bahnen straff auf einen Kern gewickelt und werden fest in die Klebmasse eingewalzt.

Flämmverfahren

Beim Flämmverfahren wird Heißbitumen auf dem Untergrund verteilt. Die Bahn wird dann in der durch Wärmezufuhr aufzuschmelzenden Masse eingerollt.

Schweißverfahren

Beim Schweißverfahren werden sowohl der Untergrund als auch die Unterseite der Schweißbahn erhitzt. Die Bahn wird dann unter einer vorläufigen Bitumenwulst eingerollt.

Nach den eben beschriebenen Verfahren wird deutlich, warum Bahnenabdichtungen bezüglich der Einsatzhäufigkeit und der Verwendbarkeit in der Praxis zum größten Teil von Bitumendickbeschichtungen abgelöst wurden. Gerade im Bereich von Vertikalabdichtungen an Außenwänden erfordert die Verarbeitung von Bitumenbahnen ein hohes Maß an handwerklichen Fähigkeiten. Zudem gestaltet sich die Ausführung insbesondere an Durchdringungen als extrem aufwendig.

Wirkungsprinzip

Bitumen ist hydrophob, nicht wasserlöslich und besitzt einen hohen Diffusionswiderstand.

Einsatzgebiet/Anwendungsbereich

Die DIN 18195 lässt die Bitumenbahnen für alle Lastfälle zu. Allerdings sind die oben beschriebenen Nachteile, insbesondere in Bezug auf die nachträgliche Bauwerksabdichtung zu beachten.

4.5.6 Kaltselfklebebahnen (KSK)

Die allgemeinen Anforderungen an kaltselfklebende Bitumendichtungsbahnen sind in der DIN 18195-2, Tabelle 10 zusammengestellt. Sie werden so hergestellt, dass sie ohne zusätzliches Aufschmelzen der Klebmasse auf dem Untergrund haften. Es sind keine zusätzlichen Hilfsmittel wie zum Beispiel Propangasflächen oder Klebebänder nötig.

Die Dichtungsmasse ist oberseitig mit einer Folie als Klebeschutz kaschiert und unterseitig mit einem lösbaren, silikonisiertem Papier. Nach dem Ablösen des Papiers, werden sie kalt aufgeklebt und angedrückt.

Durch die Verwendung von unterschiedlichen Klebeschutzlagen lassen sich Bahnen mit verschiedenen Eigenschaften herstellen. Sie unterscheiden sich in der Elastizität, der Witterungs- und UV-Beständigkeit und der Reißfestigkeit.⁴²

Es ist zu beachten, dass rückseitig einwirkendes Wasser vermieden werden muss. Hierfür können mineralische Dichtungsschlämmen als Zwischenschicht aufgebracht werden.

Einsatzgebiet/Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich erstreckt sich auf die Abdichtungen von Terrassen, Balkonen, Nassräumen und Kellerabdichtungen, wobei die KSK vorwiegend bei einer weniger intensiven Wasserbeanspruchung wie Bodenfeuchtigkeit und nicht drückendes Wasser aufgebracht werden. Besonders gut geeignet sind KSK für die nachträgliche Abdichtung von Leckagen in Bahnenabdichtungen.⁴³

Ebenso bietet sich der Einsatz bei großen und ebenen Flächen mit möglichst wenigen Durchbrüchen an. Durch die relativ einfache Verarbeitungsweise wird Ausführungsfehlern vorgebeugt.

Schäden an KSK

Die PVC-Bahnen können nach einigen Jahren erhebliche Weichmacheranteile verlieren. Dadurch verlieren sie an Volumen, was einen Spannungsaufbau und eine damit verbundene Rissausbreitung zur Folge hat. Um diesen Effekt zu vermeiden, sollten ausschließlich Weichmacher eingesetzt werden, die weder bakteriell noch chemisch abgebaut werden können.⁴⁴

⁴² Vgl. Grunau (1990), S. 101

⁴³ Vgl. Cziesielski (2001), S. 39

⁴⁴ Vgl. Grunau (1990), S. 102

4.5.7 Kunststoffdichtungsbahnen

Bei den Kunststoffdichtungsbahnen unterscheidet die DIN 18195-2 in den Tabellen 5, 6 und 7 verschiedene Ausführungen. Es kommen bitumenverträgliche Bahnen (z.B. ECB- oder EVA-Bahnen) und bitumenunbeständige Bahnen (z.B. Elastomerbahnen) zum Einsatz. Die erstgenannten werden im Bürstenstreich-, Gieß- oder im Flämmverfahren verarbeitet. Die nicht bitumenverträglichen Bahnen werden durch lose Verlegung mit einer mechanischen Befestigung aufgebracht oder durch eine Auflast gesichert.

Für die Herstellung der Naht- und Stoßverbindungen schreibt die DIN 18195-3 in Abhängigkeit des Abdichtungsmaterialies die folgenden Verfahren vor:

- Quellschweißen
- Warmgasschweißen
- Hezelementschweißen
- Verkleben mit Bitumen

Die Ausführungen werden anschließend speziellen Prüfungen unterzogen (siehe DIN 18195-3: Reißnadelprüfung, Anblasprüfung, optische Prüfung, Druckluftprüfung, Vakuumprüfung).

Einsatzgebiet/Anwendungsbereich

Da in der DIN 18195 mehrlagige Abdichtungen aus Kunststoffbahnen nicht vorgesehen sind, müssen normgerechte Abdichtungen entweder einlagig oder in Verbindung mit Bitumendichtungsbahnen ausgeführt werden. Dies führt aber einerseits zu Unsicherheiten bei der Abdichtung und macht andererseits aus materialkundlicher Sicht wenig Sinn. Aus diesem Grund werden Kunststoffdichtungsbahnen in der Bauwerksabdichtung im Hochbau eher selten eingesetzt, sondern finden zumeist Anwendung bei einlagigen Dachabdichtungen im Industriebau.⁴⁵

4.5.8 Flexible Dichtungsbahn

Die flexible Abdichtungsbahn kombiniert die Vorteile von Bitumenbahnen und Dickbeschichtungen. Die äußere Lage besteht aus einer 2 mm dicken ECB-Bitumenabdichtungsbahn, die wasserdicht, wurzelbeständig und resistent gegenüber Salzen, Säuren und Laugen ist und eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Beschädigung besitzt. Die zweite Materialkomponente besteht aus einem dauerelastischen, komprimierbaren Polyurethanweichschaumstoff.

⁴⁵ Vgl. Cziesielski (2001), S. 37

Beim Anfüllen des Erdreiches komprimiert sich die Ausgleichsschicht und legt sich vollständig an das Bauteil an. Neben dem Ausgleich von Untergrundunebenheiten findet eine Entkoppelung der Abdichtung vom Untergrund statt. Dies hat den Vorteil, dass die Abdichtungsschicht durch nachträgliche Setzungen nicht beschädigt wird. Durch die Abkopplung vom Untergrund entfallen die aufwendigen Vorarbeiten zur Herstellung einer geeigneten Außenwandfläche.

Um die einzelnen Bahnen miteinander zu verbinden, werden diese mit Heißluft plastifiziert und unter Druck zusammengefügt. Die Temperatur, der Anpressdruck und die Zeit müssen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur beim Verschweißvorgang aufeinander abgestimmt werden.

Einsatzgebiet/Anwendungsbereich

Die flexible Dichtungsbahn kann als Abdichtung gegen drückendes und nicht drückendes Wasser eingesetzt werden. Der Nutzen dieser Vertikalabdichtung liegt darin, dass mit der Bauwerksabdichtung gleichzeitig eine zusätzliche Wärmedämmung erreicht wird und keine Untergrundvorbereitungen notwendig sind, da sich die Abdichtung dem Mauerwerk anpasst. Eine Reinigung des Untergrundes, eine Aufbringung des Ausgleichputzes oder eine zusätzliche Zwischenbeschichtung aus Dichtungsschlämmen können entfallen.

Außerdem haben Untergründe mit Salzausblühungen oder sonstigen Rückständen keinen negativen Einfluss auf die Abdichtung. Ein zusätzlicher Vorteil liegt in der witterungsunabhängigen Verarbeitung. Zudem ist der Erdaushub relativ gering, da die Anpassung der Dichtungsbahnen durch den Erddruck erfolgt. Dadurch kann der Aushub nachfolgender Bauwerksabschnitte sofort zum Wiederverfüllen verwendet werden, was eine geringere Gefährdung der Standsicherheit bedeutet.

Im Vergleich zu mineralischen Dichtungsschlämmen und Bitumendickbeschichtungen liegt eine Überlegenheit auch darin, dass die Schichtdicke beim Auftragen nicht manipuliert werden kann. Dies ist natürlich bei allen Formen der vorgefertigten Bahnabdichtungen der Fall. Zusätzlich ergibt sich auf Grund der entfallenden Trocknungszeiten der Abdichtung ein erheblicher Zeitgewinn bei der Ausführung.

4.5.9 Bentonit

Bentonit wird als äußere Vertikalabdichtung überwiegend in den USA eingesetzt. Es handelt sich um einen hochquellfähigen Ton, der bereits bei geringer Schichtdicke eine gute Dichtungswirkung aufweist und gegen Grund- und Schichtenwasser eingesetzt werden kann.

Wirkungsprinzip und Anwendungsbereich

Bentonit ist durch eine geringe Wasserundurchlässigkeit gekennzeichnet. Infolge von Wasseraufnahme quillt es auf, worin der wesentliche Vorteil gegenüber den anderen Abdichtungsmaterialien besteht. Wenn es zu Fehlstellen wegen Verarbeitungsfehlern kommt oder Risse durch Setzungen oder ähnliches entstehen, kann Bentonit dieses bis zu einem gewissen Grade durch sein Quellverhalten ausgleichen. Voraussetzung ist, dass das Bentonit ständig durchfeuchtet ist.

Ein erheblicher Risikofaktor stellt allerdings salzbelastetes Grundwasser dar. Erhöhte Salzgehalte führen zu einer Verringerung des Quellvermögens und die charakteristische positive Eigenschaft des Bentonits geht verloren.

Eine weitere Möglichkeit der Außenabdichtung bildet eine Flächenabdichtung vor dem Bauwerk durch eine Schleierinjektion von der Innenseite des Kellers aus. Auf diese wird in Abschnitt 4.9.2 näher eingegangen.

4.6 WU-Beton – Wasserdruckhaltende Innenwanne

Bei der Bauweise mit einem wasserundurchlässigen Beton geht es darum, dass die Sohlplatte und die Wände neben der statischen Funktion auch die abdichtungstechnische Aufgabe übernehmen. Auf das so genannte Prinzip der Weißen Wanne und den damit verbundenen Möglichkeiten und Grenzen bezüglich einer Nutzung wird im späteren Verlauf der Ausarbeitung noch ausführlich eingegangen. Deshalb wird an dieser Stelle auf die Kapitel 5 bis 7 verwiesen.

Eine mögliche Anwendung kann allerdings der Abbildung 4.7 entnommen werden. Es handelt sich um eine wasserdruckhaltende Innenwanne aus wasserundurchlässigem Beton nach dem Prinzip der Weißen Wanne. Eine derartige Bauweise wird dann erwogen, wenn sich der angenommene Lastfall auf ein Gebäude nach einer gewissen Zeit ändert. Besonders in den 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden über einen langen Zeitraum Grundwasserabsenkungen durchgeführt, um beispielsweise Tunnel oder U-Bahnbauten herzustellen. Aus umweltschutztechnischen Gründen wurde die langfristige Wasserhaltung baurechtlich jedoch erheblich eingeschränkt, was zur Folge hat, dass das anfallende Wasser über Negativbrunnen dem Grundwasser wieder zugeführt wird. Hieraus resultiert, dass die beim Neubau eines Objektes zu Grunde gelegten Bodenverhältnisse bzw. Grundwasserstände nicht mehr der Realität entsprechen. Dadurch kann es vorkommen, dass ein gegen Bodenfeuchtigkeit abgedichteter Keller mittlerweile durch drückendes Wasser beansprucht wird und besondere Maßnahmen, insbesondere beim Bedarf einer höherwertigen Nutzung, erforderlich sind. Auf die Möglichkeiten und Proble-

matiken, die sich bei einer Entscheidung für eine Weiße Wanne ergeben, wird ebenfalls in den Kapiteln 5 bis 7 näher eingegangen.

Grundsätzlich muss allerdings bedacht werden, dass eine Ausführung nach Abbildung 4.7 mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist. Des Weiteren ist über den aufgehenden Wänden in der Regel eine Horizontalsperre anzuordnen (siehe Abschnitt 4.8), da die Außenwände durchfeuchtet bleiben und somit die Gefahr von kapillar aufsteigender Feuchtigkeit besteht.

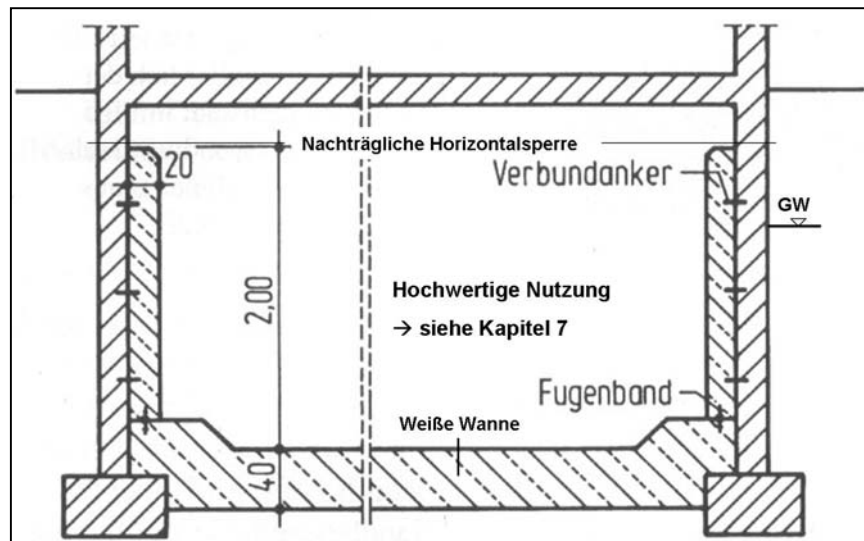


Abb. 4.7: Skizze Innentrog aus WU-Beton [Bonk (2001), S. 416, modifiziert]

4.7 Anschlüsse, Bewegungsfugen und Durchdringungen

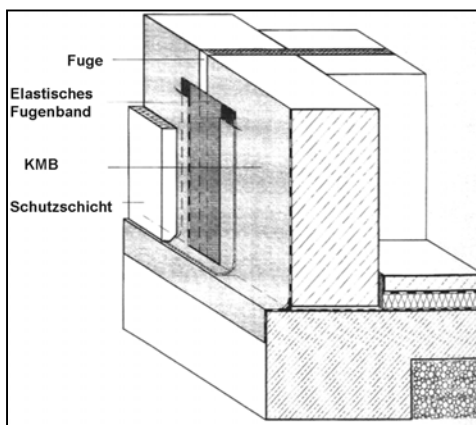


Abb. 4.8: Fugenband [Frössel (2001), S. 242]

Anschlüsse, Bewegungsfugen und Durchdringungen müssen im Detail geplant und ausgeführt werden. An Fugen ist ein glattes Überspannen dieser nicht möglich, da unter Umständen die Dehnfähigkeit des Abdichtungsmaterials durch die Fugenbewegungen überschritten werden kann. Bei dem Lastfall drückendes Wasser haben sich Flanschkonstruktionen nach DIN 18195-9 bewährt.

Für den Lastfall des nicht drückenden Wassers werden häufig flexible Dichtungsbänder eingesetzt (siehe Abbildung 4.8). Dabei wird jeweils auf beiden Seiten der Fuge ein Streifen Abdichtungsmaterial aufgetragen. Darin wird ein Dichtungsband eingebettet und in die vorgesehene Flächenabdichtung eingebracht.

Bei Durchdringungen (zum Beispiel Rohre) ist es wichtig, dass diese fest mit dem Bauteil verbunden sind und thermische Verformungen aufgenommen werden können. In Abhängigkeit von den Lastfällen ist in Abbildung 4.9 die jeweilige Ausführung dargestellt. Das linke Bild zeigt die Ausführung für den Lastfall nichtdrückendes Wasser mit einem hohlkehlenartigen Spachtelkragen aus KMB.

Das rechte Bild beschreibt eine Variante für den Lastfall drückendes Wasser mit Los- und Festflanschrohrdurchführungskonstruktionen.

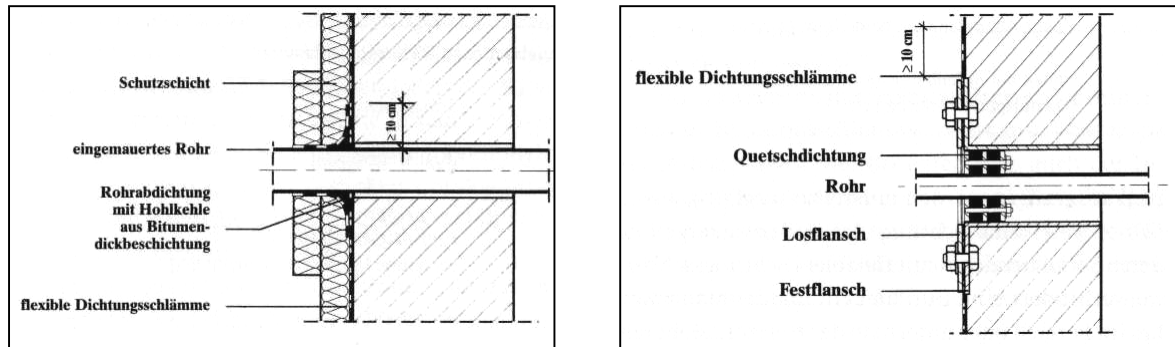


Abb. 4.9: Rohrdurchführung, links: LF nicht drückendes Wasser, rechts: LF drückendes Wasser [Frössel (2001), S. 228]

4.8 Flankierende Maßnahmen

Dränung

Bei einer Dränage handelt es sich um einen unterirdischen Leitungsstrang zur Abführung des sich im Bereich des Bauwerks im Boden befindlichen Wassers. Eine fehlende oder nicht funktionsfähige Dränung führt häufig zu Schadensfällen von Bauteilen im erdberührten Bereich.

Wenn die Außenabdichtung für den Lastfall Bodenfeuchtigkeit mit undurchlässigem Boden bemessen ist, stellt sie eine unbedingte Voraussetzung dar. Ansonsten würde es zu einem Aufstauen des Sickerwassers kommen, wodurch sich ein hydrostatischer Druck auf die Abdichtung aufbauen würde.

Bei anstehendem Grundwasser als Lastfall drückendes Wasser ergibt die Anordnung einer Dränage keinen Sinn. In diesem Fall geht es nicht darum, dass gesamte Wasser abzuführen. Die Abdichtung des Bauwerks hat hier entsprechend den Anforderungen gegen drückendes Wasser zu erfolgen.

Die Planung, Bemessung und Ausführung von Dränagemaßnahmen sind in der DIN 4095 geregelt.

Dränungen dienen nicht dazu, Abdichtungen an erdberührten Bauteilen zu ersetzen, sondern sie werden immer in Verbindung mit Abdichtungen ausgeführt, die das Bauwerk selbst nicht gegen drückendes Wasser schützen. Im Zuge einer nachträglichen Vertikal-

abdichtung und der damit verbundenen Freilegung der Außenwände ist eine Drainageanlage im Normalfall mit auszuführen.

Beispiele für den Aufbau und die Anordnung einer Drainage sind der Abbildung 4.10 zu entnehmen. Die genauen Ausführungen, Anordnungen und Bestandteile sind nicht Thema dieser Arbeit. Es sollen nachfolgend lediglich kurz die Grundlagen angesprochen werden.

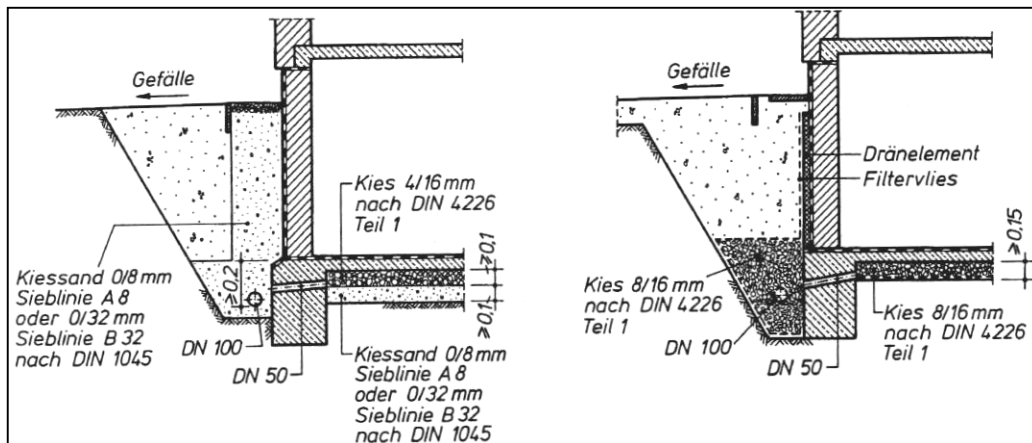


Abb. 4.10: Drainage, links: mit mineralischer Dränschicht, rechts: mit Dränelementen [Cziesielski (2001), S. 96]

Die Ausführung ist abhängig vom Wasserandrang sowie von den örtlichen Verhältnissen und wird entweder als Regel- oder als Sonderfall bemessen. Die Regelausführung beschränkt zum Beispiel die bebaute Fläche auf 200 m² und die Einbautiefe und Gebäudehöhe auf 3 m bzw. 15 m.

Wenn eine Drainage ausgeführt wird, ist ihre langfristige Funktionstüchtigkeit für eine dauerhafte Bauwerksabdichtung maßgebend.



Abb. 4.11: Kontrollschacht [Frössel (2001), S. 265]

Bei verformbaren Dränschichten sind für den Nachweis des Abflusses und der Wasseraufnahme die Dicke und der Durchlässigkeitsbeiwert des Drainageelementes so zugrunde zu legen, das sich unter der Beachtung des Zeitverhaltens eine Belastungszeit von 50 Jahren ergibt. Diese Werte sind in der Abhängigkeit von der Druckbelastung anzugeben.

Grundsätzlich ist ein Mindestgefälle von 0,5 % einzuhalten und bei jeder Richtungsänderung am Gebäude sind Spül- und Kontrollschächte anzuordnen (siehe Abbildung 4.11).

Außerdem muss durch eine Sickerschicht die Ableitung des Wassers zu den Dränageröhren gewährleistet sein. Eine Filterschicht verhindert das Einschlämmen von Boden.

Schutzmaßnahmen

Schutzmaßnahmen bzw. Schutzschichten sollen die nachträgliche Abdichtung vor schädigenden mechanischen, thermischen, statischen und dynamischen Einflüssen schützen. Es muss verhindert werden, dass die Abdichtung durch Geräte oder ähnliches beschädigt wird.

Hierfür eignen sich unter anderem:⁴⁶

- Expandierte Polystyrolhartschaumplatten
- Extrudierte Polystyrolhartschaumplatten
- Noppenbahnen mit Gleitschicht
- Schutzestriche auf Trennfolie
- Schaumglasplatten
- Wirrgelegebahnen mit beidseitiger Geotextilauflage
- Perimeterdämmung

Die Perimeterdämmung wird gleichzeitig auch als Wärmedämmschicht und Drainageelement eingesetzt.

Es muss darauf geachtet werden, dass die eingesetzten Schutzschichten keine Punkt- oder Linienlasten auf die Abdichtung übertragen und sie dadurch beschädigen. Außerdem muss beispielsweise bei Bitumendickbeschichtungen und Dichtungsschlämmen dafür gesorgt werden, dass diese nicht zu schnell austrocknen oder durch Regen beansprucht werden.

Bei der Wiederverfüllung der Baugrube vor der freigelegten Wand muss sichergestellt sein, dass die Abdichtung weder während der Arbeiten noch durch spätere Setzungen des Füllgutes beeinträchtigt wird.

⁴⁶ Vgl. Frössel (2001), S. 246

4.9 Nachträgliche Horizontalabdichtung

Ein vollständiges Sanierungskonzept einer nachträglichen Abdichtung beinhaltet neben der vertikalen Außenabdichtung auch immer eine funktionsfähige Horizontalabdichtung um, wie zu Beginn bereits erwähnt, eine wannenartige Umschließung des Bauwerks zu erreichen. Im Wesentlichen soll die kapillar aufsteigende Feuchtigkeit im Mauerquerschnittsbereich unterbunden werden. Hierfür eignen sich zum einen mechanische Verfahren, die den Feuchtetransport durch ein vollständiges Unterbrechen der Kapillarschicht verhindern. Zum anderen werden Injektionsverfahren eingesetzt, die eine Verfüllung oder eine Verengung der Kapillaren zum Ziel haben.

Auf die in der Praxis sehr umstrittenen elektro-physikalischen Verfahren wird nicht näher eingegangen. Sie entsprechen nicht den allgemein anerkannten Regeln der Technik.

Die Marktanteile der verschiedenen Verfahren zeigt die Graphik in Abbildung 4.12.

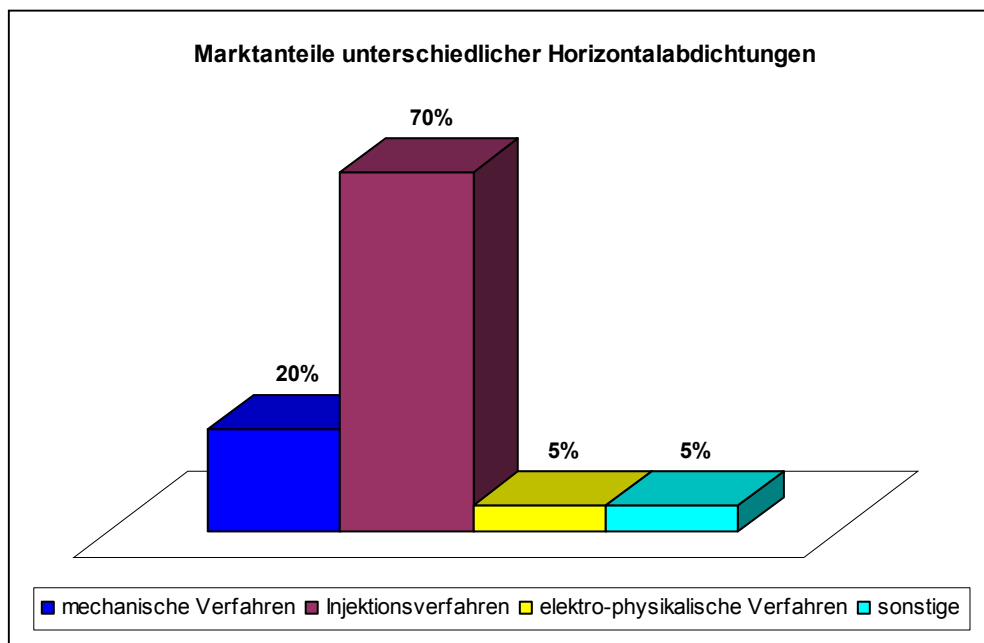


Abb. 4.12: Marktanteile nachträglicher Horizontalsperren [Frössel (2001), S. 138]

4.9.1 Mechanische Verfahren

Grundsätzlich bedarf es wegen des erheblichen Eingriffes in den Gebäudezustand in den meisten Fällen eines Standsicherheitsnachweises durch einen Statiker. Im Folgenden werden die unterschiedlichen mechanischen Verfahren erläutert.⁴⁷

Maueraustauschverfahren

Beim Maueraustauschverfahren, bei dem es sich um die älteste Methode handelt, werden stark salzbelastete und durchfeuchtete Mauerwerke schritt- und abschnittsweise in ihrer ganzen Stärke und Dicke ausgetauscht und erneuert.

Die Anwendung von Pressluftschlämmern ist nach Möglichkeit wegen der hohen Erschütterungen nur zu Beginn einzusetzen. Der Hauptteil der Arbeit liegt in dem Ausstemmen der Mauerwerksteile von Hand. Zum Schutz vor aufsteigender Feuchtigkeit werden vor der Erneuerung Dichtungsfolien oder -bahnen eingelegt.

Wegen des hohen Arbeitsaufwandes und der extremen statischen Belastung des Bauwerks während des Austauschvorgangs ist die Methode auf den Einsatz kleiner Bereiche beschränkt und wird nur noch selten eingesetzt. Ein Einsatz dieses Verfahrens wird in Erwägung gezogen, wenn ohnehin Arbeiten am Fundament auf Grund einer schlechten statischen Bausubstanz notwendig sind oder wenn einzelne salzgeschädigte Abschnitte ausgetauscht werden sollen.

Mauersägeverfahren

Beim Mauersägeverfahren wird das Mauerwerk in Abschnitten von etwa einem Meter unter Verwendung einer Mauer- oder Diamantseilsäge in der Lagerfuge aufgesägt (Trockenschnittverfahren).

Wenn es sich bei der zu sanierenden Wand um Naturstein oder zweischaliges Mauerwerk handelt und der Schnitt nicht in einer Lagerfuge erfolgen kann, muss das Sägeblatt während des Trennvorganges mit Wasser gekühlt werden (Nassschnittverfahren). Das Aufsägen kann entweder manuell oder maschinell erfolgen. Hierbei wird die Säge entlang einer am Bauteil angebrachten Vorrichtung geführt (siehe Abbildung 4.13).

Wenn Bauteildicken von über 70 cm getrennt werden müssen, ist ein Arbeiten von beiden Seiten unerlässlich, was natürlich das vorherige Freilegen der Außenwand erfordert.

Nach dem Herstellen einer Schnittfuge wird diese durch Keile gesichert und anschließend gesäubert. Danach wird eine Abdichtungsfolie aus Kunststoff, Aluminium, Blei oder aber ein korrosionsbeständiges Edelstahlblech eingeschoben. Die verbleibenden Hohlräume werden schnellstmöglichst verpresst, um die vollständige Standsicherheit des Gebäudes

⁴⁷ Vgl. Reul (2001), S. 182 ff.

wieder herzustellen. Es ist ebenfalls üblich, Kunststoffplatten mit einer ausreichenden Druckfestigkeit oberhalb der Dichtungsfolie einzubringen, um die kraftschlüssige Verkeilung des Mauerwerks zu ermöglichen.

Das Verfahren eignet sich gut bei durchgehenden Lagerfugen. In Abhängigkeit vom Bauteilquerschnitt, vom Mauerwerksverband und dessen Beschaffenheit können die Kosten stark variieren und schnell ansteigen.

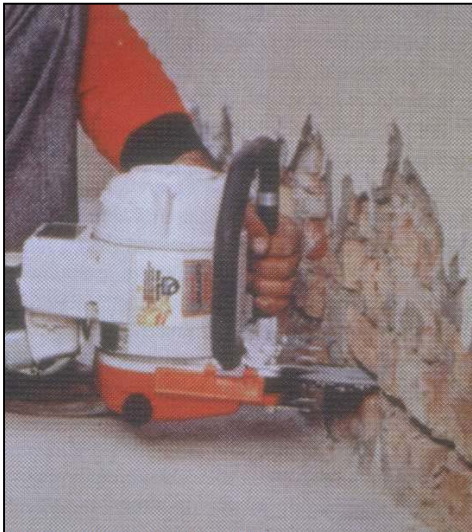


Abb. 4.13: Mauer sägemaßnahmen, links: manuell, rechts: fahrbar [Frössel (2001), S. 128 ff.]

Chromstahlblechverfahren

Im Gegensatz zum Mauer sägemaßnahmen werden beim so genannten Blecheinschlagverfahren gewellte Edelstahlbleche direkt mittels Drucklufthämmern mit Frequenzen von



1000 bis 1500 Schlägen pro Minute in die Lagerfuge des Mauerwerks eingetrieben (siehe Abbildung 4.14).

Voraussetzung ist eine durchgehende Lagerfuge, so dass sich das Verfahren nicht für ungleichmäßiges Natur- oder Bruchsteinmauerwerk eignet.

Der Vorteil liegt darin, dass auf ein nachträgliches Verpressen einer Schnittfuge verzichtet werden kann, da die mechanische Durchtrennung und die Abdichtung in einem Arbeitsgang erfolgen.

Abb. 4.14: Chromstahlblech im Mauerwerk [Frössel (2001), S. 132]

Als nachteilig kann sich ein nicht verdichtbarer Mörtel oder eine sich aufbauende Reibung beim Einbringen des Bleches erweisen. Ebenfalls besteht die Gefahr, dass sich aufsteigende kapillare Feuchtigkeit in den Rillen von zwei überschneidenden Blechen sammelt und dann weiter nach oben wandert.

Das Verfahren wird erfolgreich bei gleichmäßigem Ziegel- und Natursteinmauerwerk eingesetzt, wo Querschnitte bis zu einer Dicke von 65 cm ohne einen negativen Einfluss auf die Statik abgedichtet werden.

Kernbohrverfahren

Beim Kernbohrverfahren werden mit Bohrmaschinen, die mit Diamantkronen bestückt sind, abschnittsweise überlappende Kernbohrungen über den gesamten Bauteilquerschnitt ausgeführt. Die Durchmesser betragen je nach Verfahren 3 bis 4 cm (Massari-Verfahren) oder etwa 11 cm (Isobohrverfahren). Nach dem Reinigen der Bohrlöcher werden diese mit einem mineralischen Dichtmörtel verschlossen (siehe Abbildung 4.15).

Das Verfahren ist nicht abhängig vom Bauteilquerschnitt oder den Lagerfugen und kann somit bei fast allen Mauerwerksarten eingesetzt werden. Allerdings ist die Methode wegen der Verwendung von Diamantkronen sehr teuer.



Abb. 4.15: links: Ausbohren einer Bohrlochreihe, rechts: Verschluss mit Dichtmörtel
[Frössel (2001), S. 127]

V-Schnittverfahren

Im Gegensatz zum Mauersägeverfahren wird hier mit einer Trennscheibe unabhängig von der Lagerfuge das Mauerwerk von beiden Seiten unter einem Winkel von 10° bis 30° aufgeschnitten. Da der etwa 2 cm breite Schnitt nicht durch die gesamte Dicke des Querschnitts reicht, kann er über eine große Länge ausgeführt werden, ohne die Wand statisch zu gefährden.

Vor der Verfüllung des Schnittes wird dieser hydrophobiert, um dem einzufüllenden Mörtel nicht sofort das Wasser zu entziehen. In den Schlitz wird ein quellfähiger Vergussmörtel mit einem geringen w/z-Wert gefüllt, der eine kraftschlüssige Verbindung mit dem Mauerwerk bildet. Mit dem geringen w/z-Wert wird eine dampf- und wassersperrende Schicht erzielt. Der zweite Schlitz wird nun so ausgeführt, dass er den ersten kreuzt und eine durchgehende Lage Mörtel im Querschnitt entsteht. Auf der anderen Wandseite wird analog verfahren.

Bei größeren Mauerwerksdicken und bei mehrschaligem Mauerwerk findet das Verfahren keine Anwendung. Die Gefahr, dass Querschnittsteile in Hohlräume einbrechen und das Trenngerät verkeilen, ist zu groß.

Die Graphik in Abbildung 4.16 zeigt die Marktanteile der mechanischen Verfahren.

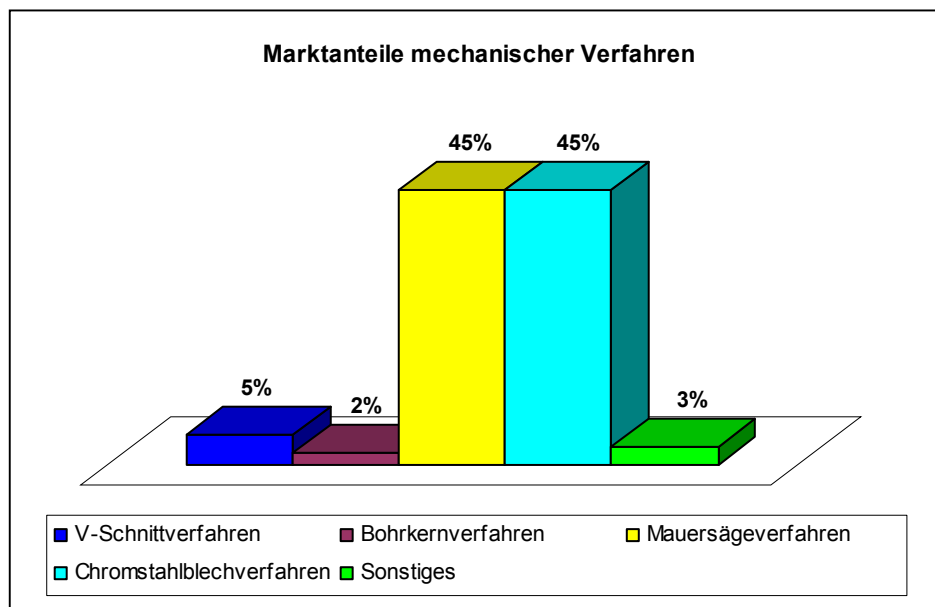


Abb. 4.16: Marktanteile mechanische Horizontalsperren [Frössel (2001), S. 128]

4.9.2 Injektionsverfahren

Die nötigen Voruntersuchungen zum Beispiel bezüglich der hygroskopischen Feuchtigkeit und des Durchfeuchtungsgrades sind in den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 beschrieben. Diese ermöglichen die Auswahl der Einbringungsverfahren und der geeigneten Injektionsstoffe. Diese werden in flüssigem Zustand mit oder ohne Druck in das Bauteil eingebracht und bilden dort eine horizontale Sperrschicht. Damit diese sich durchgängig ausbilden kann, ist ein homogener Bauteilquerschnitt Voraussetzung. Klüftige und inhomogene Mauerwerke müssen deshalb vor der eigentlichen Injektion zum Beispiel durch eine Vorinjektion mit Zementsuspension vorbereitet werden, um einem unkontrollierten Abfließen des Füllstoffes vorzubeugen.

Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen mechanischen Verfahren hängt der Injektionserfolg in erster Linie nicht nur von den handwerklichen Fähigkeiten ab, sondern wird im Wesentlichen durch die Wahl des geeigneten Systems mit dem entsprechenden Injektionsmittel bestimmt.

Als Einführung werden zunächst die physikalischen Wirkprinzipien erläutert (siehe auch Abbildung 4.17).⁴⁸

Wirkprinzipien der Injektionsverfahren

- Prinzip 1: Die Wirkstoffe lagern sich im Kapillarsystem ab und verdichten es im Extremfall komplett.
- Prinzip 2: Durch das Einbringen des Injektionsmittels wird der Durchmesser der Kapillaren verengt, wodurch die Sauggeschwindigkeit reduziert oder gegen Null geht. Das Prinzip basiert auf der Reaktion des Injektionsmittels mit den Kapillarwandungen, an denen Wasser abweisende Substanzen ausgeschieden werden und die Kapillarporen sich somit verengen.
- Prinzip 3: Eine dritte Alternative bildet die vollständige Hydrophobierung der Kapillaren. Die Wirkung wird durch eine Veränderung des Benetzungswinkels erzielt. Wenn dieser 90° überschreitet, entsteht eine negative kapillare Steighöhe, so dass die Kapillaren ihre Saugfähigkeit verlieren.
- Prinzip 4: Das letzte Prinzip stellt eine Kombination aus dem 2. und 3. Prinzip dar. Das heißt, die Kapillaren werden sowohl verengt als auch hydrophobiert.

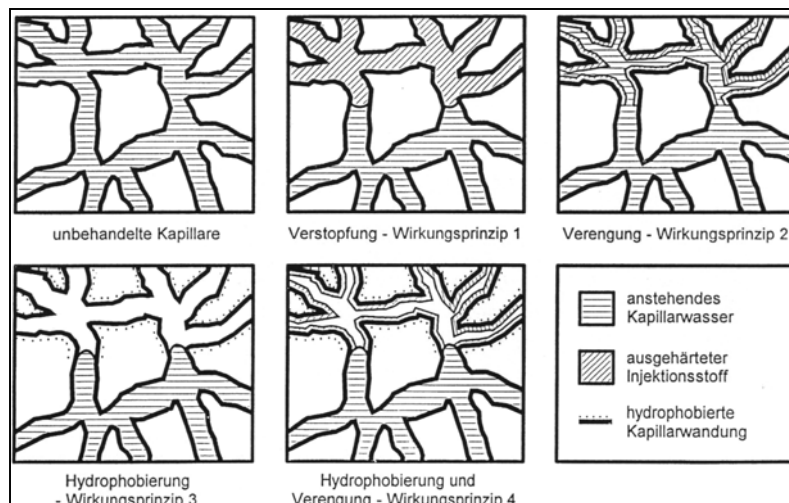


Abb. 4.17: Wirkprinzipien von Injektionsstoffen [Reul (2001), S. 184]

⁴⁸ WTA (2004), S. 6

Injektionsstoffe

Geeignete Injektionsmittel für eine nachträgliche Horizontalsperre müssen in feuchten, salzbelasteten Mauerwerken eine gute Eindringfähigkeit besitzen.

Die wichtigsten Mittel sind in Tabelle 4.1 unter Angabe des jeweiligen Wirkungsprinzips aufgeführt.

Injektionsmittel	Wirkungsprinzip
Paraffine	Kapillarverstopfung
Polyacrylatgel	Kapillarverstopfung
Siliconat	Kapillarhydrophobierung
Alkalisilikat/Alkalimethylsilikat	Verengung und Hydrophobierung
Siliconmikroemulsion	Kapillarhydrophobierung
Siloxane	Kapillarhydrophobierung
Polyurethanharz	Kapillarverstopfung
Epoxidharz	Kapillarverstopfung
Harzlösung	Verengung und Hydrophobierung
Polyurethangel	Kapillarverstopfung

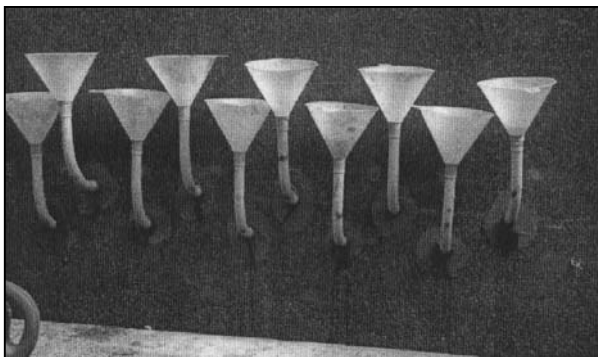
Tabelle 4.1: Injektionsmittel und Wirkungsprinzip

Durchführung einer Injektion

Grundsätzlich werden Mauerwerksinjektionen in Sockelhöhe sowie in den Außen- und Innenwänden eingesetzt. Die Ausführung beschränkt sich allerdings auf den Bereich oberhalb der Druck- oder Stauwasserzone, das heißt, Injektionen werden nicht im Druckwasserbereich eingesetzt.

Nachfolgend werden die unterschiedlichen Verfahrenstechniken beschrieben.

Drucklose Injektion



In der Regel wird die Injektion über trichterförmige Gefäße mittels Schwerkraft in das Bohrloch eingebracht (siehe Abbildung 4.18).

Die Verteilung erfolgt dann im Bauteil ausschließlich über Kapillarkräfte, möglichst bis zur Sättigung des Kapillar- bzw.

Abb. 4.18: Horizontale Injektionssperre [Warnecke (2002), S. 57]

Porenvolumens. Die Trichter werden ständig mit Injektionsmittel bevorratet, um den Penetrationsvorgang nicht zu unterbrechen. Daneben existieren noch weitere Verfahren, bei denen unter anderem das Material kontrolliert über Bohrlochlanzen abgegeben wird.

Um den Nachteil der Injektionsmaterialien bezüglich der Reaktionszeiten bis zur kapillarverengenden Wirkung auszugleichen, kann das Impulsverfahren angewandt werden. Hierbei wird beispielsweise durch eine Kompressorpumpe der Stoff über Infusionsröhren in das Mauerwerk geführt. Die Anzahl der Impulse ist von der Saugfähigkeit des Mauerwerks abhängig und ist entsprechend einzustellen.

Die Bohrlochabstände und die Tiefen sind in Abhängigkeit von der Wandstärke in Abbildung 4.19 dargestellt. Um die kapillare Saugfähigkeit nicht zu behindern, müssen die Bohrlöcher vor dem Verfüllen gereinigt werden.

Es ist zu erwähnen, dass eine drucklose Injektion nur bis zu einem Porenfüllgrad von 50 % zum Erfolg führt.⁴⁹ Bei einem höheren Durchfeuchtungsgrad ist auf die Druckinjektion zurückzugreifen, die nun beschrieben wird.

Druckinjektion

Mit der Druckinjektion ist es möglich, Porenräume zu füllen, die kapillar nicht zugänglich sind (zum Beispiel Luftporen), und die nur unter Druckeinwirkung beaufschlagt werden können.

Zur Verdeutlichung des vorhandenen Porenraums wird ein kurzes Beispiel angeführt. Ein Baustoff besitzt eine Wasserkapazität von $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^3$, also 220 l kapillar zugängliches Porenvolumen, welches auch scheinbares Porenvolumen genannt wird. Der gleiche Stoff besitzt eine Sättigungsfeuchte von $0,32 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Das heißt, dass in dem Stoff noch ein Restvolumen von zusätzlich $100 \text{ l}/\text{m}^3$ mit Injektionsgut gefüllt werden kann, allerdings nur unter Druck. Der maschinell aufgebrauchte und erforderliche Druck liegt bei etwa 10 bar.

Die Anordnung der Bohrlöcher ist der Abbildung 4.19 zu entnehmen.

Die Vorteile der Druckanwendung liegen somit unter anderem in der Möglichkeit einer vollständigen Verfüllung des vorhandenen Porenraumes. Außerdem wird das Mauerwerk schneller durchtränkt und die einzubringende Menge kann besser kontrolliert werden.

⁴⁹ Vgl. Kabrede (1998), S. 56

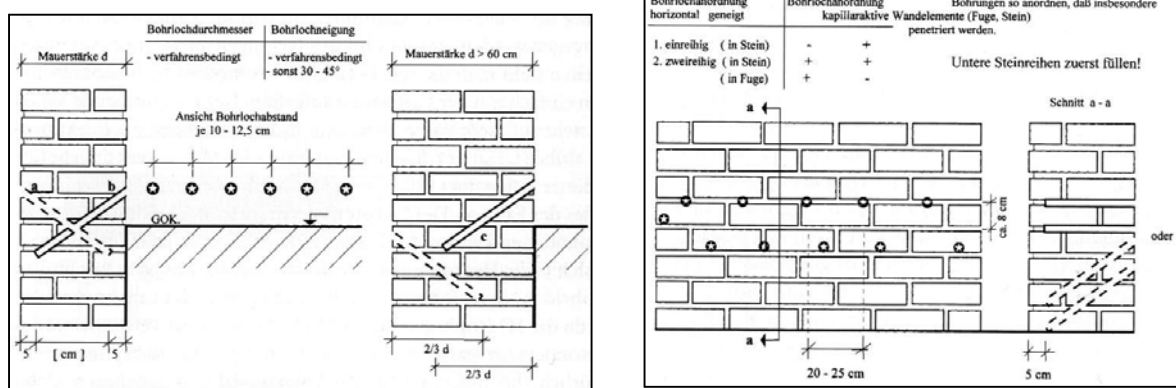


Abb. 4.19: Bohrlochanordnung, links: drucklose Injektion, rechts: Druckinjektion [Kabrede (2003), S. 87 ff.]

Mehrstufeninjektion

Eine Variante der Druckinjektion stellt die Mehrstufeninjektion dar. Diese wird vorwiegend bei Mauerwerken eingesetzt, die durch eine große Inhomogenität und Hohlräumigkeit sowie hohen kapillaren Durchfeuchtungsgraden gekennzeichnet sind.

Die Durchführung gliedert sich in drei Stufen. In der ersten Stufe erfolgt vor der eigentlichen Injektion eine Injektionsverfüllung mit Zementsuspensionen des inhomogenen Gefüges, um ein Auslaufen des danach einzubringenden Füllstoffes zu verhindern. Nach ungefähr einer Stunde wird in der zweiten Stufe unter einem Druck von 5 bis 10 bar mit einer lanzenartigen Vorrichtung eine Siliconmikroemulsion in dieselben Bohrlöcher injiziert (siehe auch Abbildung 4.20). Durch den hohen alkalischen Grad der ersten Beaufschlagung wird die Emulsion sofort aktiviert und bildet schnell einen hydrophoben Wirkstoff. Wenn das Mauerwerk eine gute Homogenität aufweist, wird auf die erste Stufe verzichtet und die Aktivierung der Siliconmikroemulsion geschieht nicht durch die Zementsuspension, sondern durch Silikate oder eine Kombination aus Alkalisilikaten und -silikonaten. Die Injektion erfolgt durch das Bohrloch aus Stufe zwei.⁵⁰



Abb. 4.20: Durchstoßen der mineralischen Vorinjektion [Kabrede (2003), S. 83]

⁵⁰ Vgl. Kabrede (2003), S. 81 ff.

4.10 Nachträgliche Innenabdichtung

Nachträgliche Innenabdichtungen (auch: Negativabdichtungen) sind lediglich eine Behelfsmaßnahme, falls es nicht möglich ist, eine Außenabdichtung auszuführen. Dies kann zum Beispiel dann der Fall sein, wenn angrenzende Neubauten errichtet worden sind oder als Lastfall drückendes Wasser vorherrscht und ein Freilegen der Außenwand dadurch nahezu unmöglich wird. Die Innenabdichtung gilt für alle drei Lastfälle der DIN 18195.

Im Unterschied zu der nachträglichen Außenabdichtung bleibt der Wandquerschnitt ständig durchfeuchtet. Aus statischer Sicht stellt dies in der Regel kein Problem dar. Allerdings ist die Wärmedämmung erheblich beeinträchtigt, und es kann an der kalten Bauteiloberfläche auf der Innenseite zu Kondensationserscheinungen kommen.

Des Weiteren ist ein nachträgliches Anbringen von Installationen und Befestigungen an der abgedichteten Wand mit Vorsicht zu genießen, da die Innenabdichtung dadurch zerstört und in ihrer Funktion beeinträchtigt wird.

Um zu verhindern, dass im Mauerwerk die Feuchtigkeit entlang der Innenabdichtung weiter nach oben wandert, muss oberhalb der Abdichtung zusätzlich eine nachträgliche Horizontalsperre eingebaut werden (siehe auch Abschnitt 4.8).

Nachfolgend werden die Verfahren zur nachträglichen Innenabdichtung vorgestellt. Hierbei werden grundsätzlich zementgebundene Abdichtungssysteme und Injektionsverfahren unterschieden.

4.10.1 Zementgebundene Abdichtungssysteme

Im Wandbereich werden zum größten Teil starre Dichtungsschlämme und teilweise auch WU-Beton eingesetzt. Diese gehen bei einer guten Untergrundvorbereitung den besten Verbund mit der Wandoberfläche ein.

Auf Grund eines eventuell salzbelasteten Mauerwerks und den dadurch entstehenden schädlichen Einfluss auf das Erstarren, Erhärten und auf die Dauerhaftigkeit des Systems sind sulfatbeständige Schlämme gut geeignet. Nachteilig sind die geringe Verformbarkeit und die daraus resultierende Anfälligkeit gegen Setzrisse und Verschiebungen. Die Auftragschichtdicken richten sich nach dem Lastfall und betragen 2 bis 4 mm.

Der Untergrund muss soweit vorbereitet werden, dass er tragfähig und offenporig ist. Hierfür eignen sich feste Strahlmittel oder Druckwasserstrahlen. Eine Ausführung ist der Abbildung 4.21 (links) zu entnehmen. Im Bereich einer Querwand muss diese aufgebrochen werden, um die nachträgliche Abdichtung durchgängig ausführen zu können (siehe Abbildung 4.21, rechts).

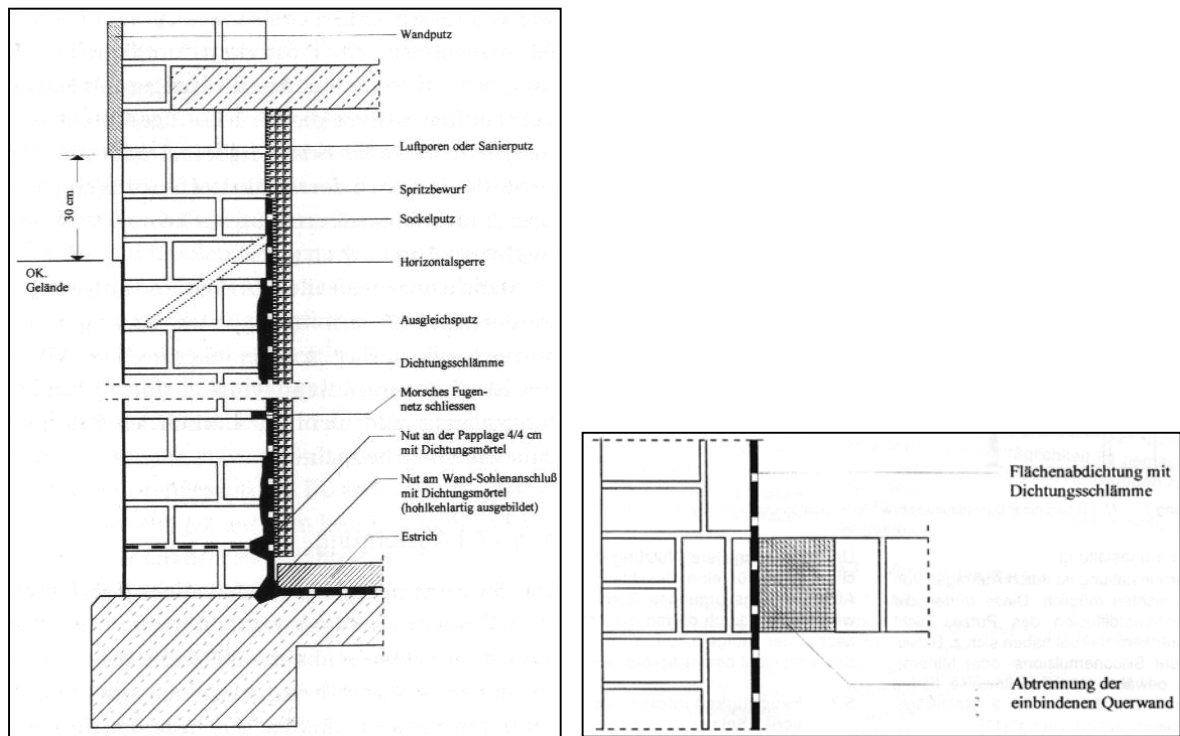


Abb. 4.21: links: Innenabdichtung mit Dichtungsschlämme, rechts: Mauerwerkstrennung [WTA (1998)]

Alternativ kann die vollständige Innenabdichtung auch durch eine Injektion in dem besagten Bereich erreicht werden.

Wenn Bodenabdichtungen erforderlich sind, werden diese in ähnlicher Weise ausgeführt wie die Wandflächenabdichtung. Sie müssen an diese angeschlossen werden.

Zusätzlich zu den Materialien der Wandabdichtung können auch KMB oder Dichtungsbahnen eingesetzt werden. Bei der Gefahr des Auftriebes muss für eine ausreichende Auflast durch eine konstruktive Tragschicht gesorgt werden.⁵¹

4.10.2 Flächeninjektionen

Mauerwerksinjektionen sind vor allem bei denkmalgeschützten Gebäuden eine Alternative zu der oben beschriebenen Form der Innenabdichtung, da die Sichtflächen erhalten bleiben. Zu nennen sind hier zum Beispiel alte Kellergewölbe, die nicht von außen abgedichtet werden können, da es bei einem Freilegen der Außenseite auf Grund des dann fehlenden Widerlagers zu statischen Problemen kommt.

Die Flächeninjektionen werden einerseits im Baugrund als Schleierinjektion und andererseits direkt im Bauteil ausgeführt und gelten für alle drei Lastfälle der DIN 18195.

⁵¹ WTA (1998), S. 9 ff.

Es werden sowohl Flächenabdichtungen als auch partielle Abdichtungen für Risse, Durchdringungen und Fugen ausgeführt.

Flächenabdichtung im Bauteil

Hierbei wird das Injektionsgut so eingebracht, dass eine vollflächige und durchgehende Abdichtungsebene im Bauteil entsteht. Die Injektion erfolgt über Packer in rasterartig herzustellenden Bohrungen. Durch die flächenhafte Injektion wird das für den Wassertransport zuständige Porensystem im Bauteil abgedichtet.

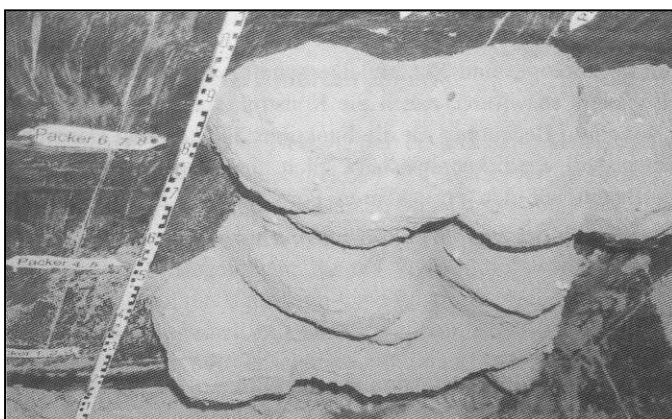
Es werden vorwiegend Acrylatgele mit einem mäßigen Druck unter 10 bar injiziert, da diese sich wegen ihrer niedrigen Viskosität gut im Baustoff verteilen.

Im Gegensatz zu der nachfolgend beschriebenen Schleierinjektion stellt die Abdichtung direkt in der Konstruktion die wirtschaftlichere Variante dar, weil erheblich weniger Material verbraucht wird. Die Abbildung 4.23 (links) stellt eine Ausführung dar.

Schleierinjektion im Baugrund

Wie in Abbildung 4.22 zu sehen, wird ein Dichtungsschleier außerhalb des Baukörpers direkt im angrenzenden Erdreich hergestellt. Dadurch wird das Bauteil komplett umschlossen und der Querschnitt kann somit im Prinzip komplett austrocknen.

Zur Herstellung des Injektionsschleiers wird das Bauwerk mit speziellen Packersystemen durch Rasterbohrungen vollständig durchstoßen. Das Abdichtungsmaterial verdrängt das vorhandene Wasser im Porengefüge des Bodens und bildet einen elastischen Injektionskörper. Der entstehende Gelschleier (siehe Abbildung 4.23, rechts) übernimmt die Abdichtungsfunktion gegen Bodenfeuchte, nicht drückendes und drückendes Wasser.



Ein Nachteil ist die Tatsache, dass die hergestellte Gelschleierinjektion weder bei der Herstellung noch im fertigen Zustand sichtbar ist.

Bezüglich der Raumnutzung ist zu beachten, dass die Injektionsabdichtung keine wasserdampfsperrende Wirkung hat, wodurch der

Abb. 4.22: Bildung eines Gelschleiers [Haack (2003), S. 335]

Raum durch die Wasserverdunstung aus dem Bauteil immer eine erhöhte Luftfeuchte ähnlich dem Prinzip einer Weißen Wanne hat.

Ein wesentlicher zu beachtender Aspekt ist, dass an der Wandaußenseite keine Schwarzabdichtungen vorhanden sein dürfen, da dort die erforderliche Haftung des Injektionsgutes nicht gewährleistet ist.⁵²

Das Verfahren ist bei folgenden Anwendungen bereits erfolgreich durchgeführt worden:

- Abdichtung von undichten Wand-Sohlen-Anschlüssen in Weißen Wannen (Tiefgaragen bei drückendem Wasser)
- Nachträgliche Abdichtung von Kellerräumen in drückendem Wasser
- Nachträgliche Flächenabdichtung unter WU-Bodenplatten
- Nachträgliche Abdichtung von Tunnelbauwerken
- Abdichtung undichter Dehnungsfugen
- Brückenabdichtung von Gewölbebrücken

Die Verfahren derartiger Injektionen gehören noch nicht generell zu den allgemein anerkannten Regeln der Technik, und es liegen noch keine Regelwerke vor. Lediglich die Deutsche Bahn AG hat eine Richtlinie mit Hinweisen für die Planung und Durchführung von Vergelungsmaßnahmen entwickelt.

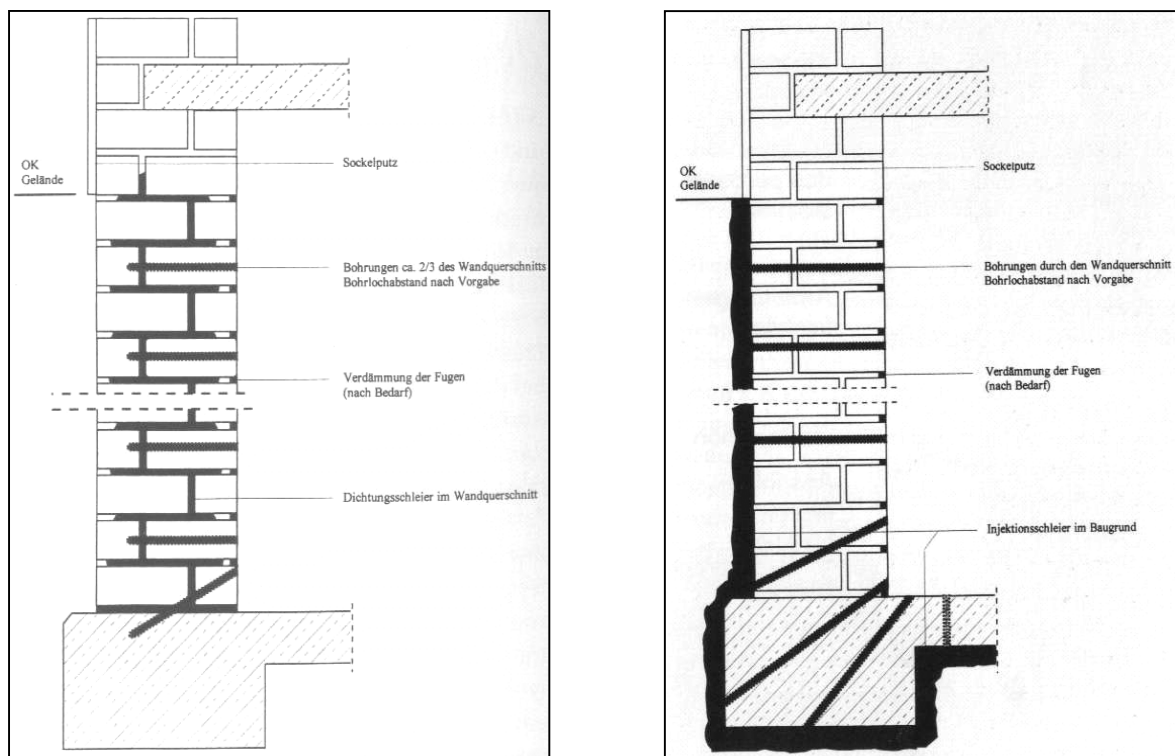


Abb. 4.23: Flächeninjektion, links: im Bauteil, rechts: im Baugrund [WTA (1998)]

4.11 Übersicht der Abdichtungsmaßnahmen

In Tabelle 4.2 sind abschließend die Abdichtungsmaßnahmen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Lastfälle bzw. Beanspruchungen zusammengestellt.

Lastfall/Beanspruchung	Außenabdichtung	Innenabdichtung	Injektion
Bodenfeuchte	x	x	x
Nichtstauendes Sickerwasser	x ⁽¹⁾	x	x
Drückendes Wasser/ Aufstauendes Sickerwasser	x ^(2 und 3)	x ^(2 und 3)	x ^(2 und 3)
Feuchtigkeit infolge Hygroskopizität von Salzen	-	-(4)	-
Tauwasser/ Kondensationsfeuchtigkeit	-(5)	-(5)	-(5)

**Tabelle 4.2: Abdichtungsmaßnahmen abhängig von der Wasserbeanspruchung
[WTA (E 4-6-03/D)]**

- (1) Wenn der Baugrund aus bindigem oder schwach durchlässigem Boden besteht ($k \leq 10^{-4}$ m/s), ist eine Dränung gemäß DIN 4095 auszuführen; ansonsten ist eine Abdichtung gegen drückendes Wasser vorzusehen
- (2) nur bei wasserdichtem Anschluss an angrenzende wasserundurchlässige Bauteile (z.B. Bodenplatte)
- (3) die Standsicherheit des Bauwerks und des Abdichtungsuntergrunds ist nachzuweisen bzw. zu überprüfen
- (4) liegt ausschließlich eine hygroscopische Feuchtigkeitsaufnahme vor, ist Stand der Technik, ein WTA-Sanierputz aufzubringen
- (5) Wärmedämmung/Dampfsperre ist je nach Nutzung erforderlich

Im folgenden Kapitel werden die physikalischen Grundlagen der Feuchtetransportvorgänge im Beton beschrieben. Dies dient dazu, auf die spezielle Problematik einer höherwertigen Nutzung von wasserundurchlässigen Bauwerken hinzuweisen.

⁵² Haack (2003), S. 324 ff.

5 Physikalische Grundlagen des Feuchtedurchgangs durch Beton

Um die einzelnen Wassertransportvorgänge im Beton nachvollziehen zu können, ist es notwendig, eine Vorstellung über die Ursachen der Wasserdurchlässigkeit zu erlangen. Deshalb werden vor der Beschreibung der einzelnen Wassertransportmechanismen zunächst die Betoneigenschaften dargelegt, aus denen ein Feuchtetransport bei hygroskopisch porösen Baustoffen resultiert.⁵³ Die Beschreibung der physikalischen Grundlagen der Feuchtetransportvorgänge dient dem Verständnis der in Kapitel 6 durchgeführten Berechnungen der Feuchteströme durch ein Bauteil in den Raum.

Einführend ist anzumerken, dass es sich bei Beton um einen Baustoff handelt, der bei der richtigen Zusammensetzung und Verarbeitung von sich aus wasserundurchlässig ist.⁵⁴⁺⁵⁵⁺⁵⁶

WU-Beton ist nach der DIN 1045 herzustellen, wobei zusätzlich die WU-Richtlinie⁵⁷ beachtet werden sollte. Die neue Bezeichnung nach DIN 1045-2 für wasserundurchlässigen Beton lautet „Beton mit hohem Wassereindringwiderstand“. Im Weiteren wird aber auf Grund der besseren Verständlichkeit von WU-Beton gesprochen.

Für wasserundurchlässige Bauwerke kommt nur Beton zur Anwendung, der mindestens der Festigkeitsklasse C 25/30 entspricht. Dieser sollte nach Möglichkeit unter den Bedingungen für Beton B II hergestellt werden. Dies bedeutet, dass auf der Baustelle eine Eigen- und eine Fremdüberwachung durchgeführt werden müssen. Die DIN 1045 lässt unter Einhaltung des Sieblinienbereiches für den Zuschlag und eines Mindestzementgehaltes (A 16/B 16 $\rightarrow \geq 370 \text{ kg/m}^3$ oder A 32/B 32 $\rightarrow \geq 350 \text{ kg/m}^3$)⁵⁸ auch Baustellen zu, die nur für Beton B I zugelassen sind. Unter diesen Bedingungen sollten allerdings ausschließlich untergeordnete Bauteile hergestellt werden. Die zusätzliche Anforderung, einen Nachweis der maximal zulässigen Wassereindringtiefe von 50 mm bei einer 72-stündigen Druckbeanspruchung von 5 bar zu erbringen, schreibt die DIN 1045 (2001-07) nicht mehr zwingend vor. Wenn trotzdem ein Nachweis erfolgen soll, sind das Verfahren und die Konformitätskriterien zwischen dem Verfasser der Festlegungen und dem Hersteller zu vereinbaren. Alternativ zu einer Prüfung können auch Grenzwerte für die Betonzusammensetzung festgelegt werden.⁵⁹

Der Beton besitzt grundsätzlich die Eigenschaft, dass bei einseitiger Wassereinwirkung die Oberfläche der wasserabgekehrten Seite auf Dauer trocken erscheint. Dazu kommt

⁵³ Vgl. Lohmeyer (1993), S. 18 ff.

⁵⁴ Vgl. Lohmeyer (1995), S. 27

⁵⁵ Mitarbeiter Beton Marketing Nord GmbH

⁵⁶ Dipl. Ing. Uwe Gronau

⁵⁷ Vgl. DAFStb (2003)

⁵⁸ Vgl. DIN 1045, 6.5.7.2

⁵⁹ Vgl. Bauberatung Zement (2002), S. 6

es, wenn auf der Rauminnenseite mehr Wasser an die Raumluft abgegeben wird, als von außen eindringt.

Die Voraussetzung dafür ist ein möglichst dichtes Betongefüge, welches entsteht, wenn die Zusammensetzung des Zementleimes so erfolgt, dass möglichst wenig Kapillaren vorhanden sind. Die Wasserundurchlässigkeit des Betons kann jedoch durch Risse beeinträchtigt werden. Diese Gefahr kann durch konstruktive Maßnahmen nach dem Prinzip der Weißen Wanne gemindert werden. Das heißt, dass entstehende Risse, die zum Beispiel durch Zugspannungen infolge einer Lasteinwirkung entstehen, auf ein Mindestmaß reduziert werden.

Eine Besonderheit bilden Risse, die sich auf Grund einer Selbstheilung des Betons wieder schließen. Auf dieses Phänomen wird nach den folgenden Ausführungen der Betoneigenschaften eingegangen. Es ist teilweise zu beobachten, dass auf der wasserabgekehrten Seite einer Außenwand zunächst feuchte Stellen zu erkennen sind, die mit der Zeit geringer werden und letztendlich gar nicht mehr vorhanden sind. Die Kenntnis dieser besonderen Betoneigenschaft ist wichtig, da unter Umständen voreilig auf eine undichte Stelle im Bauwerk geschlossen wird und unnötige Sanierungsmaßnahmen eingeleitet werden.

5.1 Porosität des Betons

Bei den Zuschlägen, die etwa 70 % des Betons ausmachen, ist das Gefüge so beschaffen, dass die in den Körnern eingeschlossenen Poren keinen Einfluss auf die Porosität des Betons haben. Anders verhält es sich mit dem Zementstein, dessen Anteil am Beton ungefähr 30 % ausmacht. Das Zementsteingefüge ist mit unterschiedlichen Poren verschiedener Größe durchsetzt. Diese Poren werden im Folgenden beschrieben.

Verdichtungsporen

Verdichtungsporen (10^1 bis 10^2 mm) entstehen bei unzureichender Verdichtung des Betons. Sie machen etwa 1,5 Vol.-% aus und haben keinen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit.

Künstliche Luftporen

Künstliche Luftporen (10^0 bis 10^{-3} mm) werden dem Beton in Form von Luftporen bildenden Zusatzmitteln beigemischt, die die Frostbeständigkeit des Betons erhöhen. Die kugelförmigen Poren unterbrechen die Kapillarporen und nehmen den Wasserdruck bei Gefrieren auf. Der Einfluss auf die Wasserundurchlässigkeit ist ebenfalls zu vernachlässigen.

Schrumpfporen

Schrumpfporen (10^{-4} bis 10^{-5} mm) entstehen dadurch, dass bei der Hydratation der Zement etwa 25 % seines Wassers chemisch bindet. Dieses verliert dabei ca. $\frac{1}{4}$ seines Volumens und gehört daraufhin zum Zementstein. Durch diesen Vorgang entstehen Poren, wobei auch diese in Bezug auf die Wasserdurchlässigkeit keine Bedeutung haben.

Gelporen

Auf physikalische Weise bindet der Zement bei der Hydratation etwa 10 % seines Gewichts an Wasser. Dieses für die vollständige Hydratation erforderliche Gelwasser bildet die Gelporen (10^{-5} bis 10^{-6} mm), hat aber keinen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit.

Kapillarporen

Die Kapillarporen (10^{-1} bis 10^{-5} mm) entstehen entweder durch Überschusswasser, das bei der Hydratation nicht benötigt wird oder durch verdunstetes Wasser während der Hydratation. Je niedriger der w/z-Wert ist und je weiter die Hydratation fortschreitet, desto weniger Kapillarporen entstehen im Zementstein. Die Kapillarporen sind im Wesentlichen für die Wasserdurchlässigkeit des Betons verantwortlich.

Kapillarporosität

Die Wasserdurchlässigkeit wird beinahe ausschließlich von der Kapillarporosität des Zementsteins bestimmt. In Abbildung 5.1 ist im oberen Teil die Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit vom Anteil der Kapillarporen dargestellt. Im unteren Teil wird der Zusammenhang zwischen dem Anteil an Kapillarporen, dem w/z-Wert und dem Hydratationsgrad aufgezeigt.

Kapillarporen entstehen erst ab einem w/z-Wert von 0,40. Danach nimmt die Kapillarporosität stark zu und ab einem w/z-Wert von 0,55 bis 0,60 entsteht ein zusammenhängendes Kapillarporensystem (siehe auch Abbildung 5.1, oben).⁶⁰

Bei WU-Beton darf der maximale w/z-Wert von 0,60 nicht überschritten werden.

Eine vorzeitige Unterbrechung der Hydratation zum Beispiel durch Verdunstung des benötigten Wassers bewirkt ebenfalls eine Erhöhung des Kapillarporenanteils (siehe Abbildung 5.1 unten).

⁶⁰ Vgl. Rostasy (1978), S. 50 ff.

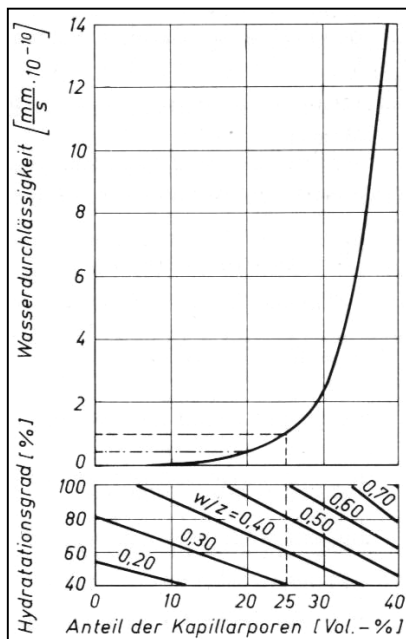


Abb. 5.1: Wasserdurchlässigkeit des Zementsteins bei unterschiedlicher Kapillarporosität, abhängig vom w/z-Wert und vom Hydratationsgrad (nach T. C. Powers) [Lohmeyer (1993), S. 21]

Im Weiteren wird kurz auf die eingangs erwähnte Besonderheit des Feuchtedurchganges sowie dessen Ursache im Bereich von sehr feinen Rissen eingegangen.

5.2 Selbstheilung des Betons

In Stahlbetonbauteilen und damit auch in Weißen Wannern sind Risse in der Konstruktion nicht zu vermeiden. In feinen, durchgehenden Rissen kann der Widerstand gegen das durchfließende Wasser so hoch sein, dass auf der Innenseite die Verdunstung über dem Wasserdurchtritt liegt und dadurch eine Durchfeuchtung der Oberfläche ausbleibt.

Wie zu Beginn bereits beschrieben, ist teilweise zu beobachten, dass auf der wasserabgekehrten Seite zunächst feuchte Stellen zu beobachten sind, die mit der Zeit geringer werden und letztendlich gar nicht mehr vorhanden sind. Dies kann auf die Selbstheilung des Betons zurückgeführt werden. Die Erfahrungswerte für die maximal zulässigen Rissbreiten sind der Tabelle 5.1 zu entnehmen.

Druckgefälle Wasserdruck h_w / Bauteildicke d [m/m]	Rechnerische Rissbreite W_{cal} [mm]
$\leq 2,5$	0,20
$\leq 5,0$	0,15
$> 5,0$	0,10

Tabelle 5.1: Rechnerische Rissbreiten für die Selbstheilung [Lohmeyer (1995), S. 193]

Ursachen zur Selbstheilung des Betons

Als mögliche Ursachen, die zu einer Selbstheilung des Betons führen, werden zum einem chemische und physikalische und zum anderen mechanische Vorgänge unterschieden, die sich folgendermaßen ergeben und im Weiteren näher beschrieben werden:⁶¹

1. Chemisch/physikalisch
 - Quellen des Betons
 - Fortschreitende Hydratisierung des Betons
 - Karbonatisierung des Betons
2. Mechanisches Zusetzen
 - Feststoffe im Wasser
 - Abplatzungsprodukte bei der Rissbildung

Quellen des Betons

Das auf Grund von einer Druckbeanspruchung eindringende Wasser in die Risse führt zum Quellen des Betons. Dies führt allerdings lediglich zu einer Verringerung der Rissbreite von etwa 0,01 mm und hat somit nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Selbstheilung.

Hydratisierung des Betons

Bei der Hydratisierung wird ein Teil des Anmachwassers chemisch an den Zement gebunden, was eine Zunahme des Feststoffvolumens zur Folge hat. Der Vorgang findet zunächst nur an der Oberfläche des Zementkornes statt, wobei sich ein Gel mit einer wasserabdichtenden Wirkung bildet. Dies führt zu einer Verlangsamung des Hydratationsvorganges. Wenn im Beton nun Risse entstehen, werden die nicht voll hydratisierten Zementkörner aufgespaltet. Durch das eindringende Wasser wird die Hydratisierung unter einer Volumenausdehnung weiter fortgesetzt und der Riss wird zugesetzt. Dieser Prozess stellt eine der Hauptgründe dar, die eine Selbstheilung hervorrufen.

Karbonatisierung des Betons

Bei der Karbonatisierung entsteht durch eine Reaktion von Kohlensäure mit dem im Zement vorhandenen Kalziumhydroxid das wasserunlösliche Kalziumcarbonat. Die Kohlensäure wird durch das einströmende Wasser in den Rissen eingetragen und das Reaktionsprodukt verstopft den Riss.

⁶¹ Vgl. Ripphausen (1989), S. 31

Feststoffe im Wasser

Dringt Wasser durch Risse ein, besteht die Möglichkeit, dass dieses Feststoffpartikel wie zum Beispiel Feinsande oder Rost mit sich führt und dadurch den Riss zusetzt. Einen entscheidenden Faktor spielt hierbei die Rissbeschaffenheit, das heißt, ob die Rissufer parallel zueinander sind oder der Rissverlauf stark verwinkelt ist.

Des Weiteren können im Wasser gelöste Stoffe nach dem Eindringen in den Riss ausfällen und ihn somit zusetzen.

Abplatzungsprodukte bei der Rissbildung

Wenn es zu einer Rissbildung kommt, platzen an der Rissoberfläche kleine Teilchen ab. Kommt es zu einem Wasserdurchgang im Riss, werden die Abplatzprodukte mittransportiert und verkeilen sich so, dass der Riss verstopft wird. Außerdem schließen die Teilchen noch nicht voll hydratisierte Zementkörner auf, was wiederum zu einer Nachhydratation führt.

Vorteilhaft für das mechanische Zusetzen sind unterschiedliche Rissbreiten, da sich die Feinstteile an den engeren Stellen ablagern können. Problematisch ist es, wenn sich im Laufe der Zeit die Rissbreite verändert, weil dadurch die festgesetzten Teile wieder gelöst werden und weggespült werden können.

Im Folgenden werden nun die physikalischen Grundlagen der Feuchtespeicherung sowie die damit verbundenen Feuchtetransportvorgänge im Beton dargestellt.

5.3 Feuchtespeicherung

Grundsätzlich ist der Feuchtehaushalt von hygroskopischen porösen Baustoffen durch die Feuchtespeichereigenschaften und durch die Feuchtetransportvorgänge in gasförmiger und flüssiger Form gekennzeichnet.

Bevor die Wassertransportmechanismen in Betonbauteilen beschrieben werden, wird zunächst auf die Feuchtespeicherung von porösen mineralischen Baustoffen eingegangen. Es werden drei Bereiche unterschieden, der Sorptionsfeuchtebereich (Bereich A), der Kapillarwasserbereich (Bereich B) sowie der Übersättigungsbereich (Bereich C) (siehe auch Abbildung 5.2), auf die nachfolgend näher eingegangen wird.

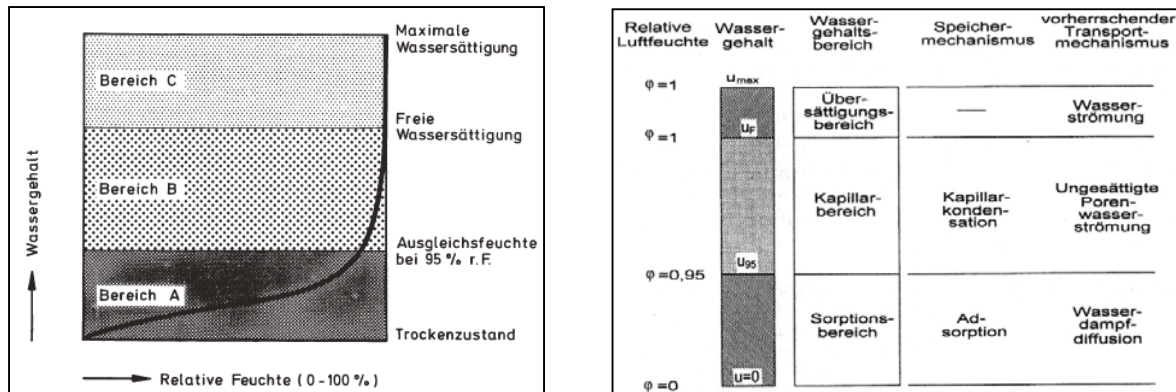


Abb. 5.2: Feuchtespeicherfunktion bzw. Wassergehaltsbereich eines hygroskopisch kapillaraktiven Baustoffes
 [Künzel (1994), S. 8 ; Klopfer (2002), S. 344]

Sorptionsfeuchtebereich

Der Sorptionsfeuchtebereich (auch: hygroskopischer Bereich) wird durch die Anlagerung (Adsorption) von Wassermolekülen aus der umgebenden feuchten Luft bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes bestimmt. Die Anreicherung erfolgt bei porösen Stoffen an der Oberfläche der Poren und kann sowohl an der Außenseite als auch im Inneren des Baustoffes erfolgen.

Die Gleichgewichts- bzw. Ausgleichsfeuchte liegt bei etwa 95 %, wobei sich die anfallenden Wassergehalte durch die Wasserdampfsorption ergeben.

In diesem Bereich wird der Zusammenhang zwischen der Menge des angelagerten Wassers und der relativen Luftfeuchte durch Sorptionsisotherme charakterisiert (siehe Abbildung 5.3). Der Temperatureinfluss ist bei bauphysikalischen Betrachtungen zu vernachlässigen.⁶²

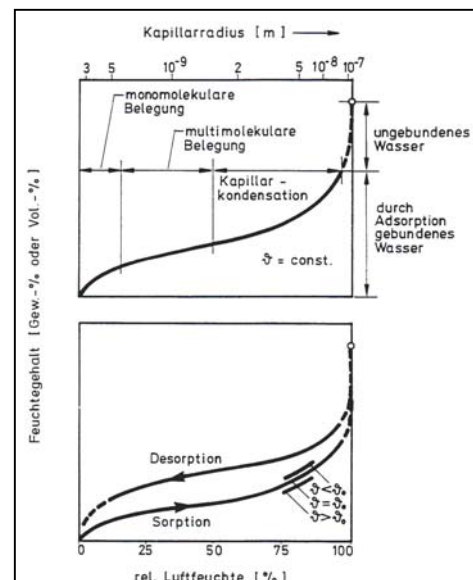


Abb. 5.3: Sorptionsisotherme eines hygroskopischen porösen Baustoffes
 [Krus (1995), S. 8]

Grundsätzlich vollzieht sich die Anlagerung der einzelnen Wassermoleküle unter einem exothermen Vorgang, das heißt unter Wärmeabgabe. An den inneren Oberflächen der Poren treten durch hohe Bindungsenergien bei höheren relativen Luftfeuchten mono- und multimolekulare Feuchteschichten auf. Der Vorgang der Anlagerung von Wassermolekülen an porösen Baustoffoberflächen bis zum Gleichgewicht zwischen der Wasseraktivität in der Luftfeuchtigkeit und den eben angesprochenen Schichten lässt sich gut mit der

⁶² Vgl. Künzel (1994), S. 9

BET-Theorie beschreiben, die auf den Erkenntnissen von Brunauer, Emmett und Teller aus dem Jahre 1938 basiert.

In Abbildung 5.3 (oben) sind die charakteristischen Eigenschaften eines hygroskopischen Baustoffes dargestellt, wobei die ungefähren Bereiche für das Auftreten der Sorptionseffekte aufgeführt sind. Der linke Bereich bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von 15 % ist durch eine monomolekulare Belegung der Feststoffoberfläche bestimmt und geht dann in einen linear ansteigenden Bereich multimolekularer Belegung bis zu einer relativen Luftfeuchte von etwa 50 % über. Der daraufhin fortschreitende Bereich wird der Kapillarkondensation zugeschrieben. Dies hat zur Folge, dass im Mikroporenbereich zwischen 2×10^{-9} m und 10^{-7} m Kondensationserscheinungen auftreten, die auf das Gesetz von Kelvin-Thomson zurückzuführen sind. Dieses beschreibt den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und dem Kapillarradius, bis zu dem die Poren durch Kapillarkondensation gefüllt sind.⁶³

Der typische S-förmige Verlauf der Isotherme von porösen Baustoffen weist häufig zwischen der Feuchteaufnahme und -abgabe den so genannten Hystereseeffekt auf (siehe auch Abbildung 5.3, unten). Dies bedeutet, dass die beiden Verläufe nicht exakt identisch sind, was unter anderem auf die unterschiedlichen Benetzungseigenschaften bei der Adsorption und der Desorption zurückzuführen ist.

Allerdings ist der Effekt bei den meisten Baustoffen zu vernachlässigen und somit werden für die Sorptionsisotherme entweder die Adsorptionsisotherme oder bei größeren Abweichungen eine Mittelung der Adsorptions- und der Desorptionsisotherme angegeben.⁶⁴

So kann mit Hilfe von Sorptionsmessungen, die bis zu einer relativen Luftfeuchte von ungefähr 95 % durchführbar sind, eine eindeutige Zuordnung des Wassergehalts eines Baustoffes zur relativen Luftfeuchte stattfinden.

Kapillarwasserbereich

Der Kapillarwasserbereich (auch: überhygroskopischer Bereich) beschreibt den Bereich ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %, bei der die Sorptionsisotherme stark ansteigt. Hier ist eine eindeutige Zuordnung des Wassergehaltes zur relativen Luftfeuchte nicht mehr möglich, da es kein Messverfahren gibt, mit dem die Luftfeuchtigkeit mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann.

Der Bereich ist durch die Eigenschaft von kapillarporösen Materialien gekennzeichnet, Wasser bis zum Erreichen der freien Wassersättigung u_F (auch: freiwilliger Wassergehalt) aufnehmen zu können. Dies geschieht zum einen durch den Kontakt mit flüssigem Wasser und zum anderen durch den Kontakt mit einem anderen überhygroskopisch feuchten

⁶³ Vgl. Gertis (1980), S. 19 ff.

⁶⁴ Vgl. Künzel (1982)

Stoff, bis ein Gleichgewicht erreicht wird. Somit erfolgt die Wasseraufnahme im Gegensatz zum Sorptionsfeuchtebereich nicht durch den Kontakt mit feuchter Luft, sondern ausschließlich über den Kontakt mit flüssigem Wasser.

Die freie Wassersättigung gibt jene Stofffeuchte an, die durch freies Saugen ohne Einwirkung von äußeren Kräften unter Normaldruck erreicht werden kann. Die in einigen Poren eingeschlossene Luft verhindert ein Erreichen des maximal möglichen Wassergehaltes u_{\max} , welcher einer völligen Füllung aller dem Wasser zugänglichen Hohlräume entspricht. Der Mechanismus des kapillaren Saugens folgt dem Zylinderkapillarenmodell, das im Vergleich zu den tatsächlich vorhandenen Verhältnissen im Porensystem eines porösen Baustoffes nur eine grobe Näherung darstellt. Auf den genauen Vorgang wird im Abschnitt 5.4 eingegangen.

Auf Grund der starken Vereinfachung zur quantitativen Erfassung der kapillaren Saugkräfte ist es sinnvoller, den kapillaren Unterdruck direkt aus den Porengrößen zu ermitteln. Über die oben bereits erwähnte Kelvinformel (siehe Gleichung 5.1) kann die relative Luftfeuchte über einer konkav gekrümmten Wasseroberfläche und dem sich einstellenden kapillaren Unterdruck berechnet werden.

$$\varphi = \exp \left(- \frac{P_k}{\rho_w \times R_D \times T} \right) \quad (\text{Gl. 5.1})$$

mit	P_k	kapillarer Unterdruck [Pa]
	ρ_w	Rohdichte Wasser [kg/m ³]
	R_D	Gaskonstante für Wasserdampf [J/kgK]
	T	Temperatur [K]

Wenn nun durch Messungen die Abhängigkeit des Gleichgewichtswassergehaltes eines Baustoffes vom kapillaren Unterdruck in den gerade noch gefüllten Poren ermittelt wird, so ist durch Gleichung 5.1 auch für den Kapillarwasserbereich ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der relativen Luftfeuchtigkeit gegeben.

Die sich einstellende Saugspannung eines kapillarporösen Stoffes wird in Abhängigkeit vom Wassergehalt in der Saugspannungskurve dargestellt. Diese ergibt die Speicherfunktion für den Kapillarwasserbereich.

Übersättigungsbereich

Eine Überschreitung der freien Wassersättigung ist nur durch die Anwendung eines äußeren Drucks (zum Beispiel Grundwasser), dem Anlegen eines Unterdruckes oder einer lan-

langen Wasserlagerung zum Entfernen der Luftporen sowie durch Kondensation beim Erreichen des Taupunkts möglich.

Die relative Luftfeuchte beträgt unabhängig vom Wassergehalt 100 %, und es liegen keine Gleichgewichtszustände mehr vor.

Eine Zuordnung des Wassergehaltes zur Saugspannung ist im Übersättigungsbereich nicht möglich, da sich beim Füllen einer bislang durch eine Luftblase eingeschlossene Pore zwar der Wassergehalt ändert, die Saugspannung hingegen nicht.

5.4 Wassertransportmechanismen

Wasser kann durch Bauteile aus (wasserundurchlässigem) Beton sowohl in dampfförmigem als auch in flüssigem Zustand durchtreten.

Grundsätzlich setzt ein Feuchtetransport nur dann ein, wenn zwischen dem Bauteil und der Umgebung ein unterschiedlicher Feuchtezustand vorherrscht, der ausgeglichen werden muss. Je nach Wirkungsrichtung des Feuchtstromes unterscheidet man die Sorption (Wasseraufnahme), die Desorption (Wasserabgabe) sowie die Permeation (Wasserdurchgang). In dampfförmigem Zustand unterscheidet man die Wasserdampfdiffusion und die Effusion. In flüssigem Zustand wird das Wasser mittels Kapillarkräften sowie laminarer Sickerströmung durch das Bauteil transportiert.⁶⁵ Die Oberflächendiffusion zählt ebenfalls zu den Transportphänomenen des flüssigen Zustandes.

Eine Übersicht der Transportvorgänge in porösen Baustoffen ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Die Knudsenzahl Kn , die die Mechanismen in unterschiedliche Bereiche einteilt, wird nachfolgend erläutert.

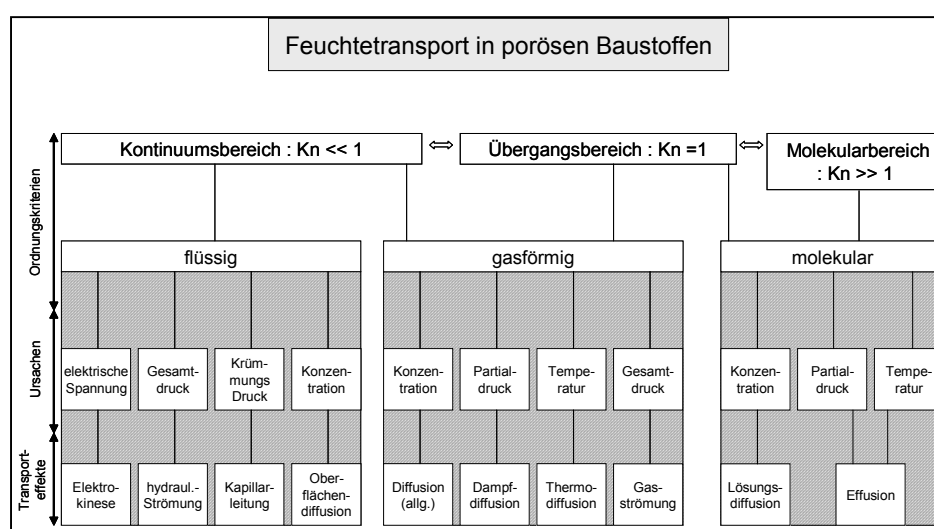


Abb. 5.4: Übersicht der Feuchtetransportphänomene
[Kießl (1983), Anhang, modifiziert]

⁶⁵ Vgl. Cziesielski (1995), S. 131 ff.

Diffusion

Bei der Diffusion handelt es sich um einen Stofftransport, der auf der Eigenbeweglichkeit von Teilchen oder Molekülen infolge ihres Energiegehaltes beruht. Dieser Prozess wird auch als Brown'sche Molekularbewegung bezeichnet.⁶⁶ Die antreibende Kraft dieses Transportvorgangs ist die Differenz des Wasserdampfpartialdruckes auf beiden Seiten des Bauteils oder ein Konzentrationsgefälle. Der Wasserdampf wandert von Orten mit hohem Wasserdampfpartialdruck zu Orten mit niedrigem Wasserdampfpartialdruck. Diesem Vorgang wirkt der Diffusionswiderstand der Baustoffe entgegen, der im Wesentlichen von der Porengeometrie abhängig ist.

Für die Bewegung der einzelnen Wassermoleküle ist das Verhältnis der freien Weglänge der Moleküle zur Porengröße maßgebend.

Dies wird durch die Knudsenzahl (siehe auch Abbildung 5.4) beschrieben, die für Kapillaren wie folgt lautet:

$$Kn = \frac{\lambda}{2 \times r} \quad (\text{Gl. 5.2})$$

mit Kn Knudsenzahl
 λ mittlere freie Weglänge eines Moleküls
 r Kapillarradius [m]

Das den Diffusionsvorgängen zu Grunde liegende und auf poröse Körper anzuwendende Gesetz lautet (nach Adolf Fick):⁶⁷

$$J = D \times \frac{dc}{dx} \quad (\text{Gl. 5.3})$$

mit J Wasserdampfdiffusionsstromdichte [g/cm²s]
 D Diffusionskoeffizient [cm²/s]
 c Konzentration [g/cm³]
 x Wegkoordinate

Der Diffusionskoeffizient stellt das Maß für die Durchlässigkeit eines Stoffes gegenüber der in ihm diffundierenden Teilchen dar. Der rechte Term der Gleichung beschreibt das Konzentrationsgefälle, das heißt, die Änderung der Konzentration längs der Diffusionsrichtung.

⁶⁶ Vgl. Kießl (1983), S. 35

⁶⁷ Vgl. Klopfer (1974), S. 54

Effusion

Hierbei diffundieren die Wassermoleküle ausschließlich in den Kapillaren mit so geringem Durchmesser (z.B. in den Gelporen des Zementsteins), dass der Weg der einzelnen Moleküle durch die Zusammenstöße mit den Porenwandungen bestimmt wird (siehe Abbildung 5.5, Mitte). Das bedeutet, dass die mittlere freie Weglänge, die etwa bei 10^{-8} m liegt, größer ist als der Porendurchmesser ($Kn > 1$). Somit findet die Effusion nur im Mikroporenbereich statt.

Wasserdampfdiffusion

Als Wasserdampfdiffusion wird die Diffusion des Wasserdampfes innerhalb der umgebenden Luft bezeichnet. Auch der Wasserdampf, der in den Poren von Baustoffen enthaltenen ruhenden Luft diffundiert und bewirkt somit einen Massenstrom von Stellen größerer zu kleinerer Wasserdampfkonzentration. Da in Bezug auf die praktischen Belange Luft als ideales Gas angesehen werden kann, bedeutet dies, dass zwischen dem Wasserdampfpartialdruck und der Wasserdampfkonzentration eine Proportionalität besteht. Wenn also die Konzentration steigt, nimmt auch der Partialdruck des Wasserdampfes zu. Dies wird durch die ideale Gasgleichung beschrieben:

$$p = c \times R_D \times T \quad (\text{Gl. 5.4})$$

mit	p	Wasserdampfpartialdruck [Pa]
	c	Konzentration des Wasserdampfes [g/cm ³]
	R _D	Gaskonstante des Wasserdampfes [kJ/kgK]
	T	Absolute Temperatur

Die Wasserdampfdiffusion findet im Kontinuumsbereich statt ($Kn \ll 1$). Im Gegensatz zur Effusion wird der Weg der Wassermoleküle nicht durch das Zusammenstoßen mit den Porenwandungen bestimmt (siehe Abbildung 5.5, links), sondern durch das Aufeinandertreffen der Moleküle untereinander. Dies setzt voraus, dass die mittlere freie Weglänge der Moleküle wesentlich kleiner ist als der Porendurchmesser.⁶⁸

Im Übergangsbereich finden sowohl Effusion als auch Wasserdampfdiffusion statt.

Eine klare Trennung der beiden Vorgänge ist nicht möglich, da das Porenspektrum in mineralischen Baustoffen alle drei Bereiche kontinuierlich überdeckt und das treibende Potential jeweils der Partialdampfdruck ist.

⁶⁸ Vgl. Gertis (1979), S. 24

Deshalb kann die Diffusionsstromdichte durch ein bestimmtes Material mit einem gemeinsamen Diffusionskoeffizienten beschrieben und wie folgt berechnet werden:⁶⁹

$$J = \frac{D \times (p_i - p_a)}{\mu \times R_D \times T \times s} \quad (\text{Gl. 5.5})$$

mit	J	Diffusionsstromdichte: Feuchtigkeit, die als Wasserdampf durch das Bauteil pro Zeiteinheit und Fläche gelangt [kg/m ² h]
	D	Diffusionskoeffizient [m ² /h]
	p _a	Wasserdampfpartialdruck außen [Pa]
	p _i	Wasserdampfpartialdruck innen [Pa]
	μ	Diffusionswiderstandsfaktor [-]
	R _D	Gaskonstante des Wasserdampfes [J/kgK]
	T	absolute Temperatur in der Wand [K]
	s	Schichtdicke [m]

Die Diffusionswiderstandszahl μ berücksichtigt den reduzierten Diffusionsquerschnitt sowie die auftretenden Umwege und Querschnittsänderungen in den Porenkanälen eines porösen Stoffes. Sie gibt an, um welchen Faktor der Diffusionswiderstand einer Materialschicht größer ist als der einer gleich dicken Luftschicht.

Aufbauend auf die Berechnung der Diffusionsstromdichte nach Gleichung 5.5 hat Glaser das nach ihm benannte Glaser-Verfahren entwickelt, welches in der DIN 4108 verankert ist. Es handelt sich hierbei um eine stationäre Untersuchungsmethode, mit der auf graphische Weise der Dampfdurchgang durch mehrschichtige Bauteile ermittelt werden kann. Es ist in der Praxis anerkannt, gibt im Allgemeinen allerdings nicht die tatsächlichen physikalischen Vorgänge beim Feuchtetransport wieder. Das Modell berücksichtigt weder die Sorptionseigenschaften noch den Flüssigkeitstransport, die bei praktischen Situationen fast immer vorliegen. Bei den instationär ablaufenden Vorgängen können die Feuchtespeichereigenschaften eines Baustoffes allerdings zur maßgebenden Größe werden. Besonders bei höheren Wasseranreicherungen im Bauteilquerschnitt, was gerade bei erdberührten Bauteilen der Fall ist, werden die im Folgenden näher beschriebenen Vorgänge der Oberflächendiffusion und der Kapillarleitung zum wesentlichen Transportmechanismus.

Diese Tatsache führt auch zu dem Schluss, den Feuchtedurchgang bzw. den Feuchteintritt in die Räume in Kapitel 6 mit den instationären Simulationsprogrammen WUFI und Delphin zu berechnen.

⁶⁹ Vgl. Kießl (1983), S. 37

Oberflächendiffusion

Bei der Oberflächendiffusion handelt es sich um die Bewegung derjenigen Wassermoleküle, die auf den inneren und äußeren Molekülen einen dünnen Wasserfilm (Adsorptionsschicht) gebildet haben.

Das heißt, dass sich an den inneren Oberflächen der Poren ein Sorbatfilm bildet, dessen Dicke mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit zunimmt. Liegt nun ein Gradient bei der relativen Luftfeuchtigkeit an, tritt ein Massenstrom im Flüssigkeitsfilm an der Porenwand ein. Poröse Stoffe weisen mitunter erhebliche innere Oberflächen auf. Zum Beispiel enthält bei 1 g Trockensubstanz ein Ziegel eine innere Oberfläche von ca. 1 m² und Gasbeton eine von ca. 100 m².⁷⁰

Bei relativen Luftfeuchten von über 50 % hat die Oberflächendiffusion bei hygroskopischen mineralischen Baustoffen einen erheblichen Einfluss und kann die reine Dampfdiffusion um ein Vielfaches übersteigen.

Damit kann analog zum Fick'schen Gesetz der eben erläuterte Diffusionstransport beschrieben werden.⁷¹

$$J = D \times \frac{dw}{dx} \quad (\text{Gl. 5.6})$$

mit	J	Oberflächendiffusionsmassenstromdichte [g/cm ² s]
	D	Oberflächendiffusionskoeffizient [cm ² /s]
	w	Wassergehalt [g/cm ³]
	x	Wegkoordinate

Lösungsdiffusion

Die Lösungsdiffusion findet in den Stoffen statt, die Wasser in sich lösen können. Dazu gehören neben einer Reihe von Flüssigkeiten (z. B. Dispersionen) auch organische Polymere (Kunststoffe, Bitumen u.a.). Der Umfang der Löslichkeit und die damit verbundene Wasserdurchlässigkeit nehmen mit der Dichte der hydrophilen Gruppen und der Temperatur zu.

Im Gegensatz zu mineralischen Baustoffen, die ein Porensystem besitzen, in dem die Feuchte transportiert wird, schafft sich das Wasser in Polymeren durch die Anlagerung an die Makromoleküle diesen Porenraum selbst, wobei die Kunststoffe durch die Wassereinlagerung zu quellen beginnen. Dies erleichtert eine Diffusion der Wassermoleküle und führt zu der konzentrationsabhängigen Lösungsdiffusion.

⁷⁰ Vgl. Klopfer (1974), S. 64

⁷¹ Vgl. Krus (1995), S. 15

In Bezug auf hygroskopische poröse Baustoffe stellt die Lösungsdiffusion nur eine untergeordnete Rolle dar.

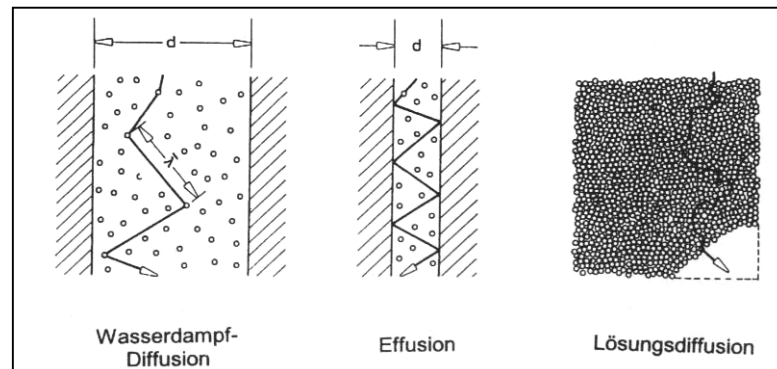


Abb. 5.5: Diffusionsvorgänge [Klopfer (2002), S. 354]

Kapillarleitung

Unter kapillarer Wasseraufnahme eines porösen Stoffes versteht man das Einsaugen von Wasser in dessen Kapillarporen. Dafür muss das Bauteil an dessen Oberfläche von Wasser berührt werden. Die Kapillarwirkung ist durch eine spezifische Kraftwirkung der Porenwänden auf die Wasseroberfläche gekennzeichnet.

Mineralische Baustoffe wie Beton lassen sich gut mit Wasser benetzen. In der schmalen Grenzzone Wasser-Wand wirken die Absorptionskräfte der Schwerkraft entgegen und saugen eine kleine Wassermenge an. Man spricht auch von einem „Meniskus“ (siehe Abb. 5.6, rechts).

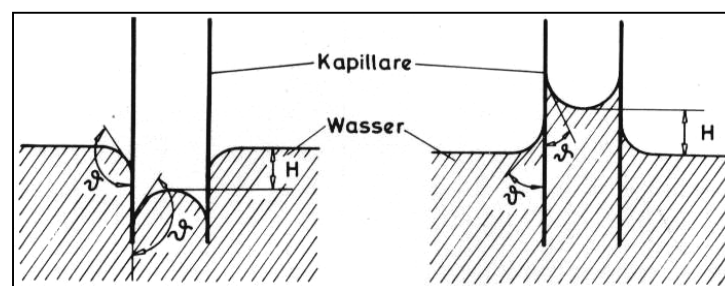


Abb. 5.6: links: Kapillar-Depression, rechts: Kapillar-Aszension [Klopfer (1974), S. 46]

An nichtmineralischen, hydrophoben Stoffen wird das Wasser abgestoßen und durch das Eigengewicht nach unten gezogen („negativer Meniskus“, Abbildung 5.6, links). In Kapillaren übersteigen die Absorptionskräfte das Gewicht der Wassersäule und der Wasserspiegel steigt an.⁷²

⁷² Vgl. Cziesielski (1995), S. 131 ff.

Die Gleichung 5.7 beschreibt die maximale Steighöhe, die Wasser in einem Kapillarsystem entgegen der Schwerkraft erreichen kann:

$$H_{\max} = \frac{2 \times \sigma \times \cos \Omega}{\rho \times g \times r} \quad (\text{Gl. 5.7})$$

- mit H_{\max} maximale Steighöhe [m]
 σ Oberflächenspannung des Wassers (bei 20°C → $\sigma = 72,7 \text{ N/m}$) [N/m]
 $\cos \Omega$ Benetzungswinkel zwischen Wasser und Kapillarwand
 ρ Dichte des Wassers = 1000 kg/m^3
 g Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$)
 r Kapillarradius [m]

Aus Abbildung 5.7 wird das Prinzip der Oberflächenspannung noch einmal deutlich. Ein hydrophober, also Wasser abweisender Stoff (Abbildung 5.7, rechts), wie etwa Silikonharz erzeugt einen stumpfen Benetzungswinkel ($\cos 60^\circ = 0,5$; $\cos 90^\circ = 0$; $\cos 120^\circ = -0,5$). Bei hydrophilen Stoffen (Abbildung 5.7, links) wie Beton entsteht ein spitzer Winkel ($\cos 0^\circ = 1$; $\cos 30^\circ = 0,866$).

Aus der Gleichung 5.7 lässt sich erkennen, dass die kapillare Steighöhe umso größer ist, je kleiner der Kapillarradius r , also je feinporöser ein Stoff ist. Ebenso steigt die Höhe mit zunehmender Benetzbarkeit (hydrophiler Stoff).

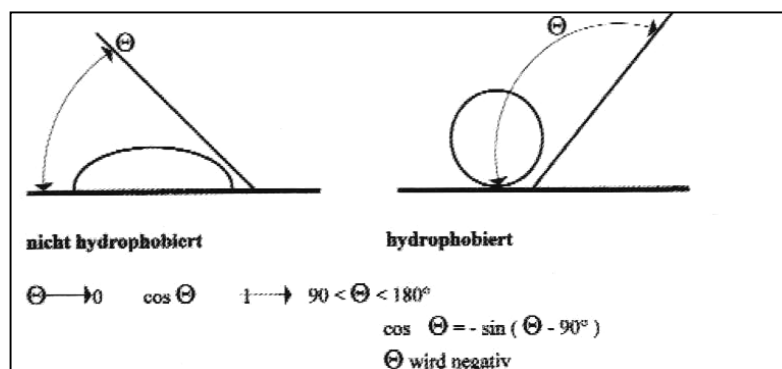


Abb. 5.7: Oberflächenspannung [Kabrede (2003), S. 27]

Die nach einer festgelegten Zeit aufgenommene Wassermenge m sowie die beobachtbare Steighöhe h lassen sich mit dem Wurzel-Zeit Gesetz nach Gleichung 5.8 erfassen:⁷³

⁷³ Vgl. Klopfer (1974), S. 50

$$m = W_1 \times \sqrt{t} \text{ bzw. } h = W_2 \times \sqrt{t} \quad (\text{Gl. 5.8})$$

mit	m	aufgenommene Wassermenge [kg/m ²]
	h	Steighöhe [m]
	W ₁	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ² h ^{0,5}]
	W ₂	Wassereindringkoeffizient [m/h ^{0,5}]
	t	Zeit [h]

Die Wasseraufnahmekoeffizienten werden experimentell bestimmt. Die Messung ergibt allerdings unterschiedliche Ergebnisse, je nachdem wie lang die Saugzeit t ist und wie feucht die Probe ist. Deshalb wird häufig die Wasserkapazität (kapillarer Porenanteil) und die Sättigungsfeuchte (alle offenen Poren sind mit Wasser gefüllt) angegeben.

Das Wurzel-Zeit Modell geht davon aus, dass beim Kontakt mit Wasser eine exakt definierte Wasserfront in das Baustoffinnere eindringt, was näherungsweise nur bei sehr feinporenen Stoffen der Fall ist.⁷⁴

Laminare Sickerströmung

In der Hydrodynamik werden grundsätzlich die laminare und die turbulente Strömung unterschieden. Diese sind von der Reynolds-Zahl Re abhängig. Um die Strömungsart zu bestimmen, ist neben der Strömungsgeschwindigkeit und der kinematischen Viskosität des Wassers auch der durchströmte Querschnitt, also der Porendurchmesser, ausschlaggebend. In einem geraden Rohr mit kreisförmigem Querschnitt herrscht laminare Strömung etwa bis $Re < 2300$ vor. Wird dies auf poröse Stoffe übertragen, stellt man fest, dass auf Grund der stark unterschiedlichen Kapillarradien nur bis $Re < 4$ laminare Strömung vorliegt. Dieser Wert wird allerdings nie überschritten, was zur Folge hat, dass in porösen Stoffen ausschließlich laminare Strömung auftritt.

Die zusätzliche Voraussetzung hierfür ist, dass das Verhältnis der mittleren freien Weglänge der Teilchen zum Porenradius kleiner als Eins ist.⁷⁵

Bei der Strömung wird die Bewegung des Wassers durch einen Druckunterschied bewirkt. Somit gelangt Sickerströmung unter hydrostatischem Druck in das Bauteil, wie er bei von außen anstehendem Wasser im erdberührten Bereich, bei Schlagregen und bei Spritzwassereinwirkung vorherrscht. Der Wassertransport durch Sickerströmung findet vorwiegend in Rissen und Hohlräumen statt.⁷⁶⁺⁷⁷

⁷⁴ Vgl. Kießl (1983), S. 30

⁷⁵ Vgl. Gertis (1979), S. 25

⁷⁶ Vgl. Schumann (1990), S. 111

⁷⁷ Vgl. Buss (1988), S. 173

Als einfaches Modell einer durchströmten Pore gilt das Gesetz von Hagen-Poiseuille, bei dem die Pore als kreiszylindrische Röhre betrachtet wird, in der eine Flüssigkeit auf Grund eines Druckunterschiedes fließt.⁷⁸

$$I = \frac{d^4 \times \rho \times \pi}{128 \times \eta} \times \frac{dp}{dx} \quad (\text{Gl. 5.9})^{79}$$

mit	I	Massenstrom [kg/h]
	ρ	Dichte der Flüssigkeit [kg/m ³]
	dp	Druckdifferenz [Pa]
	dx	Länge des Rohres [m]
	d	Durchmesser des Rohres [m]
	η	dynamischer Viskositätskoeffizient [Pa × s]

Der Viskositätskoeffizient beschreibt den Widerstand, der in den Grenzflächen zwischen zwei Schichten mit verschiedenen Fließgeschwindigkeiten auftritt.

Der Volumenstrom ist stark abhängig vom Kapillarradius. Das heißt, bei sehr feinen Kapillaren muss die Druckdifferenz sehr groß sein, damit überhaupt eine Strömung stattfindet.

Wegen eines regellosen Gewirrs von Poren und Kapillaren, die alle einen unterschiedlichen Durchmesser aufweisen, kann die Gleichung nicht direkt für die Sickerströmung angewandt werden. Außerdem kann keine Aussage darüber gemacht werden, wie sich die Viskosität des Wassers in den feinsten Poren verändert. Deshalb hat Darcy das Gesetz der Rohrströmung auf die Sickerströmung des Wassers durch Poren angewandt:

$$J = k \times \frac{dp}{dx} \quad (\text{Gl. 5.10})$$

mit	k	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
-----	---	-------------------------------

Der linke Faktor der Gleichung 5.10, der den Durchlässigkeitsbeiwert angibt, bleibt konstant. Der rechte Faktor gibt das hydraulische Gefälle an, das wegen der Zähigkeit des Wassers beim Rohrdurchfluss auftritt.

Nach Darcy wird der durchströmte Porenraum als ein Bündel paralleler Rohre angesehen. Das Gesetz gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass der Widerstand des Wassers ausschließlich von seiner Viskosität abhängt. Das bedeutet, dass ein Stoff vollständig

⁷⁸ Vgl. Klopfer (1974), S. 38

⁷⁹ Vgl. Klopfer (2002), S. 379

wassergesättigt sein muss, damit bei eingeschlossener Luft in den Poren die Oberflächenspannung des Wassers keine Kräfte auf das Wasser ausübt.⁸⁰

Die Eindringtiefe h_k der Wasserfront unter Wasserdruck (Wassersäule H) nach der Zeit t lässt sich aus dem Darcy-Gesetz herleitend wie folgt errechnen:⁸¹

$$h_k = \sqrt{\frac{2 \times k \times H \times t}{P}} \quad (\text{Gl. 5.11})$$

mit	P	Porosität (Wasser führende Poren) [m^3/m^3]
	H	Wassersäule [m]
	t	Zeit [s]
	k	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

5.5 Tatsächlicher, kombinierter Wassertransport

Die Mechanismen, die den Wassertransport verursachen, sind abhängig vom Wassergehalt in den Poren und von der Porengröße.

Wassergehalt in den Poren

In einem sehr trockenen Baustoff findet zunächst kein Wassertransport statt. Der eindringende Wasserdampf wird an den Porenwänden adsorbiert und somit nicht weitertransportiert (siehe Abbildung 5.8, A). Nachdem die Porenwände mit mehreren Molekülschichten belegt sind, entfallen die Adsorptionskräfte und der Wasserdampf diffundiert in die anschließenden Kapillaren (Abbildung 5.8, B). Bei steigendem Wasserdampfgehalt sind die Kapillaren auf Grund der beginnenden Kapillarkondensation mit flüssigem Wasser gefüllt. Der Wassertransport erfolgt nun in den Poren durch Diffusion und in den Kapillaren durch Kapillarkräfte (Abbildung 5.8, C). In der vierten Phase ist die Dicke der adsorbierten Schicht soweit angewachsen, dass infolge der Oberflächendiffusion ein verstärkter Wassertransport stattfindet (Abbildung 5.8, D).

In den letzten beiden Phasen ist in den Poren und Kapillaren soviel Wasser enthalten, dass das Wasser zum einen durch Kapillarkräfte und zum anderen auf Grund eines hydraulischen Gefälles nach dem Darcy'schen Gesetz bewegt wird (Abbildung 5.8, E und F).⁸²

⁸⁰ Vgl. Klopfer (1974), S. 39

⁸¹ Vgl. Beddoe (1999), S. 159

⁸² Vgl. Budelmann (2004), S.10

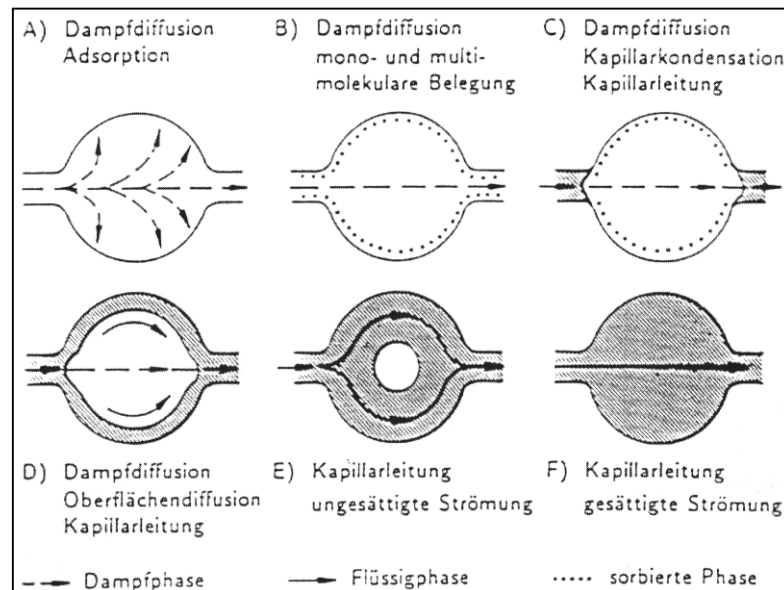


Abb. 5.8: tatsächlicher Wassertransport [Budelmann (2004), S.10]

Aus Abbildung 5.8 wird deutlich, dass bei einem relativ trockenem Beton der Wassertransport durch Diffusion vonstatten geht. Diese wird dann durch die Kapillarkondensation zunehmend behindert. Bei höheren Feuchtigkeitsgehalten im Beton wird das Wasser durch leistungsfähigere Mechanismen wie der Kapillarleitung und der Strömung ersetzt. Durch den Einfluss der Temperatur und der Porengröße auf den Transportmechanismus ist es nicht möglich, einem bestimmten Transportmechanismus einen speziellen Feuchtegehalt zuzuordnen.⁸³

Die eben beschriebenen Mechanismen gelten für eine Befeuchtung von Beton an Luft veränderlicher Feuchte.

Bei direktem Kontakt mit Wasser findet in Abhängigkeit von der Porengröße ein Aufsteigen des Wassers durch Kapillarität statt. Über dem Spiegel der kapillaren Steighöhe findet schließlich der weitere oben beschriebene Befeuchtungsprozess statt.⁸⁴

Porengröße

Für die Bewegung der einzelnen Wassermoleküle ist, wie zu Beginn bereits erwähnt, das Verhältnis der freien Weglänge der Moleküle zur Porengröße maßgebend. Dies wird durch die Knudsenzahl Kn beschrieben. Poren mit einem Durchmesser von kleiner 10^{-8} m bilden den Molekularbereich. Hier herrscht als Transportmechanismus ausschließlich Effusion vor.

Poren, die größer sind als 10^{-6} m repräsentieren den Kontinuumsbereich. Der Wassertransport erfolgt hier durch Kapillarkräfte und Strömen, bzw. durch Diffusion, falls die Po-

⁸³ Vgl. Cziesielski (1995), S. 134

⁸⁴ Vgl. Rostasy (1978), S. 51

ren nicht mit Wasser gefüllt sind. Im Übergangsbereich sind Poren zwischen 10^{-8} und 10^{-6} m vorhanden, wobei dort alle Mechanismen vorherrschen.

In dem im Beton vorhandenen Gel-, Kapillar- und Grobporen finden alle Transportvorgänge statt.

Die größte Wassermenge wird bei der Strömung im wassergesättigten Beton transportiert. Bei der Effusion und Diffusion ist die Leistungsfähigkeit am geringsten. Die Diffusionsmenge wird im Vergleich zu der durch die Strömung transportierten Menge in der Regel vernachlässigt.

5.6 Zuordnung der Transportvorgänge zu den Lastfällen

Beim Lastfall der Bodenfeuchte ist davon auszugehen, dass sich ein Feuchtigkeitstransport ausschließlich als Kapillarwasserleitung vollzieht und je nach Dampfdruckgefälle durch die Diffusionsprozesse verstärkt oder vermindert wird. Diffusionsvorgänge finden im Prinzip unabhängig vom Lastfall aus dem eben genannten Grund immer statt. Sie werden allerdings ab einer gewissen Sättigung (siehe auch Abbildung 5.8) von den anderen Transportmechanismen überlagert.

Von der Sickerströmung ist lediglich beim Lastfall des drückenden Wassers auszugehen, wobei, wie sich später herausstellen wird, eine laminare Strömung in einem wasserundurchlässigem Beton sehr fraglich ist. Der maßgebende Fall der Sickerströmung liegt im Fall von Rissen oder Hohlräumen vor, allerdings immer mit der Prämisse eines Druckunterschiedes.

6 Untersuchung der Feuchtetransportvorgänge durch erdberührte Bauteile

Im Folgenden werden die Feuchteströme durch die Außenwände von erdberührten und durch Grundwasser belasteten Betonbauwerken untersucht, insbesondere im Hinblick auf die daraus resultierenden Feuchteinträge in die Räume und den damit verbundenen Möglichkeiten und Grenzen einer nachträglichen höherwertigen Nutzung.

Es soll unter anderem aufgezeigt werden, inwieweit der Feuchtedurchgang durch eine nachträgliche Innenbeschichtung beeinflusst wird, die direkt auf das Bauteil zum Beispiel in Form einer Bitumenbeschichtung oder einer mineralischen Dichtungsschicht aufgebracht wird.

Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass die Ergebnisse auch auf Sohlplatten der gleichen Dicke übertragen werden können, da die kapillare Eindringtiefe nicht von der Schwerkraft beeinflusst wird. Die festzulegenden Randbedingungen bei der Berechnung wären gleich und das Bauteil müsste lediglich um 90° gedreht werden.⁸⁵

Um die Problematik alter erdberührter Bauwerke aus Mauerwerk gerade in Bezug auf eine Umnutzung zu einem höherwertig genutzten Raum deutlich zu machen, wird der Feuchtedurchgang durch ein solches ebenfalls dargestellt. Dadurch wird auch der erhebliche Unterschied von einem wasserundurchlässigen Baustoff wie Beton im Vergleich zu einem Mauerwerk deutlich.

6.1 Vorgehensweise

Für die Berechnung wird zunächst die eindimensionale Version des Programmpaketes WUFI eingesetzt, dessen Abkürzung für "Wärme- und Feuchtetransport instationär" steht. Es dient der Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in mehrschichtigen Bauteilen unter instationären Klimabedingungen.

Im Fall einer Berechnung im eindimensionalen Zustand wird das Bauteil in x-Richtung in Ortsschritte eingeteilt und in y- und in z-Richtung als unendlich ausgedehnt angenommen. Des Weiteren erfolgt eine Berechnung mit dem System Delphin. Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein Programm zur Berechnung des instationären Wärme- und Feuchtetransportes.

Es werden insbesondere die Grenzen und Anwendungsmöglichkeiten der beiden Simulationsprogramme in Bezug auf die Berechnung des Feuchtedurchgangs miteinander verglichen. Zudem werden die Unterschiede in der Darstellung von erdberührten Bauteilen hervorgehoben.

⁸⁵ Vgl. Alfes (2005)

Der Vergleich zielt nicht darauf ab, die zugrunde liegenden Transportgleichungen zu betrachten und die Programme auf ihre umfassenden Anwendungsgebiete hin zu untersuchen. Das Augenmerk liegt ausschließlich auf den unterschiedlichen Ansätzen der Bauteilsimulation im erdberührten Bereich sowie den Möglichkeiten zur Untersuchung von Feuchtedurchgängen in den Innenraum. Die Anwendung der Programme beschränkt sich somit im Verhältnis zu den weit reichenden Nutzungsvarianten auf einen relativ kleinen Ausschnitt.

Zum Abschluss werden die Ergebnisse mit einem stationären Berechnungsverfahren nach Kießl verglichen um festzustellen, ob die Werte, die sich aus den Simulationen ergeben in etwa der Größenordnung der analytischen Bemessungsvariante entsprechen. Ebenso wird ein Weg zur Abschätzung des Feuchtedurchgangs nach Lohmeyer aufgezeigt.

Bevor die Berechnungen mit Delphin dargelegt werden, wird nachfolgend zunächst die Berechnungsvariante mit WUFI vorgestellt, wobei zuerst auf die grundsätzliche Problematik eingegangen wird, die sich bezüglich der anzusetzenden Baustoffdaten ergeben hat.

6.2 Problematik der Stoffkennwerte und der Modellbetrachtungen

An dieser Stelle soll zunächst erwähnt werden, dass die in den Programmen hinterlegten Materialdaten auf Grund von verfahrensspezifisch anders ermittelten Materialkennwerten unterschiedlich sind.

Des Weiteren hat sich eine Schwierigkeit in der Unterscheidung für eine Berechnung von „Normalbeton“ und WU-Beton ergeben. Nach Telefonaten mit Betonherstellern⁸⁶ hat sich herauskristallisiert, dass keine Stoffkennwerte speziell für einen wasserundurchlässigen Beton existieren. Dies ist verständlich, wenn die in Kapitel 5 angeführten Kriterien zu Grunde gelegt werden und davon auszugehen ist, dass Normalbeton generell wasserundurchlässig ist.

„Unter „Wasserundurchlässigkeit“ wird verstanden, daß flüssiges Wasser bei langzeitigem einseitigem Einwirken den Beton des Bauteiles nicht durchdringt und daß die dem Wasser abgekehrte Seite des Bauteils keinen Wasseraustritt und keine feuchte Flecken aufweist.“⁸⁷

Die WU-Richtlinie⁸⁸ stellt an den Beton die Anforderungen bezüglich der Wasserundurchlässigkeit nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 (5.5.3). Für den Anwendungsbereich der Richtlinie gilt ausdrücklich die Einhaltung des w/z-Wertes $\leq 0,6$, was einem Normalbeton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30 entspricht (WU-Richtlinie, Abschnitt 6.1.1). Nach Ab-

⁸⁶ Beton Marketing GmbH Nord

⁸⁷ Vgl. Lohmeyer (1997), S. 93

⁸⁸ Vgl. DAFStb (2003)

schnitt 6.1.5 entspricht ein Beton mit einem w/z -Wert $\leq 0,55$ einem Normalbeton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37.

Ebenso muss klar gestellt werden, dass die rechnerische Erfassung des Wassertransportes in porösen Baustoffen ein in der Bauphysik noch nicht hinreichend gelöstes Problem ist.

Grundsätzlich können zwei Modelle unterschieden werden. Zum einen existiert die Vorstellung, dass durch das Bauteil eine kontinuierliche Wassermenge sowohl kapillar als auch durch Diffusion transportiert wird. In diesem Fall beeinflusst die nachstoßende Wasserfront den Feuchtestrom und den Feuchteeintrag in den Innenraum. Nach neueren Untersuchungen überdecken sich die Austrocknungsfront auf der inneren Nutzseite und die von außen eindringende Wasserfront nicht (hier: alternatives Berechnungsmodell).⁸⁹

Bei den folgenden Berechnungen wird versucht, die unterschiedlichen Modelle in den Simulationen abzubilden. Es wird jeweils von einem Normalbeton ausgegangen, aus dem direkt auf den Feuchtestrom durch ein wasserundurchlässiges Bauteil geschlossen werden kann. Die aufgeführten Theorien werden in der Fachwelt diskutiert und sind teilweise noch umstritten.

Grundsätzlich hängen die Rechenergebnisse natürlich stark von den „Input“-Daten ab. Eine Veränderung und Generierung der in der Datenbank hinterlegten Kennwerte führt immer zu Unsicherheiten in den Ergebnissen und somit auch in der Ergebnisinterpretation. Die Berechnungsergebnisse können somit lediglich, schon allein wegen ihrer großen Bandbreite, nur eine ungefähre Abschätzung darstellen.

6.3 Grundlagen der Arbeitsweise von WUFI

Für die Berechnung der unterschiedlichen Transportmechanismen werden von WUFI der Wärme-, Dampf- und der Flüssigtransport berücksichtigt. Soweit die Vorgänge noch nicht in Kapitel 5 beschrieben worden sind, wird nachfolgend kurz darauf eingegangen.



⁸⁹ Vgl. Beddoe (1999)

Wärmetransport:

- Wärmeleitung
- Enthalpieströme durch Dampfdiffusion mit Phasenwechsel
- kurzwellige Sonnenstrahlung
- langwellige nächtliche Abstrahlung

Unter dem Wärmeübergang durch Leitung versteht man einen an eine Materie gebundenen Energietransport, wobei der Wärmeaustausch zwischen unmittelbar benachbarten Molekülen stattfindet.

Die Wärmeproduktion mittels Phasenumwandlungen entsteht, wenn Wasserdampf durch Kondensation in den flüssigen Zustand übergeht oder durch Verdampfung Wasser in Wasserdampf umgewandelt wird.⁹⁰ Die langwellige Abstrahlung berücksichtigt, dass besonders in einer klaren Nacht die Abstrahlung einer Bauteiloberfläche zu einer erheblichen Abkühlung führt. Im Gegensatz zu dem langwelligen Strahlungsaustausch zwischen Bauteilen und ihrer Umgebung besitzt das Spektrum der Sonnenstrahlung einen erheblichen Anteil an kurzwelliger Strahlung.

Dampftransport:

- Dampfdiffusion
- Lösungsdiffusion

Die konvektiven Luftströmungen werden bei den oben aufgeführten Mechanismen nicht berücksichtigt. Diese sind nur schwer zu erfassen und kommen im eindimensionalen Zustand selten vor.

Flüssigtransport:

- Kapillarleitung
- Oberflächendiffusion

Die aufgeführten Dampf- bzw. Flüssigtransportvorgänge sind bereits ausführlich in Kapitel 5 beschrieben worden.

Durch die Schwerkraft hervorgerufene Sickerströmungen, hydraulische Strömungen auf Grund von Gesamtdruckunterschieden sowie elektrokinetische und osmotische Effekte werden von WUFI nicht erfasst.

⁹⁰ Vgl. WTA (6-2-01/D), S. 6

Als Randbedingungen dienen zum einen Raumklimadaten wie die Temperatur und die relative Luftfeuchte. Zum anderen werden meteorologische Daten (Temperatur, relative Luftfeuchte, Regen/Schlagregen, Strahlung) herangezogen.

6.3.1 Wahl des numerischen Gitters

Um die dem Programm zugrunde liegenden Differentialgleichungen zu lösen, müssen diese diskretisiert werden. Das bedeutet, dass die Temperatur- und Feuchtefelder nur an einzelnen diskreten Punkten ausgewertet werden.

WUFI verwendet dafür das Verfahren der finiten Volumen. Dieses formuliert die Differentialgleichungen zunächst als Bilanzgleichungen für Wärme und Feuchte und leitet die algebraischen Gleichungen so daraus ab, dass für jedes Element des numerischen Gitters die Wärme- und Feuchtebilanzen gewahrt bleiben. Dadurch gelten die Bilanzen in der Summe auch für das ganze Bauteil.

Die Werte der berechneten Variablen werden in den einzelnen Gitterelementen als räumlich konstant angenommen. Deshalb muss die Größe der Elemente an die zu erwartenden Gradienten angepasst werden. In der Regel ist das Netz der finiten Elemente im Randbereich und im Bereich von angrenzenden Schichten feiner zu wählen und jeweils zur Mitte des Bauteiles hin aufzufächern.

6.3.2 Wahl des Zeitschritts

Die zeitliche Entwicklung des Feuchtedurchgangs durch das Bauteil muss ebenfalls diskretisiert werden, da die Temperatur- und Feuchtefelder nur für diskrete Zeitpunkte berechnet werden. Der Lösungsalgorithmus greift auf den momentanen Zustand der Felder zu und bestimmt daraus einen neuen Zustand, der um die gewählte Zeitspanne dahinter liegt.

Die Berechnung des Feuchtedurchgangs erfolgt je nach Material über unterschiedliche Zeiträume, da der Feuchtestrom auf der Rauminnenseite sich unterschiedlich schnell einem Wert annähert.

Zur besseren Darstellung der Messergebnisse erfolgt die Berechnung in Zeitschritten von 24 Stunden. Der Verlauf wird dadurch hinreichend genau beschrieben und hat keinen Einfluss auf den sich einstellenden Zustand.

6.3.3 Validierung des Programms mit Messdaten

Da es mit WUFI nicht möglich ist, ein erdberührtes Bauteil direkt mit einem Wasserdruck zu beaufschlagen, ist es nötig, den Wasserandrang im Erdreich für den Lastfall des drückenden Wassers durch die Wahl des Außenklimas zu simulieren. Dadurch kann allerdings kein hydrostatischer Druck auf das Bauteil erzeugt werden, sondern die beaufschlagte Oberfläche wird lediglich mit Wasser bestrichen, so dass eine Wasseraufnahme kapillar erfolgen kann. Somit lässt sich der Lastfall des drückenden Wassers nur in einer Näherung darstellen. Hierfür wird die bereitgestellte Klimadatei generiert bzw. editiert, um die Randbedingungen im Grundwasser möglichst realitätsnah darzustellen. Als Eingabeparameter müssen die Regenlast auf die Oberfläche [$\text{l/m}^2\text{h}$], die kurzweilige (Sonnen-) Strahlungsflussdichte [W/m^2] sowie die relative Luftfeuchte und die Temperatur sowohl innen als auch außen festgelegt werden. Um einen ganzzeitlichen Wasserandrang darzustellen, wird der Regen über das ganze Jahr mit $10000 \text{ l/m}^2\text{h}$ angesetzt. Die Strahlungszahl wird zu Null angenommen, da im erdberührten Bereich eine Sonneneinstrahlung auszuschließen ist.

Für die Außentemperatur wird ein konstanter Wert von 10°C angenommen, der ungefähr der Grundwassertemperatur entsprechen dürfte. Die relative Luftfeuchte ergibt sich zu 100 %, was eine weitere Annäherung an die Bodenverhältnisse für die zu untersuchenden Feuchteströme durch Bauteile im erdberührten Bereich bedeutet.

Das Innenklima wird konstant mit 20°C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % festgelegt. Durch die Wahl der konstanten Randbedingungen erfolgt die Berechnung daher mit quasistationären Verhältnissen. Dies wird zum einen dadurch begründet, dass im tiefer gelegenen Boden die Temperatur des Erdreiches im Grundwasser nur geringen Schwankungen unterworfen ist.⁹¹ Zum anderen wird eine bessere Vergleichbarkeit mit der stationären Berechnungsmethode nach Kießl erzielt.

Neben den Klimadaten mit denen die klimatischen Außen- und Innenverhältnisse beschrieben werden, müssen die benötigten Materialkenndaten des zu untersuchenden Bauteils erfasst werden. Hierfür stellt unter anderem das Fraunhofer Institut für Bauphysik eine umfangreiche Materialdatenbank zur Verfügung, aus der die Stoffkennwerte direkt für die Berechnung übernommen werden können. Ebenso werden die Oberflächenübergangskoeffizienten definiert, wobei es notwendig ist, die Regenwasserabsorptionszahl auf Eins zu setzen, um zu gewährleisten, dass das anstehende Wasser in Form von Regen vollständig in das Bauteil eindringt.

⁹¹ Vgl. Lohmeyer (2000), S. 571

Für die Anfangsbedingungen im Bauteil wird für die Anfangsfeuchte jeweils der praktische Wassergehalt u_{80} (auch: Bezugsfeuchtegehalt) sowie eine Anfangstemperatur von 12°C angesetzt.⁹²

Zur Beschreibung der Stoffeigenschaften liegt den Materialien die Feuchtespeicherfunktion (Abbildung 6.1) zugrunde, die sich aus den Messungen der Sorptionisothermen bis etwa 95 % relativer Luftfeuchtigkeit und den Saugspannungsmessungen ab 95 % relativer Luftfeuchtigkeit zusammensetzt (siehe auch Kapitel 5,

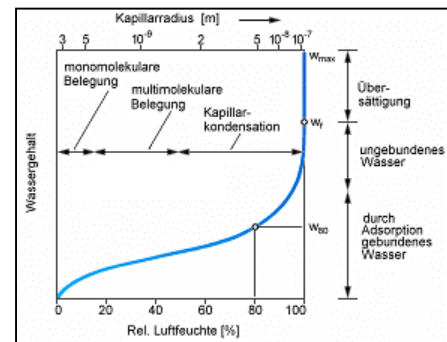


Abb. 6.1: Feuchtespeicherfunktion

Abschnitt 5.3).

Der Feuchtetransport ist durch die Flüssigtransportkoeffizienten Saugen (D_{ws}) und Weiterverteilen (D_{ww}) charakterisiert. Da für diese Werte kaum Stoffkennwerte vorliegen, kann der erstgenannte näherungsweise über eine Exponentialfunktion in Abhängigkeit vom Wassergehalt beschrieben werden:

$$D_{ws}(w) = 3,8 \times \left(\frac{A}{w_f} \right)^2 \times 1000 \left(\frac{w}{w_f} \right)^{-1} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

- mit D_{ws} Flüssigkeitstransportkoeffizient für den Saugvorgang [m^2/s]
 A Wasseraufnahmekoeffizient [$\text{kg}/\text{m}^2 \sqrt{\text{s}}$]
 w Wassergehalt [kg/m^3]
 w_f freie Wassersättigung [kg/m^3]

Analog dazu kann der Koeffizient für das Weiterverteilen generiert werden.

Als Ursache des Flüssigwassertransportes verwendet WUFI somit den Wassergehaltsgradienten. Dazu muss angemerkt werden, dass in kapillarporösen Materialien der maßgebliche Feuchtetransportmechanismus der kapillare Flüssigtransport ist. Obwohl es sich eigentlich um eine Strömungserscheinung handelt, lässt sich der Flüssigtransport aber in den Porenräumen mit für bauphysikalische Zwecke hinreichender Genauigkeit durch einen Diffusionsansatz beschreiben:

$$g_w = -D_w(w) \times \text{grad } w \quad (\text{Gl. 6.2})$$

- mit g_w Flüssigtransportstromdichte [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

⁹² Vgl. Lohmeyer (2000), S. 572

w	Wassergehalt [kg/m ³]
D _w	Flüssigtransportkoeffizient [m ² /s]

Delphin bietet im Gegensatz dazu noch die Möglichkeit als Transportpotential den Kapillardruckgradienten anzusetzen. Dies wird in Abschnitt 6.7.2 näher erläutert.

6.4 Berechnung einer Betonaußenwand – WUFI

Die in den folgenden Abschnitten durchgeführten Berechnungen entsprechen der Annahme, dass die nachstoßende Wasserfront die Feuchteabgabe in den Raum beeinflusst. Zunächst wird die Wasserabgabe auf der Rauminnenseite durch eine 30 cm dicke Außenwand aus wasserundurchlässigem Beton, die sich im erdberührten Bereich im Grundwasser befindet, untersucht. Die Eingangsgrößen mit den dazugehörigen Kennwerten sowie die Oberflächenübergangskoeffizienten sind in der Tabelle 6.1 aufgeführt.

An dieser Stelle wird noch einmal darauf hingewiesen, dass eine Unterscheidung bei der Berechnung zwischen einem "Normalbeton" und einem WU-Beton im Prinzip nicht möglich ist. Die Gründe sind sowohl eingangs als auch im Kapitel 5 dargelegt worden, sollen aber hier noch einmal explizit hervorgehoben werden.

Bei einem WU-Beton handelt es sich um einen Normalbeton mit der Anforderung der Wasserundurchlässigkeit. Generell ist zunächst jeder Beton wasserundurchlässig. Eine bedingte Wasserdurchlässigkeit stellt sich lediglich auf Grund von betontechnologischen Gründen durch einen zu hohen w/z-Wert (> 0,6) sowie durch entstehende Risse nach der Betonage ein. Dies kann unter anderem durch konstruktive Maßnahmen wie einer zusätzlichen Bewehrung zur Rissbreitenbeschränkung verhindert werden (Prinzip der Weißen Wanne). Zum anderen muss der Beton ein möglichst dichtes Betongefüge aufweisen, um ein zusammenhängendes Kapillarporennetz zu vermeiden. Damit verbunden ist eine ausreichende Nachbehandlung des eingebauten Betons nötig.

Bei der folgenden Berechnung wird aus der Materialdatenbank des Fraunhofer Institutes ein Beton mit einem w/z-Wert von 0,5 ausgewählt. Dadurch ist die Anforderung bezüglich des Wasser-Zement-Wertes an einen WU-Beton (w/z < 0,6) erfüllt. Ebenso werden bei der Modellierung der Außenwand keinerlei Risse angesetzt, was dem Grundsatz der Rissbreitenbeschränkung bei einer Weißen Wanne gleicht. Somit entspricht die Berechnung mit dem gewählten Normalbeton der Berechnung durch ein wasserundurchlässiges Bauwerk aus Beton. Deshalb wird im Folgenden der "Normalbeton" als WU-Beton bezeichnet.

WU-Beton	
Stoffkennwerte	
Eingangsgröße	Materialkennwert
Rohdichte	2300 kg/m ³
Porosität	0,18 m ³ /m ³
Wärmekapazität trocken	850 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit trocken	1,6 W/mK
Diffusionswiderstandszahl trocken	180 [-]
Oberflächenübergangskoeffizienten	
Außenoberfläche	Kennwert
Wärmewiderstand	0,001 m ² K/W (Erdreich)
s _d -Wert	0 m (keine Beschichtung)
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	-
Langwellige Strahlungsemissionszahl	-
Regenwasserabsorptionszahl	1
Innenoberfläche	
Wärmewiderstand	0,13 m ² K/W
s _d -Wert	0 m (keine Beschichtung)
Optionale Parameter	
Wasseraufnahmekoeffizient	0,003 kg/m ² √s
Bezugsfeuchtegehalt u ₈₀	85 kg/m ³
Freie Wassersättigung u _f	150 kg/m ³

Tabelle 6.1: Stoffkennwerte WU-Beton, WUFI

Die Abbildung 6.2 zeigt den Verlauf der Wasserabgabe auf der Innenseite einer 30 cm dicken Außenwand über einen Berechnungszeitraum von 3 Jahren. Zu Beginn der Berechnung werden pro m² Wandfläche ca. 25 g/(m²d) an den Raum abgegeben. Dieser Wert sinkt sukzessive in einem Zeitraum von ungefähr einer Woche auf 10 g/(m²d) ab und verläuft weiter abnehmend bis nach 128 Tagen der Minimalwert von etwa 2 g/(m²d) erreicht ist. Dies hängt damit zusammen, dass das Bauteil zunächst an der Außenseite abtrocknet und sich somit der Feuchtestrom verringert.

Erst durch das weitere Vordringen der Feuchtefront im Bauteil wird die Wasserabgabe wieder erhöht (siehe Abb. 6.3 und 6.4, Feuchtefront bzw. Wassergehalt jeweils in blau eingefärbt).

Der Berechnungszeitraum ist in diesem Fall auf 3 Jahre begrenzt, da deutlich wird, dass sich nach dieser Zeit die Wasserabgabe einem Wert von ca. 16 g/(m²d) annähert. Der nahezu eingeschwungene Vorgang ist durch eine horizontale Tangente gekennzeichnet. Des Weiteren lässt der Verlauf der Wasserfront erkennen, dass diese nicht das Bauteilinnere erreicht und eine Abtrocknung bzw. Verdunstung in das Rauminnere gegeben ist. Es gelangt also kein Wasser an die Innenseite des Bauteiles, was der Vorstellung eines wasserundurchlässigen Betons entspricht.

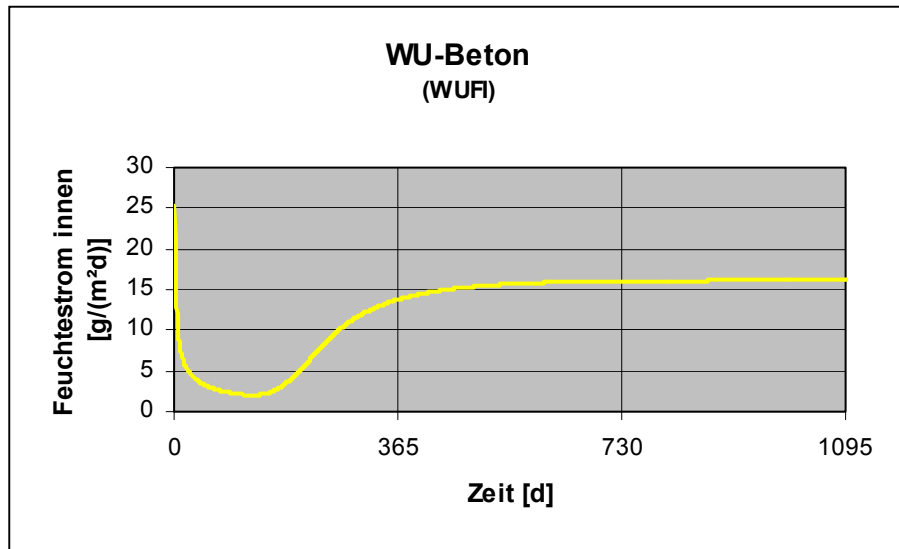


Abb. 6.2: Feuchtestrom innen WU-Beton, WUFI

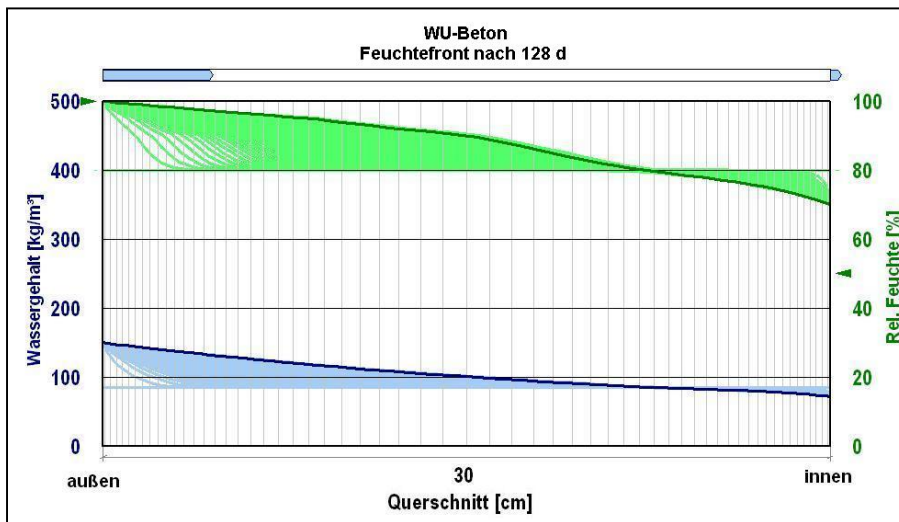


Abb. 6.3: Feuchtefront WU-Beton nach 128 d, WUFI

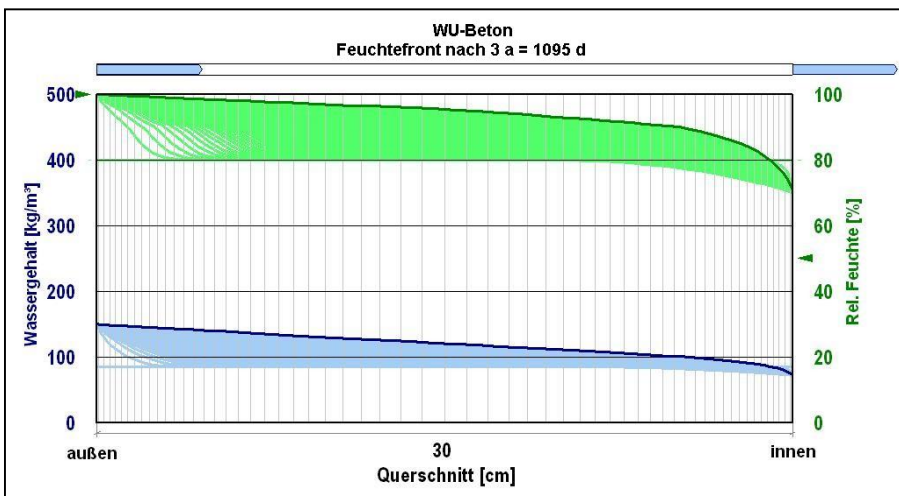


Abb. 6.4: Feuchtefront WU-Beton nach 3 a, WUFI

Es folgt die Darstellung der Berechnung der Feuchteströme einer Betonwand mit einer Innenbeschichtung.

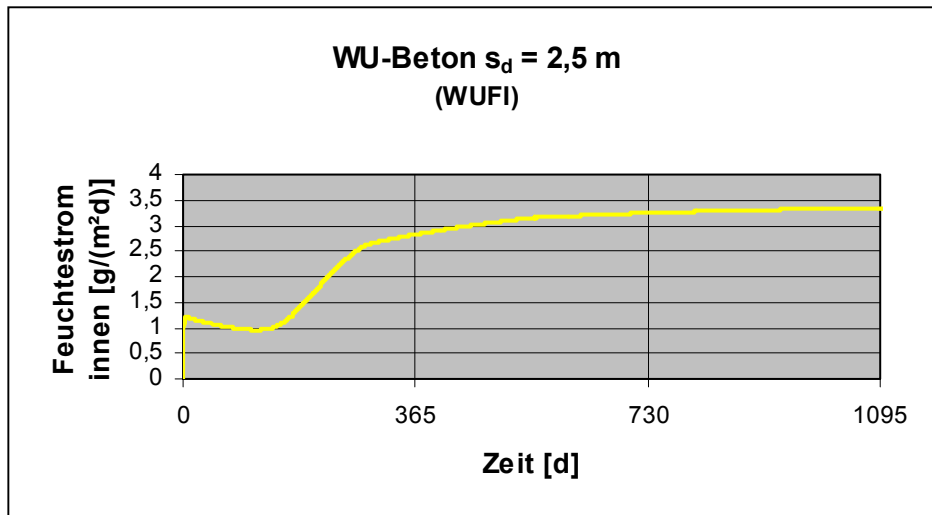
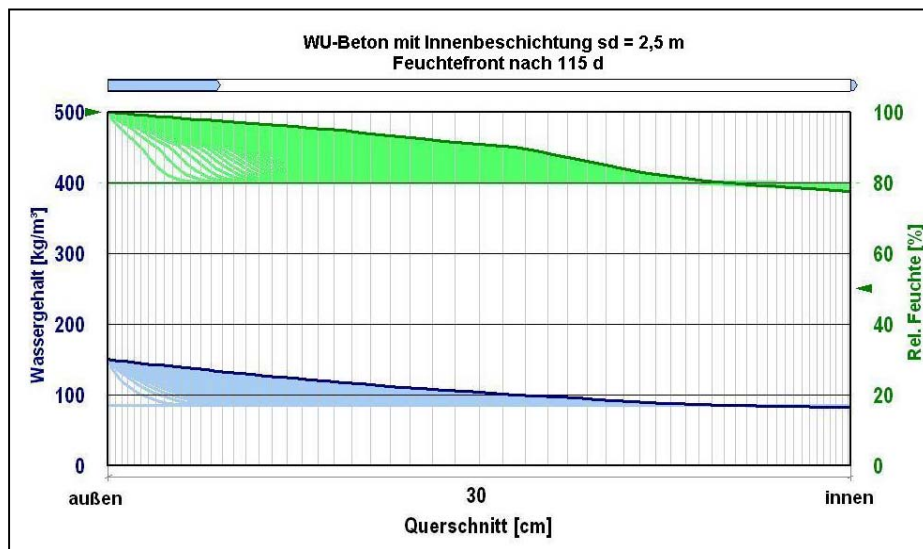
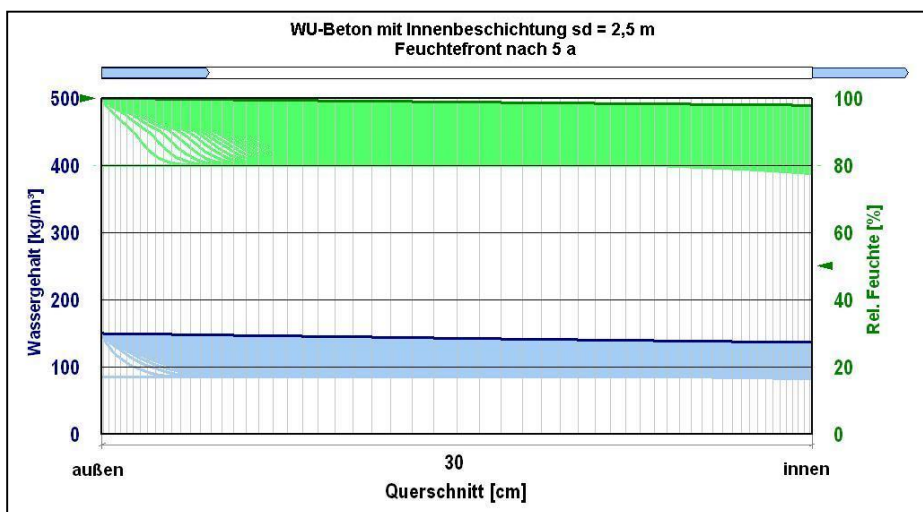
6.4.1 Berechnung einer Betonaußenwand ($s_d = 2,5 \text{ m}$) – WUFI

Die Eingangsgrößen für die nachfolgende Berechnung ändern sich nur dahingehend, dass auf der Innenseite eine Beschichtung mit einem s_d -Wert von 2,5 m aufgebracht wird. Dieser beschreibt die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke und berechnet sich aus dem Diffusionswiderstand μ und der Schichtdicke s ($s_d = \mu \times s$). Das heißt, dass zum Beispiel eine Putzschicht mit $s = 2 \text{ cm}$ und einem Diffusionswiderstandsfaktor von 35 den gleichen Diffusionswiderstand wie eine 70 cm dicke Luftschicht besitzt.

Für den vorliegenden Fall entspricht der s_d -Wert von 2,5 m einer mineralischen Dichtungsschlämme mit einer Trockenschichtdicke von 2,5 mm und einem Wasserdampfdiffusionskoeffizienten μ von 1000.⁹³ Die Berücksichtigung erfolgt über die Definition des Oberflächenübergangskoeffizienten auf der Innenoberfläche.

Der Verlauf des Feuchteintrages in den Innenraum ist dadurch gekennzeichnet, dass die Wasserabgabe zunächst durch die Innenbeschichtung nahezu verhindert wird und nach 115 Tagen die minimale Abgabe von 0,9 g/(m²d) erreicht. Wiederum führt die fortschreitende Feuchtefront zu einer Erhöhung des Feuchteintritts in den Raum. Nach einem Berechnungszeitraum von 5 Jahren konvergiert der Wert zu etwa 3,4 g/(m²d). Der Feuchtestrom sowie die Wassergehaltsverteilungen über den Querschnitt nach 115 Tagen und nach 5 Jahren sind den Abbildungen 6.5 bis 6.7 zu entnehmen.

⁹³ Vgl. Schomburg (2004)

Abb. 6.5: Feuchtestrom innen WU-Beton ($s_d = 2,5$ m), WUFIAbb. 6.6: Feuchtefront WU-Beton ($s_d = 2,5$ m) nach 115 d, WUFIAbb. 6.7: Feuchtefront WU-Beton ($s_d = 2,5$ m) nach 5 a, WUFI

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Berechnung unter Einbeziehung einer Innenbeschichtung auf Bitumenbasis vorgestellt.

6.4.2 Berechnung einer Betonaußenwand ($s_d = 160 \text{ m}$) – WUFI

Als Abschluss der Untersuchung einer durch Grundwasser beanspruchten Betonaußenwand wird eine Innenbeschichtung aus Bitumen mit einem s_d -Wert von 160 m aufgetragen. Die Eingangsgrößen bleiben ansonsten unverändert. Im Gegensatz zu der mineralischen Abdichtung, die durch den Oberflächenübergangskoeffizienten berücksichtigt wurde, wird in diesem Fall eine bituminöse Dachbahn aus der Materialdatenbank von WUFI aufgebracht. Aus dem Diffusionswiderstand von $\mu = 100000$ ergibt sich bei einer Schichtdicke von 0,0016 m ein s_d -Wert von 160 m.

In den Abbildungen 6.8 bis 6.10 sind die Verläufe einzusehen. Auf Grund der Bitumeninnenbeschichtung ergibt sich nach rund 5 Jahren eine unerhebliche Wasserabgabe von 0,06 g/(m²d). Hinter der Abdichtung stellt sich im Gegensatz zu der Variante mit der mineralischen Abdichtung ein geringfügig höherer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt ein.

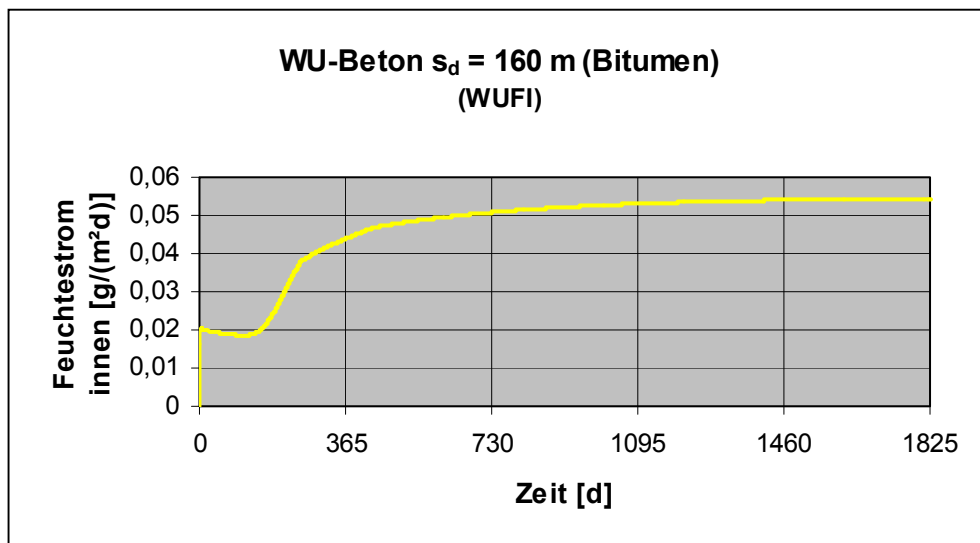


Abb. 6.8: Feuchtestrom innen WU-Beton ($s_d = 160 \text{ m}$), WUFI

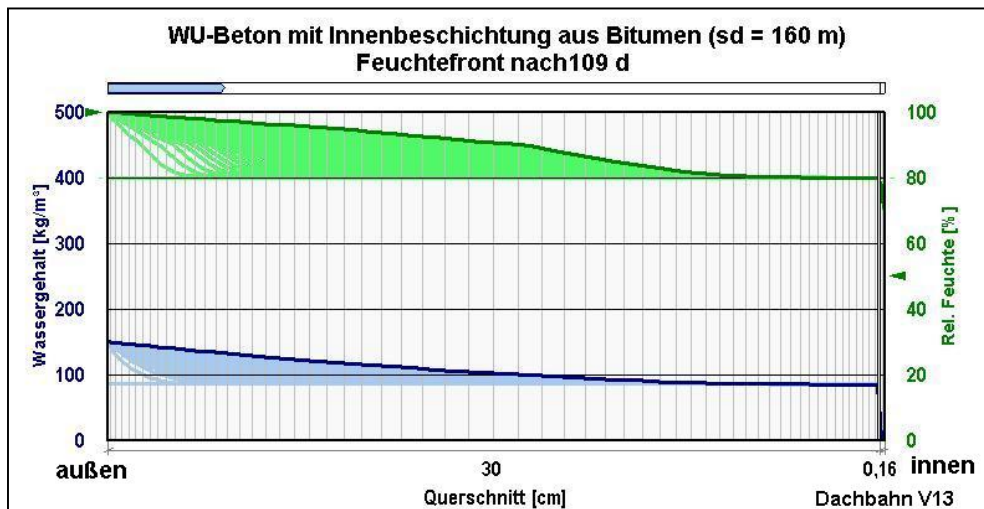


Abb. 6.9: Feuchtefront WU-Beton ($s_d = 160 \text{ m}$) nach 109 d, WUFI

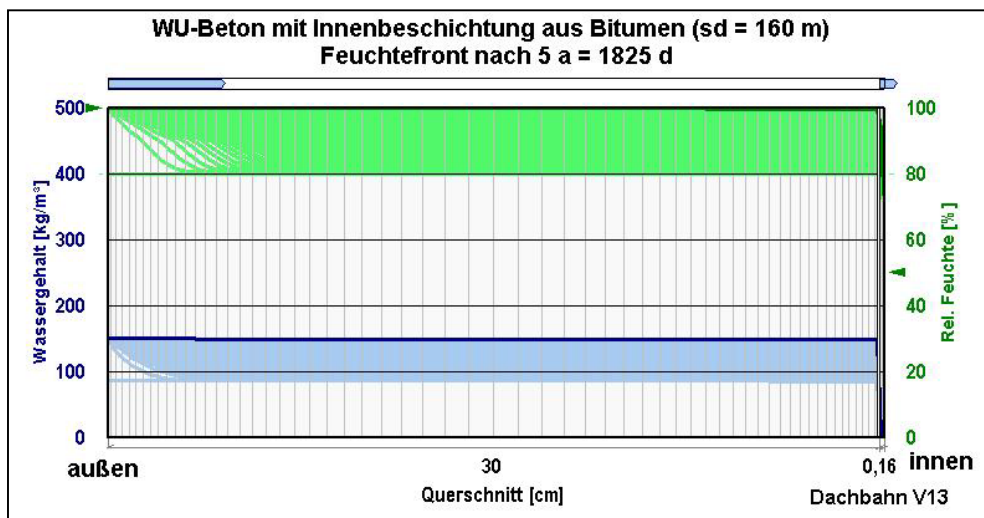


Abb. 6.10: Feuchtefront WU-Beton ($s_d = 160 \text{ m}$) nach 5 a, WUFI

Im Zuge der Berechnungen wird deutlich, dass mit zunehmender Behinderung der Diffusion an der Innenoberfläche der Minimalwert der Feuchteabgabe immer früher erreicht wird. Ohne eine Innenbeschichtung ist dies nach 128 Tagen, mit einer mineralischen Beschichtung nach 115 Tagen und mit einer nahezu diffusionsdichten Beschichtung bereits nach 109 Tagen der Fall. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass ein Abtrocknen an der Bauteiloberfläche behindert wird und somit der Anstieg des Feuchtegehaltes im Bauteil im jeweiligen Fall schneller vonstatten geht, was wiederum ein zügigeres Fortschreiten der Feuchtefront zur Folge hat.

6.5 Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk – WUFI

Die Berechnung erfolgt für eine 30 cm dicke Außenwand aus Mauerwerk, für die ebenfalls die Situation des anstehenden Grundwassers simuliert wird. Es sollen dadurch die erheblichen Unterschiede im Feuchteeintrag im Gegensatz zu einer Betonaußenwand deutlich gemacht werden.

Der Tabelle 6.2 sind nachfolgend die Eingangsgrößen des aus der Materialdatenbank des Fraunhofer Institutes ausgewählten Kalksandsteinmauerwerkes zu entnehmen.

Kalksandsteinmauerwerk	
Stoffkennwerte	
Eingangsgröße	Materialkennwert
Rohdichte	1900 kg/m ³
Porosität	0,29 m ³ /m ³
Wärmekapazität trocken	850 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit trocken	1,0 W/mK
Diffusionswiderstandszahl trocken	28 [-]
Oberflächenübergangskoeffizienten	
Außenoberfläche	Kennwert
Wärmewiderstand	0,001 m ² K/W (Erdreich)
s _d -Wert	0 m (keine Beschichtung)
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	-
Langwellige Strahlungsemissionszahl	-
Regenwasserabsorptionszahl	1
Innenoberfläche	
Wärmewiderstand	0,13
s _d -Wert	0 m (keine Beschichtung)
Optionale Parameter	
Wasseraufnahmekoeffizient	0,045 kg/m ² √s
Bezugsfeuchtegehalt u ₈₀	25 kg/m ³
Freie Wassersättigung u _f	250 kg/m ³

Tabelle 6.2: Stoffkennwerte Kalksandsteinmauerwerk, WUFI

Aus den Abbildungen 6.11 bis 6.13 wird deutlich, dass nach einem minimalen Abfall des Feuchtestromes in den Raum auf 2,6 g/(m²d) nach 14 Tagen der Verlauf innerhalb von 152 Tagen extrem ansteigt und nach 166 Tagen ein gleich bleibender Feuchteintrag von 788 g/(m²d) erreicht wird. Dies ist durch die horizontale Tangente gekennzeichnet. Die schnelle Erhöhung des Feuchtestromes ist auf den größeren Anteil an wasserführenden Poren im Gegensatz zum Beton zurückzuführen, was wiederum ein schnelleres Fortschreiten der Feuchtefront im Querschnitt zur Folge hat.

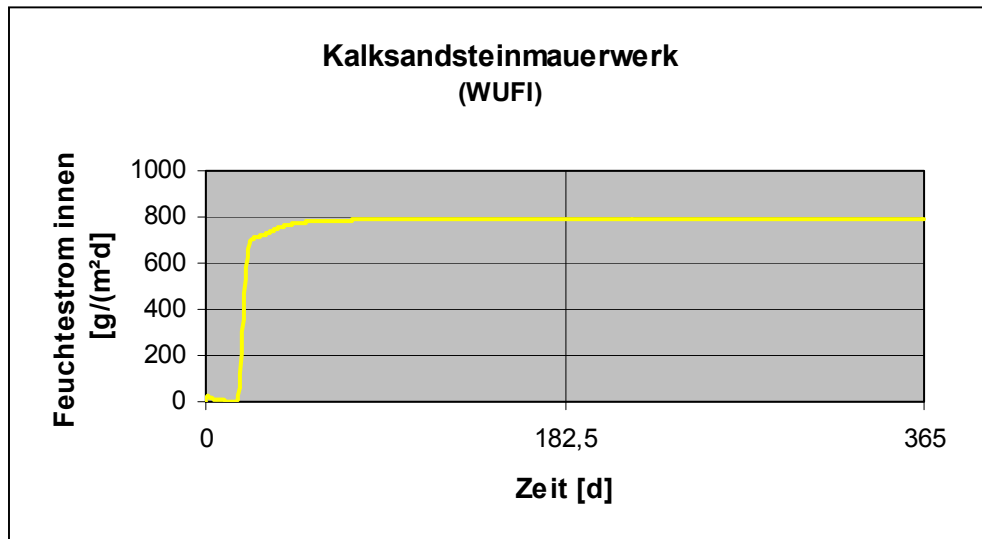


Abb. 6.11: Feuchtestrom innen MW, WUFI

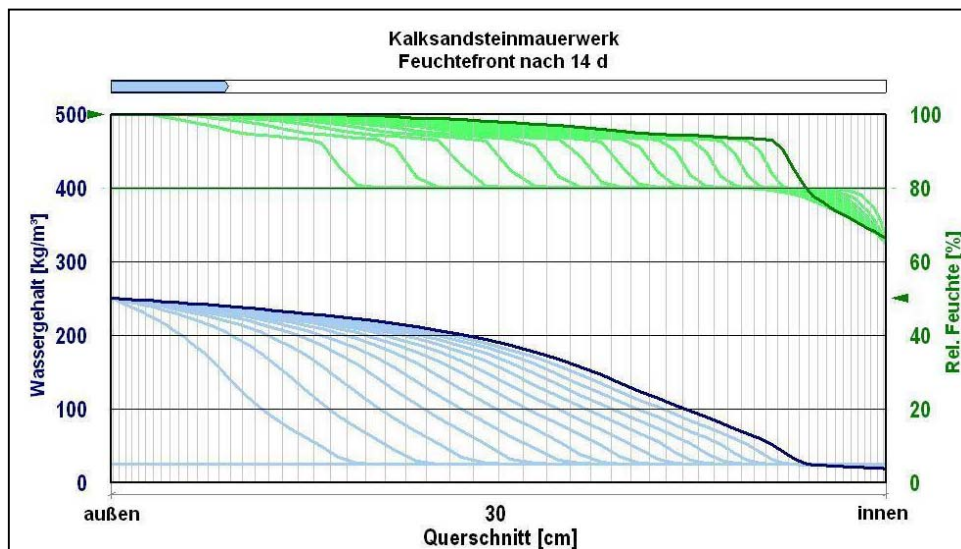


Abb. 6.12: Feuchtestrom MW nach 14 d, WUFI

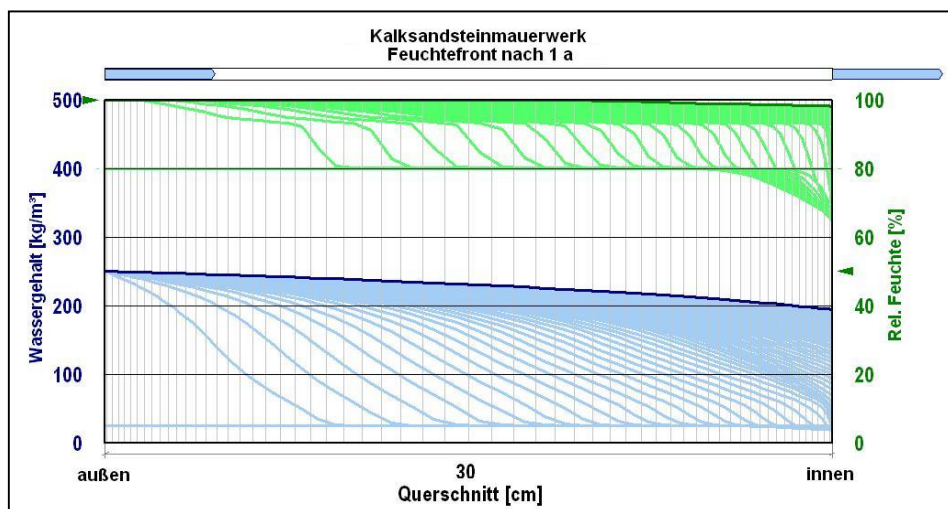


Abb. 6.13: Feuchtestrom MW nach 1 a, WUFI

Aus dem Verlauf des Wassergehaltes im Bauteil (Abbildungen 6.12 und 6.13) ist klar zu erkennen, dass bereits nach 14 Tagen der Querschnitt stark durchfeuchtet ist. Auf der Innenseite wird der Feuchtestrom dadurch allerdings gerade noch nicht beeinflusst, nimmt dann allerdings nach einer relativ kurzen Zeit exorbitante Werte an. Eine Abtrocknung des Bauteiles auf der Innenseite liegt nicht mehr vor.

Es folgt die Betrachtung des gleichen Mauerwerks unter Auftrag einer mineralischen Innenbeschichtung.

6.5.1 Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk ($s_d = 2,5 \text{ m}$) – WUFI

Die Eingangswerte der nachfolgenden Untersuchung entsprechen denen der vorherigen Betrachtung. Auf der Innenseite wird nun allerdings analog zu der zweiten Untersuchung der Betonaußenwand eine mineralische Dichtungsschlämme mit einem s_d -Wert von 2,5 m aufgebracht.

Die Wasserabgaben und die sich einstellenden Wassergehalte im Querschnitt sind den Abbildungen 6.14 bis 6.16 zu entnehmen. Der Maximalwert von ca. 33 ($\text{g}/\text{m}^2\text{d}$) wird nach 18 Tagen erreicht, wobei dieser auf Grund einer übersichtlicheren Darstellung nicht wiedergegeben ist. Nach 117 Tagen konvergiert die Abgabe zu einem Wert von etwa 4 ($\text{g}/\text{m}^2\text{d}$), und es stellt sich ein kontinuierlicher Massenstrom ein.

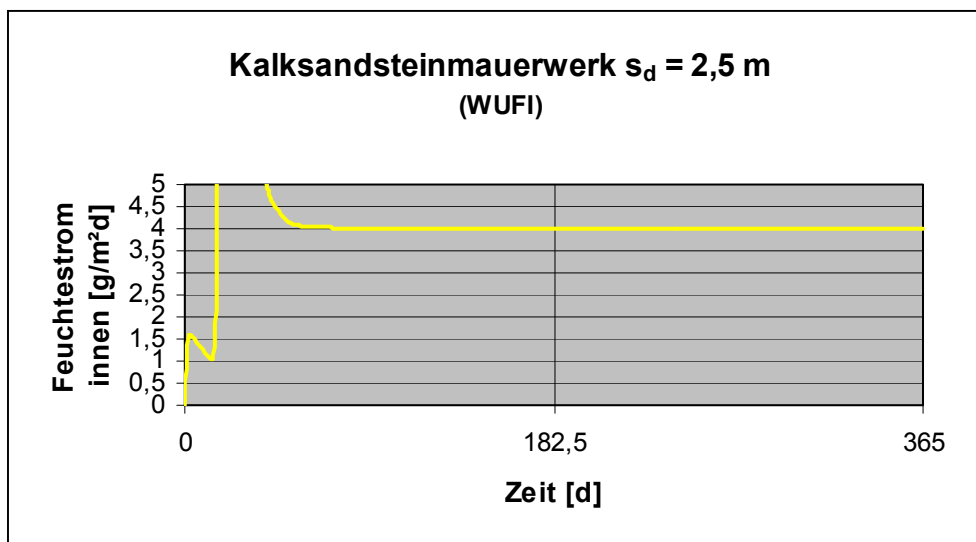


Abb. 6.14: Feuchtestrom innen MW ($s_d = 2,5 \text{ m}$), WUFI

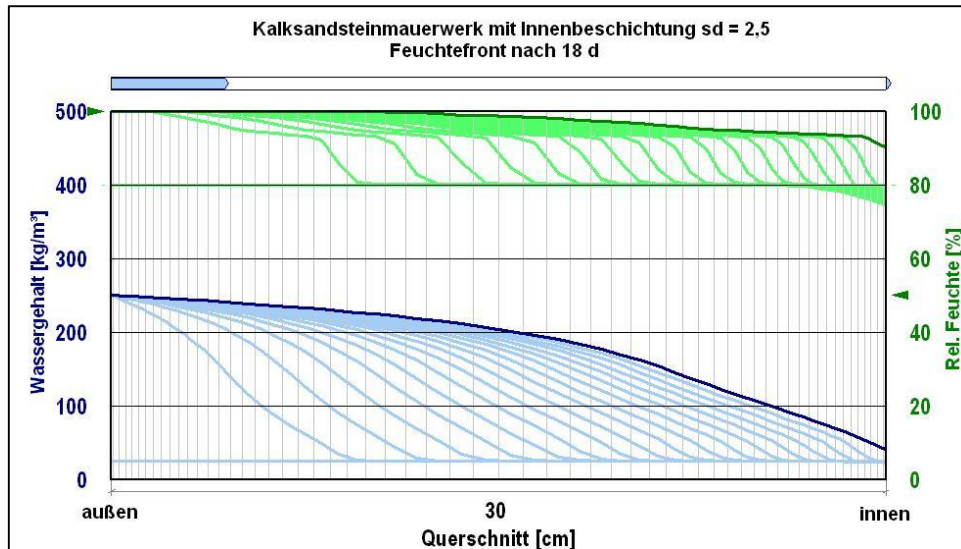


Abb. 6.15: Feuchtefront MW ($s_d = 2,5$ m) nach 18 d, WUFI

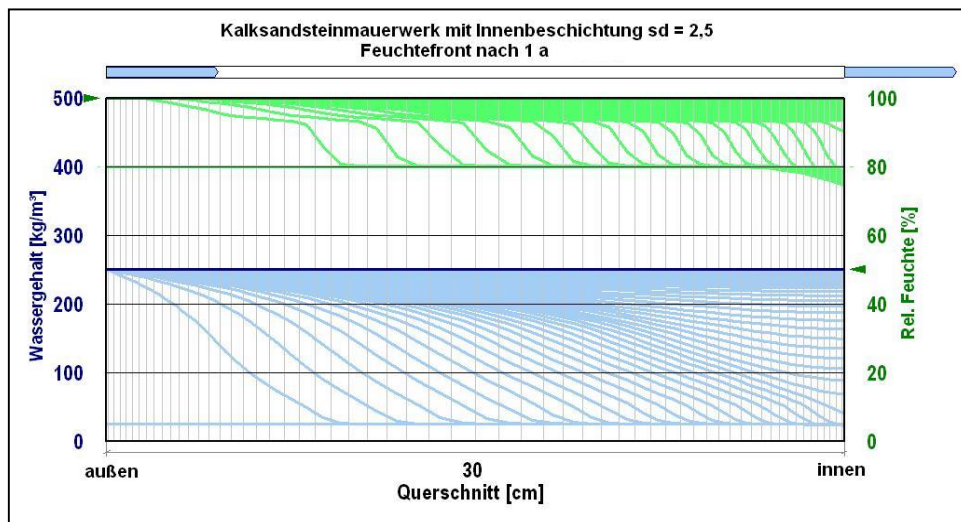
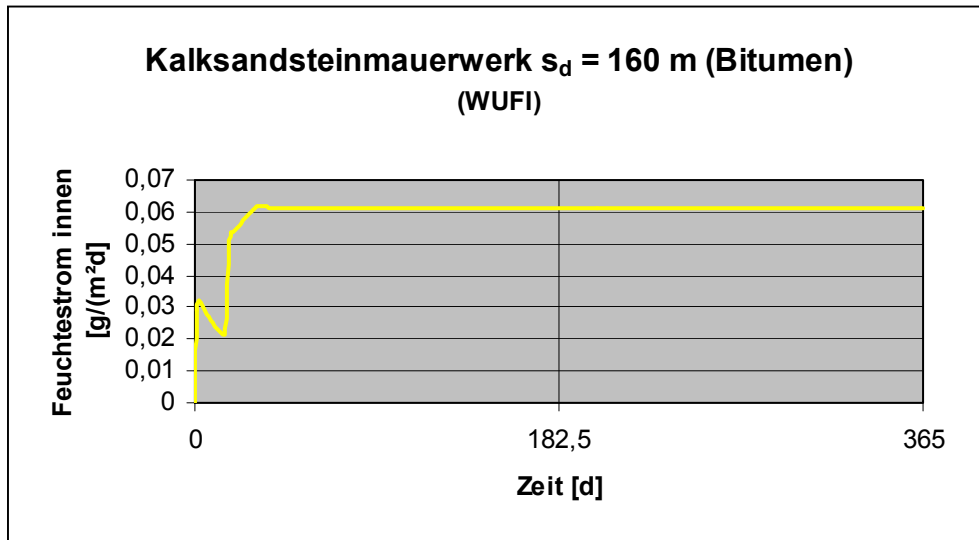
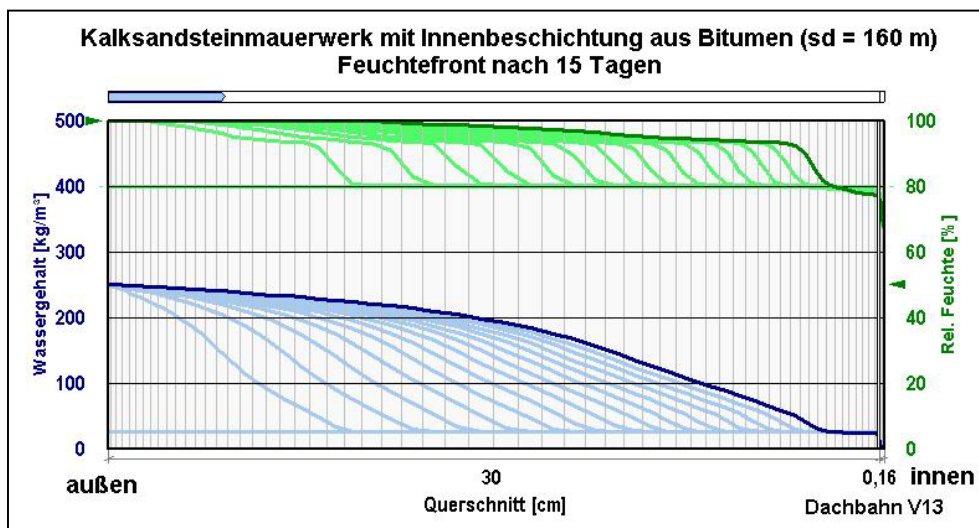
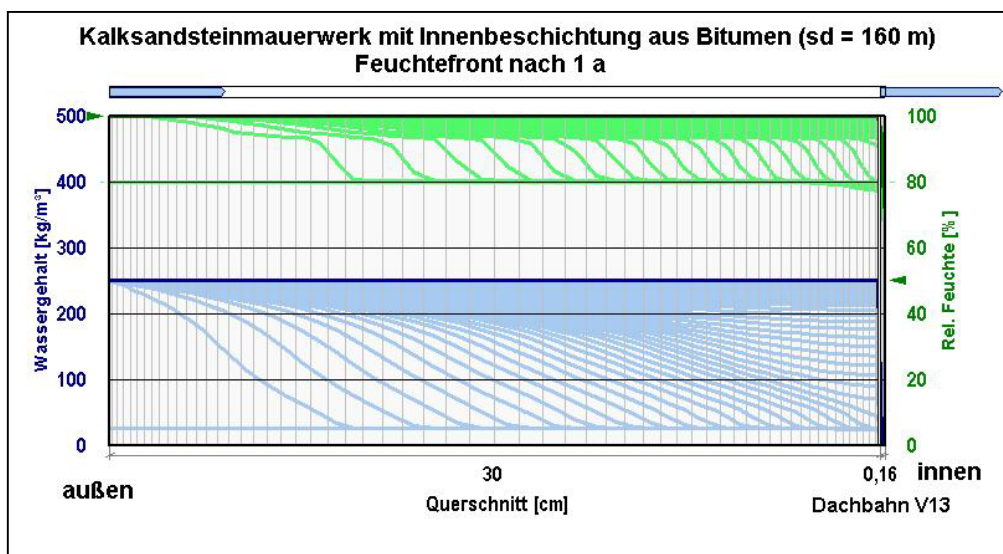


Abb. 6.16: Feuchtefront MW ($s_d = 2,5$ m) nach 1 a, WUFI

6.5.2 Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk ($s_d = 160$ m) – WUFI

Die Abbildung 6.17 zeigt den Verlauf des Feuchtedurchgangs auf der Innenseite des Kalksandsteinmauerwerks unter Verwendung einer Innenbeschichtung auf Bitumenbasis mit einem s_d -Wert von 160 m. Die Feuchtefront (siehe Abbildung 6.18 und 6.19) erreicht innerhalb eines relativ kurzen Zeitraums von 15 Tagen die Innenbeschichtung, und es stellt sich ein unwesentlicher Feuchtestrom von $0,06 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$ ein.

Abb. 6.17: Feuchtestrom innen MW ($s_d = 160$ m), WUFIAbb. 6.18: Feuchtefront MW ($s_d = 160$ m) nach 15 d, WUFIAbb. 6.19: Feuchtefront MW ($s_d = 160$ m) nach 1 a, WUFI

6.6 Zusammenfassung der Ergebnisse – WUFI

Die dargestellten Diagramme zeigen die Ergebnisse der obigen Berechnungen. Es handelt sich jeweils um den eingeschwungenen Zustand, der sich in Abhängigkeit von den Materialien nach unterschiedlich langen Berechnungszeiträumen ergeben hat und durch die horizontale Tangente in den Verläufen des Feuchtstromes gekennzeichnet ist.

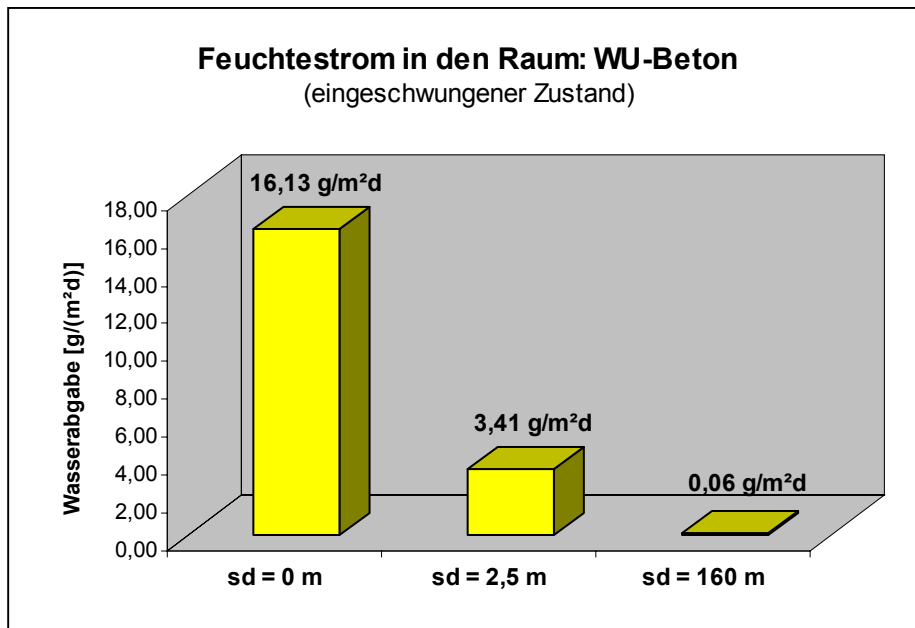


Abb. 6.20: Feuchtstrom WU-Beton, WUFI

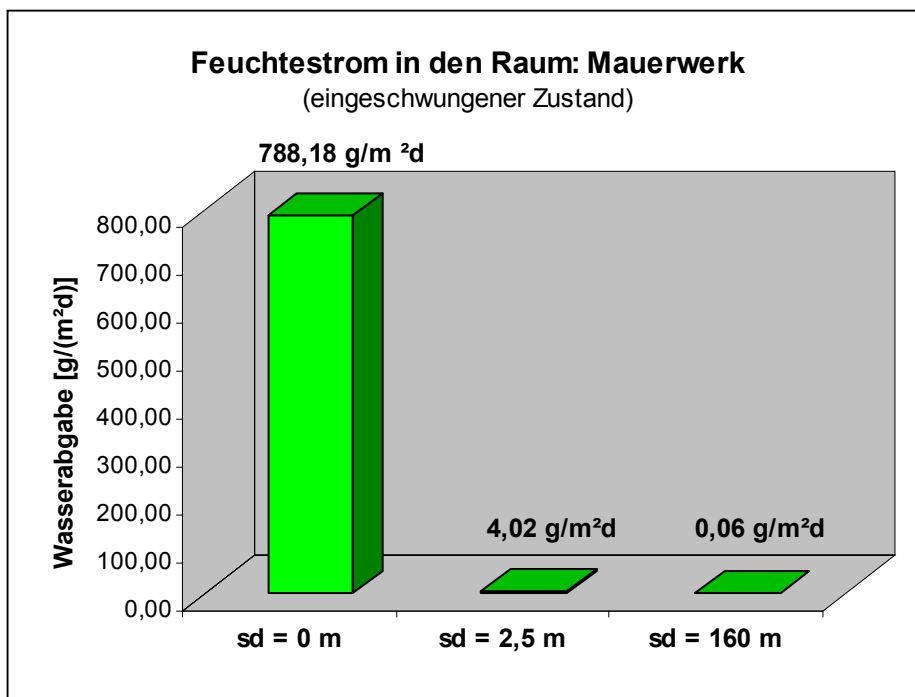


Abb. 6.21: Feuchtstrom MW, WUFI

6.7 Grundlagen der Arbeitsweise von Delphin



Das Programmpaket Delphin dient der Simulation des gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Salz- und Lufttransportes in kapillarporösen Baustoffen.

Es lassen sich sowohl ein- als auch zweidimensionale Probleme zum thermischen und hygrischen Verhalten von Baustoffen behandeln.

Die verwendete Theorie geht wie das Programm WUFI weit über das als Standard geltende Glaser-Schema der DIN 4108-5 hinaus, da insbesondere beim Feuchtetransport flüssiges und gasförmiges Wasser unterschieden werden.

Das zugrunde liegende Transportmodell geht davon aus, dass es sich bei den transportierten Größen, das heißt der Energie, den Wasser-, Luft- und den Salzmolekülen um Erhaltungsgrößen handelt. Wenn also keine äußeren Quellen wie zum Beispiel Wärmequellen vorliegen, müssen die in ein betrachtetes Referenzvolumen hinein- bzw. herausfließenden Moleküle sowie die Energie sich hinterher in diesem Volumen befinden. Die angewandten Differentialgleichungen ergeben sich aus den eben erwähnten Erhaltungsgleichungen in Verbindung mit den Gesetzen der Thermodynamik.

Mit Delphin lassen sich Wärme- und Energietransporte durch Bauteile und in Konstruktionsdetails, Flüssigkeits- und Dampftransporte sowie Wasseranreicherungen in Konstruktionen beispielsweise zum Nachweis der Dauerhaftigkeit und zur Vermeidung von Feuchteschäden berechnen.

In der Entwicklung steht die Untersuchung von Salztransporten. Ziel soll es sein, den Transport von Salzen, die sich in einem Bauteil befinden oder hinein gelangen können, zu beschreiben, um Aussagen über die Salzausblühungen machen zu können.

6.7.1 Wahl des numerischen Gitters

Die Lösung der dem Programm zugrunde liegenden Differentialgleichungen erfolgt mit dem Prinzip der Finite-Differenzen-Methode.⁹⁴

Dafür wird zunächst das Bauteil, also das Gebiet, für das die Gleichungen gelten sollen, in eine finite Zahl von Gitterzellen durch senkrecht aufeinander stehende Linien zerlegt. Die Ableitungen an den Gitterzellen werden dann durch Differenzen approximiert. Die partiellen Differentialgleichungen werden so in ein System von Differenzen-Gleichungen umformuliert und mittels unterschiedlicher Algorithmen entweder implizit oder explizit gelöst.

Grundsätzlich verhält es sich bei der Wahl des numerischen Gitters ähnlich wie bei WUFI. An den Randgebieten eines Bauteiles bzw. an Schichtenübergängen wird feiner diskretisiert, um die zu erwartenden höher ausfallenden Gradienten besser aufzunehmen. Durch

⁹⁴ Dipl. Ing. Ulrich Ruisinger

den im Programm integrierten Solver wird der Zustand der Konstruktion sukzessive berechnet.

Mit zunehmender Komplexität der Konstruktion und der damit verbundenen Zunahme der Volumenelemente verlängert sich die Berechnungszeit entsprechend. Selbstverständlich haben unterschiedlich lange Zeitschritte bzw. Berechnungszeiträume ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Berechnungsdauer.

6.7.2 Validierung des Programms mit Messdaten

Bei Delphin erfolgt die Dateneingabe prinzipiell wie bei WUFI. Zunächst werden die physikalischen Prozesse ausgewählt, die in die Rechnung einbezogen werden sollen. Neben dem Feuchtegleichgewicht und dem Wärmetransport kann unter anderem die Gravitation berücksichtigt werden, was im vorliegenden Fall des erdberührten Bauteils jedoch nicht notwendig ist.

Nachdem das Bauteil mit den benötigten Schichten aufgebaut worden ist, erfolgt die Importierung der Materialien aus der bereitgestellten Materialdatenbank und die Zuordnung zu den einzelnen Schichten. Die Diskretisierung gestaltet sich wiederum ähnlich wie bei WUFI.

Bevor die Randbedingungen für den vorliegenden Fall des erdberührten Bauteils im Grundwasser festgelegt werden können, müssen zunächst die Klimabedingungen generiert werden. Dies ist notwendig, damit der Bauteiloberfläche eine Klimarandbedingung zugewiesen werden kann. Für die Generierung der Klimabedingungen stellt Delphin eine Reihe von Bedingungen bzw. physikalischen Zuständen zur Verfügung. Neben den Klimabedingungen, die WUFI als Randbedingungen vorgibt, können unter anderem die Himmelsbedeckung [%], die Salzmasse [kg/kg] oder die Luftmassenproduktionsdichte [kg/m³s] festgelegt werden. Hier wird bereits deutlich, dass bei der Wahl der Randbedingungen im Gegensatz zu WUFI erheblich größere Variationsmöglichkeiten bestehen.

Die Simulation eines erdberührten Bauteils im Grundwasser erfolgt über die Definition der Übergangs- bzw. Umgebungsbedingungen.

Für die Randbedingungen im erdberührten Bereich wird es als ausreichend angesehen, für die Außentemperatur einen konstanten Wert von 10°C für das Grundwasser sowie eine damit verbundene 100 %ige relative Luftfeuchtigkeit anzusetzen. Die Innenverhältnisse werden mit 20°C und 50 % relativer Luftfeuchte als konstant angenommen.

Um die Berechnung des Feuchtedurchganges durch ein erberührtes Bauteil zu simulieren, ist es möglich, die Wandaußenseite über die Klimarandbedingung mit Wasser zu beaufschlagen oder genauer gesagt, mit Wasser in Kontakt zu bringen. Dadurch kann eine

statische Druckhöhe von beispielsweise 3 m beaufschlagt werden, die aus dem anstehenden Grundwasser resultiert.

Dies zeigt den entscheidenden Unterschied im Vergleich zu der WUFI-Simulation, bei der die Vorgabe eines hydrostatischen Druckes nicht anwendbar ist.

Gleichzeitig resultiert hieraus allerdings ein numerisches Problem bei der Berechnung des druckwasserbelasteten Bauteiles. Bei der Wahl der physikalischen Prozesse, die in die Berechnung miteinbezogen werden sollen, muss für die Feuchtemassenbilanz das Transportpotential gewählt werden, welches global festgelegt wird. Dafür stehen zum einen der Wassergehaltsgradient und zum anderen der Kapillardruckgradient zur Verfügung. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass die Flüssigwasserleitfähigkeit die Transportkoeffizienten bestimmt. Es ist zu beachten, dass in diesem Fall für das Material die Flüssigwasserleitfähigkeit benötigt wird.

Häufig wird als Ursache des Flüssigwassertransportes der zuerst genannte Wassergehaltsgradient (vgl. auch Abschnitt 6.3.3) angegeben. Im Grunde ist dies aber nicht korrekt, da der Wassergehalt kein thermodynamisches Potential hat wie die Temperatur oder der Kapillardruck. Dennoch lässt sich die Gleichung für die Kapillarwasserstromdichte umschreiben, so dass sich die Diffusivität in Abhängigkeit vom Wassergehalt ergibt.⁹⁵

Auf die Beschreibung der Differentialgleichungen sowie deren Herleitung und Umformung soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Im Gegensatz zum Kapillardruckgradienten wird bei der Verwendung des Wassergehaltsgradienten die Flüssigwasserdiffusivität des jeweiligen Stoffes benötigt.

Beim Ansetzen der Simulationen hat sich herausgestellt, dass eine Berechnung für ein wasserdruckbeanspruchtes Bauteil nur mit dem treibenden Potential des Wassergehaltsgradienten möglich ist, da eine zeitnahe Berechnung ansonsten nicht möglich gewesen wäre. Die Ursachen sind offensichtlich numerischer Art, wobei auch nach Rücksprache mit den Mitarbeitern des Instituts für Bauklimatik in Dresden die Gründe nicht geklärt werden konnten. Es wurde lediglich darauf hingewiesen, dass das Kapillardruckmodell grundsätzlich das Bessere darstellt.

Nachfolgend werden analog zu den Berechnungen mit WUFI eine Beton- und eine Kalksandsteinaußenwand mit Delphin berechnet. Die Stoffkennwerte werden jeweils der im Programm integrierten Materialdatenbank der TU-Dresden entnommen.

6.8 Berechnung einer Betonaußenwand – Delphin

Zunächst wird die Wasserabgabe auf der Rauminnenseite durch eine 30 cm dicke Außenwand aus wasserundurchlässigem Beton untersucht, die sich im erdberührten Bereich

⁹⁵ Vgl. Häupl (2004), S. 262

im Grundwasser befindet, wobei nachfolgend die Eingangsgrößen mit den dazugehörigen Kennwerten sowie die Oberflächenübergangskoeffizienten aufgeführt sind.

Da die Materialdaten der zur Verfügung gestellten Materialdatenbank der TU-Dresden (siehe Tabelle 6.3) entnommen sind, entsprechen die Stoffkennwerte nicht zu einhundert Prozent denen der oben verwendeten. Die Eingangsparameter sind aber ähnlich, wodurch eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. Grundsätzlich wird formal wiederum der Feuchtransport durch einen "Normalbeton" berechnet. Aus den unter anderem in Abschnitt 6.2 dargelegten Gründen entspricht dies einer Berechnung durch ein wasserundurchlässiges Bauteil. Deshalb wird im Folgenden von WU-Beton gesprochen.

WU-Beton	
Stoffkennwerte	
Eingangsgröße	Materialkennwert
Rohdichte	2100 kg/m ³
Porosität	0,16 m ³ /m ³ bzw. 0,14 m ³ /m ³
Wärmekapazität trocken	1050 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit trocken	2,1 W/mK
Diffusionswiderstandszahl trocken	65 [-]
Oberflächenübergangskoeffizienten	
Außenoberfläche	Kennwert
Wärmewiderstand	0 m ² K/W
s _d -Wert	0 m (keine Beschichtung)
Innenoberfläche	
Wärmewiderstand	0,13 m ² K/W
s _d -Wert	0 m (keine Beschichtung)
Optionale Parameter	
Wasseraufnahmekoeffizient	0,004 kg/m ² √s

Tabelle 6.3: Stoffkennwerte WU-Beton, Delphin

Der Verlauf in Abbildung 6.22 zeigt den Feuchtestrom an der Innenseite der Außenwand, der auf Grund eines von außen wirkenden hydrostatischen Druckes von 3 m auf das Bauteil resultiert. Der qualitative Gang der Kurve entspricht dem Verlauf der entsprechenden Berechnung mit WUFI (siehe Abbildung 6.2 in Abschnitt 6.4). Es ergibt sich allerdings eine etwas größere Feuchteabgabe in den Raum von ungefähr 18 g/(m²d). Dies ist in erster Linie auf die verfahrensspezifisch unterschiedliche Ermittlung der Materialkennwerte zurückzuführen. Die Berücksichtigung eines hydraulischen Druckgefälles spielt, wie später noch gezeigt werden wird, im Vergleich zu WUFI nur eine untergeordnete Rolle.

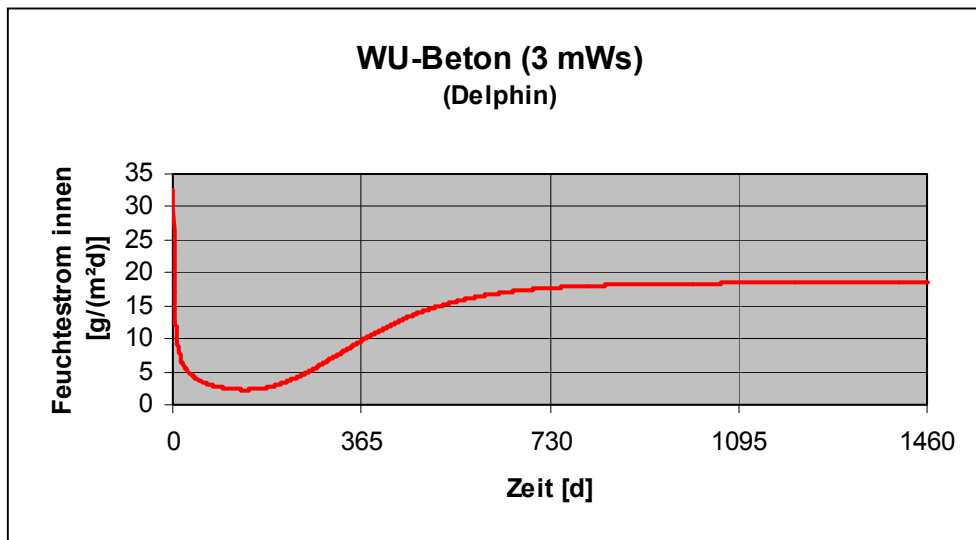


Abb. 6.22: Feuchtestrom WU-Beton, Delphin

Da Delphin in Bezug auf die Darstellung der Ergebnisse im Gegensatz zu WUFI andere Möglichkeiten bietet, unterscheidet sich die Abbildung 6.23 formal von den Abbildungen der Feuchtefronten aus WUFI. Die Ordinate zeigt den Wassergehalt in Vol.-%. Der maximale Wassergehalt von 14 Vol.-%, der sich durch die Wasseraufnahme an der Außenoberfläche unmittelbar einstellt, entspricht einem Gehalt von 140 kg/m^3 und somit in etwa der freien Wassersättigung des Normalbetons bei WUFI ($\rightarrow u_{f,WUFI} = 150 \text{ kg/m}^3$). Der Anfangszustand von ca. 4,5 Vol.-% stellt den Bezugsfeuchtegehalt u_{80} dar. Hierbei handelt es sich um die Gleichgewichtsfeuchte bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 %, die sich aus der gewählten Anfangsbedingung ergibt. Im Vergleich dazu liegt der u_{80} -Wert des verwendeten Betons bei WUFI mit 8,5 Vol.-% beinahe doppelt so hoch. Die Kurvenschar beschreibt den Zustand des Wassergehalts im Querschnitt jeweils im Abstand von 25 Tagen. Der in grün dargestellte Verlauf zeigt die Situation nach 140 Tagen, bei dem sich ein minimaler Feuchtestrom aus dem Bauteil von ca. $2,27 \text{ g/(m}^2\text{d)}$ ergibt. In diesem Zeitraum stellt sich auch eine maximale Austrocknungstiefe im Bauteil von ungefähr 8 bis 10 cm ein. Mit fortschreitender Feuchtefront nimmt der Austrocknungsbereich, also der Bereich, der sich unterhalb des Anfangszustandes befindet, langsam ab. Die obere rote Kurve beschreibt den Endzustand nach 4 Jahren, bei dem sich wegen des geringen Abstands der Tagesschritte ein quasistationärer Zustand einstellt. Dies wird durch den Feuchtestromverlauf unterstrichen, aus dem nach dem Betrachtungszeitraum eine nahezu konstante Feuchteabgabe in den Innenraum resultiert. Es ist zu erkennen, dass zu keinem Zeitpunkt eine Übersättigung des Betons vorhanden ist und somit kein flüssiges Wasser an der Innenseite auftritt, sondern der Beton etwa bis zu einem Wassergehalt von 3,40 Vol.-% austrocknet.

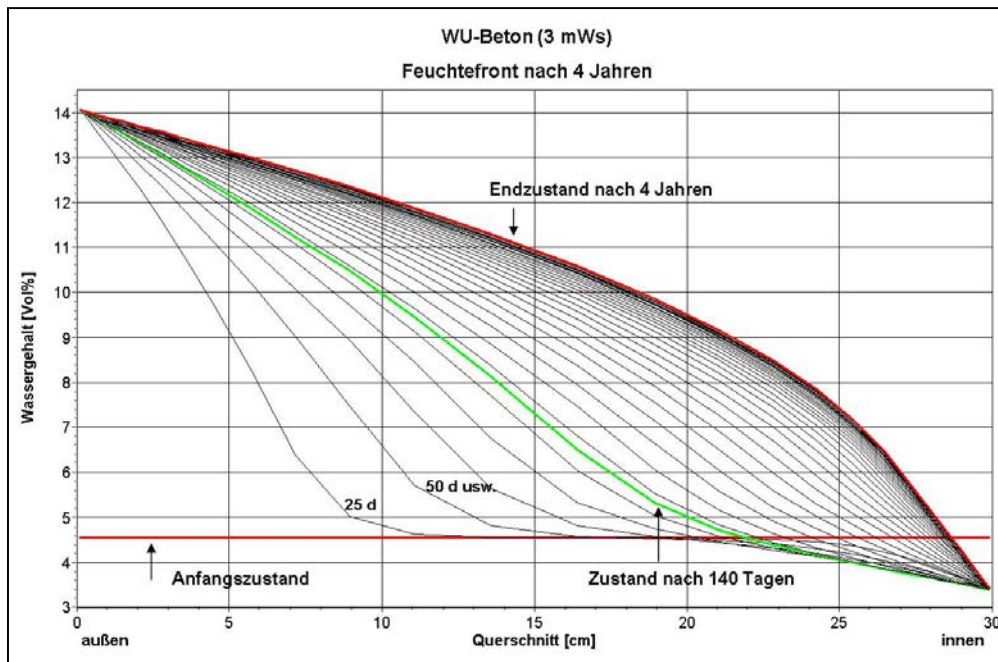


Abb. 6.23: Feuchtefront WU-Beton, Delphin

Im Weiteren werden die Ergebnisse der Berechnungen mit einer aufgetragenen Innenbeschichtung dargestellt.

6.8.1 Berechnung einer Betonaußenwand ($s_d = 2,5 \text{ m}$) – Delphin

Die mineralische Innenbeschichtung wird durch die Generierung der Wasserdampfdiffusion als Klimarandbedingung berücksichtigt. Es besteht dabei die Möglichkeit, den Kehrwert des Wasserdampfübergangskoeffizienten mit der Gleichung 6.3 zu berechnen und anzusetzen:

$$R = \frac{\overbrace{s \times \mu}^{s_d} \times R_D \times T}{D} \quad (\text{Gl. 6.3})$$

mit ⁹⁶	R	Dampf Widerstand einer Schicht [m/s]
	s	Schichtdicke [m]
	μ	Diffusionswiderstand [-]
	s_d	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke [m]
	R_D	Gaskonstante Wasserdampf [J/(kgK) = m ² /(s ² K)]
	T	Temperatur [K]
		→ $R_D \times T = 135.600 \text{ J/kg} = 135.600 \text{ m}^2/\text{s}^2$
	D	Diffusionskonstante von Wasserdampf in Luft [m ² /s]
		→ $D(20^\circ\text{C}) = 2,6194 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

⁹⁶ Vgl. Klopfer (2002), S. 375

Der Wasserdampfübergangswiderstand ergibt sich somit zu

$$R = \frac{2,5 \times 135.600}{2,6194 \times 10^{-5}} = 1,294 \times 10^{10} \text{ m/s bzw. } \frac{1}{R} = 7,73 \times 10^{-11} \text{ s/m.}$$

Der Verlauf (siehe Abbildung 6.24) ist wiederum dadurch gekennzeichnet, dass zunächst ein minimaler Wert beim Feuchtestrom erreicht wird und daraufhin die Wasserabgabe zu einem Wert von etwa 3,75 g/(m²d) konvergiert.

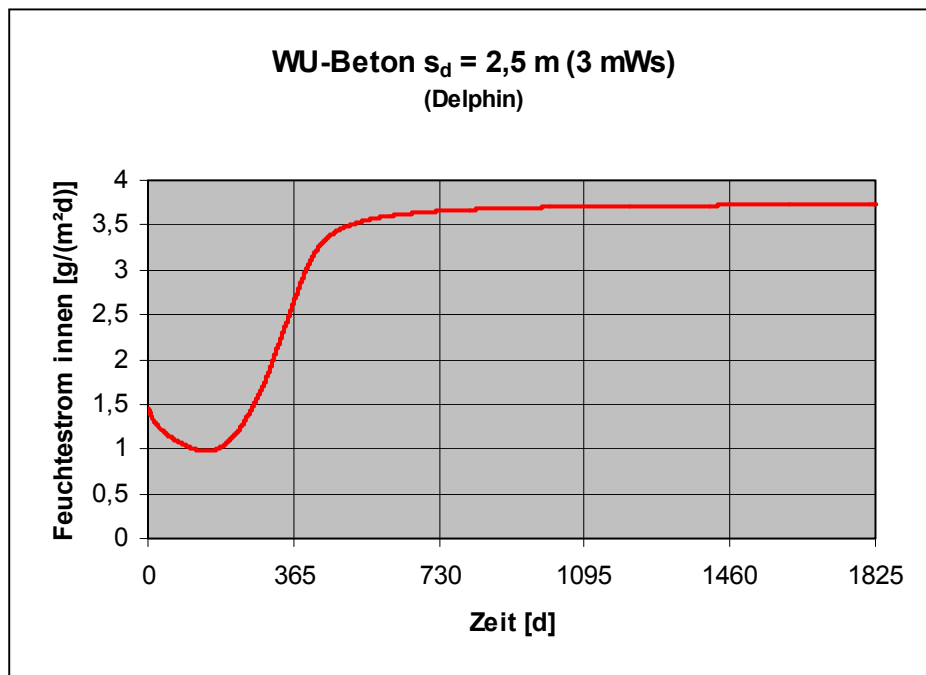


Abb. 6.24: Feuchtestrom WU-Beton ($s_d = 2,5 \text{ m}$), Delphin

Die Abbildung 6.25 zeigt die Feuchtestromfront, die sich im Querschnitt hinter einer mineralischen Innenbeschichtung einstellt. Im Gegensatz zu dem frei abtrocknenden Bauteil verringert sich der Feuchtestrom in den Raum. Es wird aber deutlich, dass sich hinter der Abdichtung ein wesentlich höherer Wassergehalt im Querschnitt von etwa 12,7 Vol.-% ergibt. Die freie Wassersättigung ist damit allerdings noch nicht vollständig erreicht.

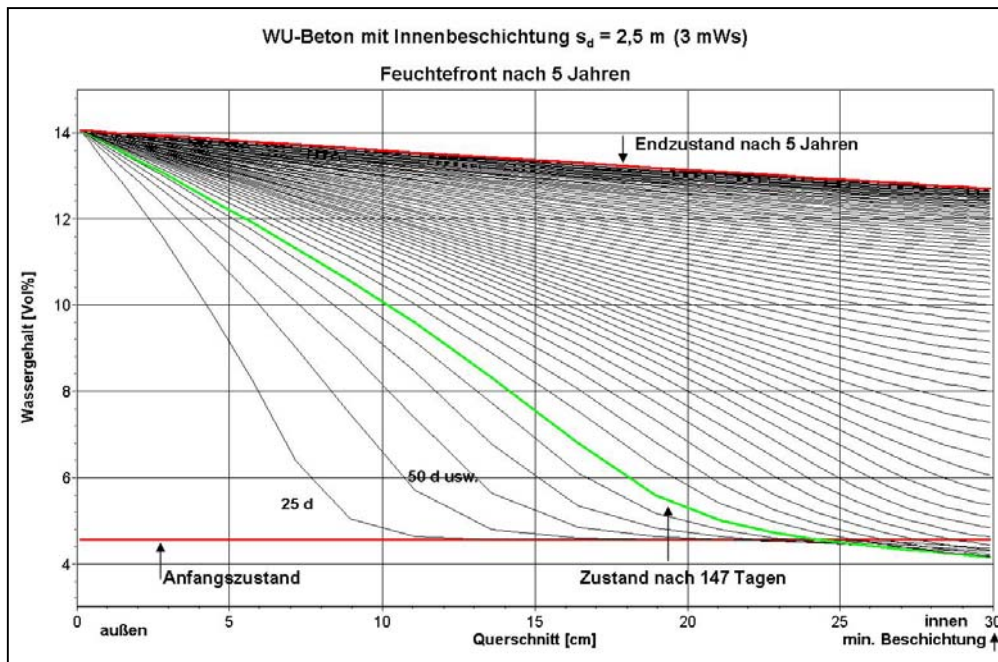


Abb. 6.25: Feuchtefront WU-Beton (s_d = 2,5 m), Delphin

Es folgt die Darstellung der Rechenergebnisse für eine Betonaußenwand mit einer Innenbeschichtung auf Bitumenbasis.

6.8.2 Berechnung einer Betonaußenwand (s_d = 160 m) – Delphin

Analog zu der Vorgehensweise mit WUFI wird an der Innenseite eine aus der Materialdatenbank entnommene Bitumenbahn aufgebracht. Aus dem vorgegebenen Diffusionswiderstand ergibt sich durch die Wahl der Schichtdicke ein s_d-Wert von 160 m. Der Verlauf des Feuchtestromes ist ähnlich dem der Berechnungsvariante mit WUFI und ist der Abbildung 6.26 zu entnehmen. Nach etwa 5 Jahren ergibt sich eine konstante Abgabe von 0,05 g/(m²d).

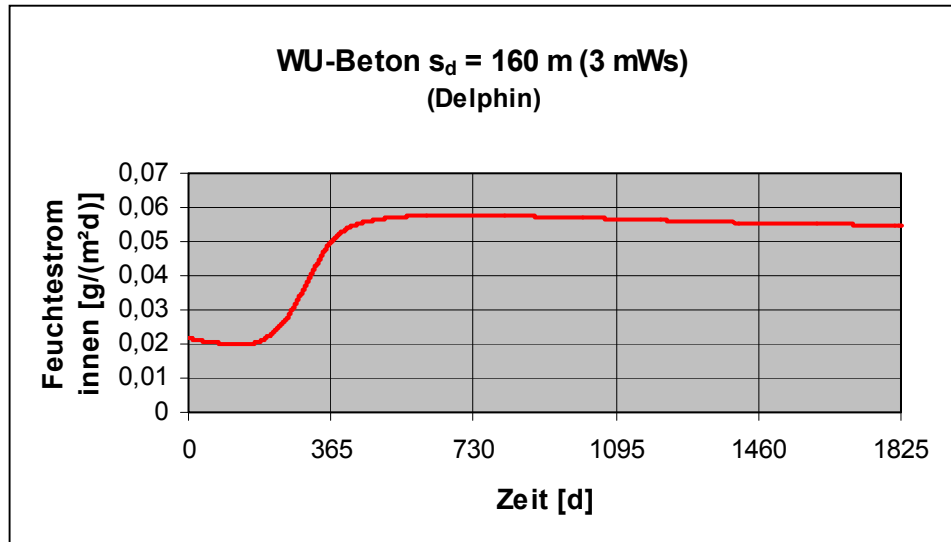


Abb. 6.26: Feuchtestrom WU-Beton ($s_d = 160$ m), Delphin

Die Abbildung 6.27 zeigt den Wassergehalt, der sich hinter der nahezu diffusionsdichten Schicht einstellt. Das Bauteil erreicht mit ca. 13,8 Vol.-% fast die freie Wassersättigung und eine Austrocknung des Bauteiles ist zu keinem Zeitpunkt gegeben.

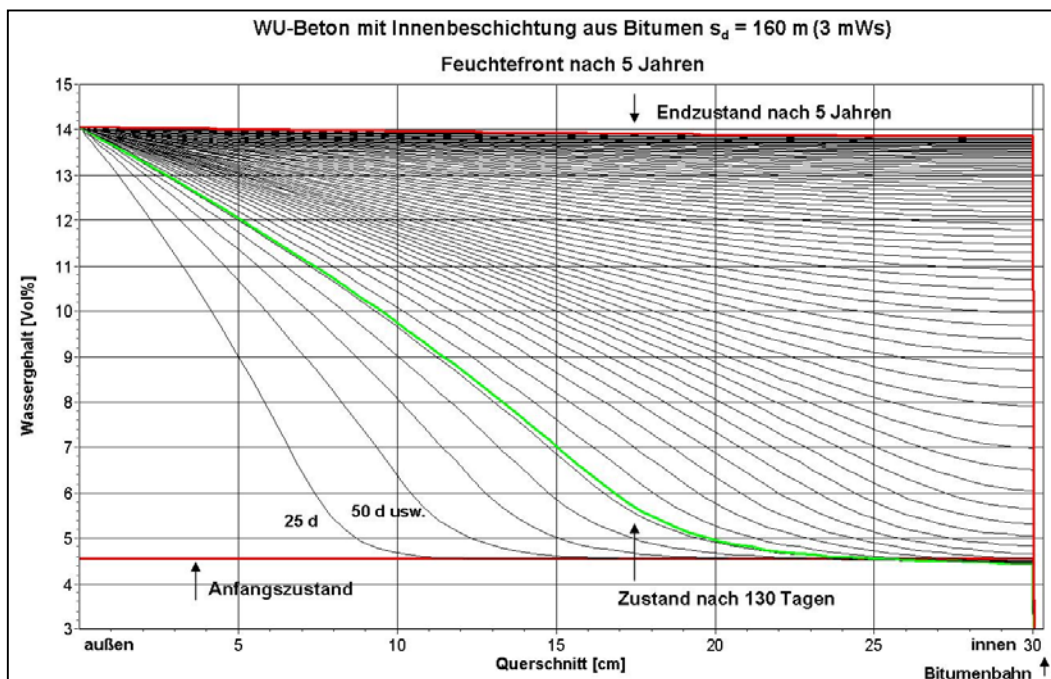


Abb. 6.27: Feuchtestrom WU-Beton ($s_d = 160$ m), Delphin

6.8.3 Auswirkungen der Druckhöhe – Delphin

In Abbildung 6.28 soll der Einfluss der angesetzten Druckhöhe bei der Berechnung mit Delphin auf den Feuchtetransport verdeutlicht werden. Dafür wird der Verlauf der in Abschnitt 6.8 berechneten Außenwand mit einer Druckbeanspruchung von 0,3 bar (3 mWs) aufgetragen und mit der Berechnung einer drucklos beanspruchten Außenwand verglichen. Das heißt, die Wand wird keinem hydrostatischen Druck ausgesetzt, sondern nur mit Wasser in ständigen Kontakt gebracht.

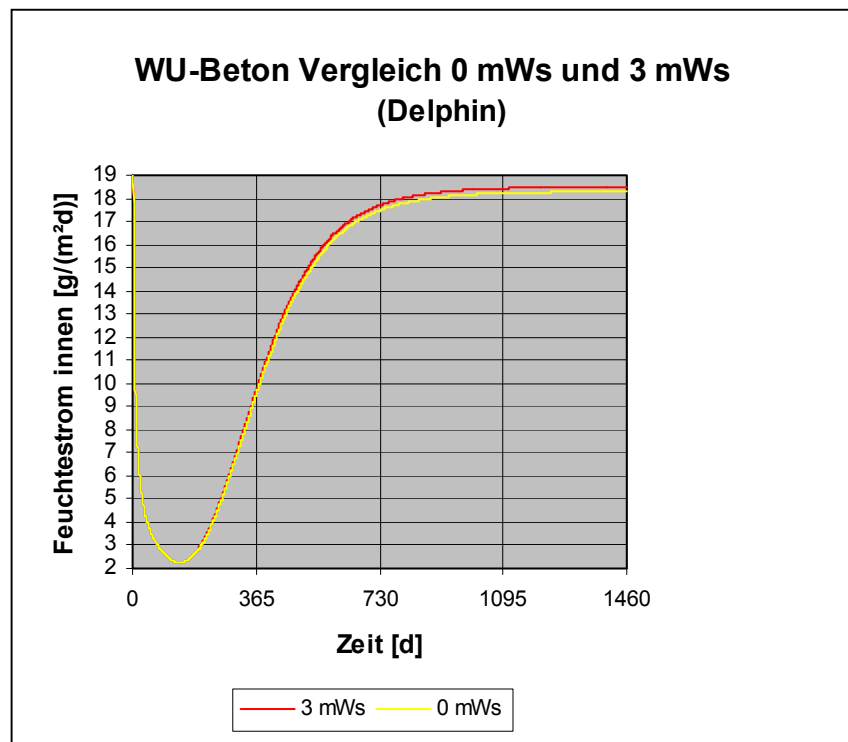


Abb. 6.28: Auswirkungen der Druckhöhe auf den Feuchtestrom, Delphin

Es ist zu erkennen, dass der Feuchtestrom der beiden Varianten an der Innenoberfläche nahezu identisch ist und sich lediglich um etwa 0,2 g/(m²d) unterscheidet. Somit scheint wider Erwarten bei der Berechnung der angesetzte äußere Druck auf die Rechenergebnisse nur einen geringen Einfluss zu haben.

Im Folgenden werden die durchgeführten Berechnungen einer 30 cm dicken Mauerwerkswand ohne Beschichtung sowie mit einer mineralischen bzw. bituminösen Innenbeschichtung aufgezeigt.

6.9 Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk – Delphin

Die Stoffkennwerte des Mauerwerks aus Kalksandstein sind der Materialdatenbank der TU-Dresden entnommen (siehe Tabelle 6.4). Dadurch ergeben sich im Vergleich zu WUFI wieder etwas andere Ergebnisse. Trotz allem wird der Unterschied des Feuchteintrages im Gegensatz zu einem Betonbauteil deutlich. Die Außenwand wird wiederum mit einer 3 Meter hohen Wassersäule beansprucht. Die Randbedingungen sind entsprechend den vorherigen Berechnungen gewählt.

Kalksandsteinmauerwerk	
Stoffkennwerte	
Eingangsgröße	Materialkennwert
Rohdichte	1900 kg/m ³
Porosität	0,32 m ³ /m ³
Wärmekapazität trocken	920 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit trocken	1,32 W/mK
Diffusionswiderstandszahl trocken	27 [-]
Oberflächenübergangskoeffizienten	
Außenoberfläche	Kennwert
Wärmewiderstand	0 m ² K/W
s _d -Wert	0 m (keine Beschichtung)
Innenoberfläche	
Wärmewiderstand	0,13 m ² K/W
s _d -Wert	0 m (keine Beschichtung)
Optionale Parameter	
Wasseraufnahmekoeffizient	0,032 kg/m ² √s

Tabelle 6.4: Stoffkennwerte Kalksandsteinmauerwerk, Delphin

Aus dem Feuchtestrom in Abbildung 6.29 zeigt sich, dass sich bereits nach etwas über 100 Tagen ein konstanter Feuchtestrom von ca. 510 g/(m²d) einstellt und die Wasserabgabe im Vergleich zu der Betonaußenwand um ein vielfaches überschritten wird.

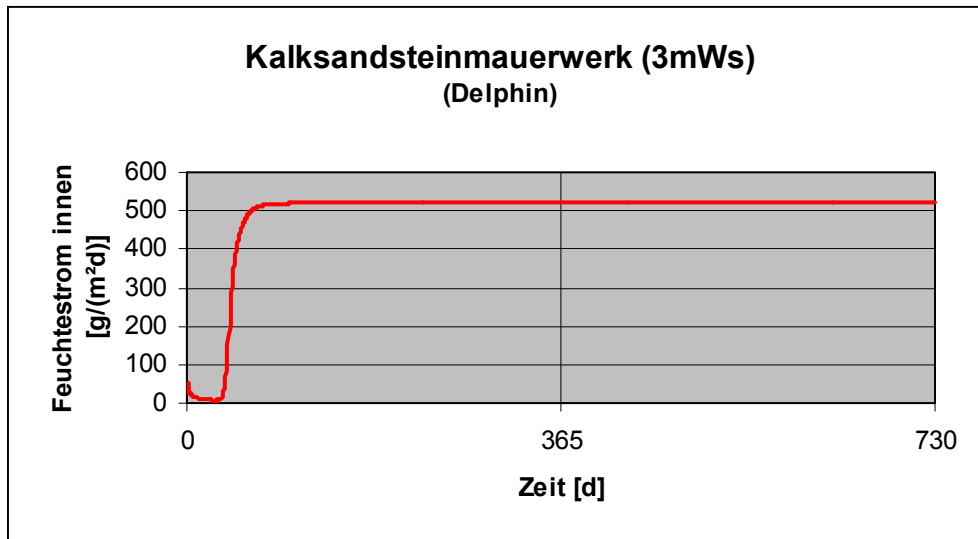


Abb. 6.29: Feuchtestrom MW, Delphin

Der Verlauf des Wassergehaltes über den Querschnitt (siehe Abbildung 6.30) macht nochmals den Unterschied zu einem Betonbauteil klar. Die Kurvenscharen sind in Zeitschritten von 5 Tagen aufgetragen, wodurch das schnelle Fortschreiten der Feuchtestromfront ersichtlich ist. Nach etwa 28 Tagen besteht an der Innenseite noch ein kleiner Austrocknungsbereich von etwa 3 bis 4 cm. Dieser wird allerdings innerhalb weniger Tage vollständig überdeckt, so dass sich die Kurvenschar nach dem Erreichen einer gleichmäßigen Wasserabgabe einem gleich bleibenden Wert annähert. Eine Sättigung des Mauerwerks wird allerdings durch die raumseitige Wasserabgabe verhindert.

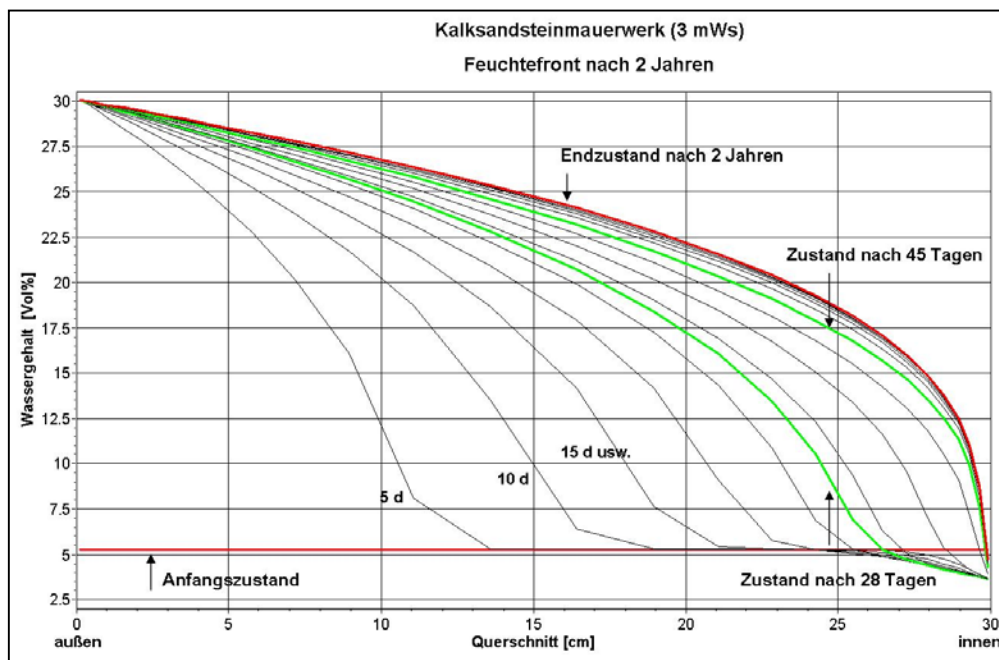


Abb. 6.30: Feuchtestrom MW, Delphin

6.9.1 Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk ($s_d = 2,5 \text{ m}$) – Delphin

Der Verlauf des Feuchtstroms, der in Abbildung 6.31 einzusehen ist, ergibt sich analog dem Verlauf aus Abschnitt 6.5.1. Innerhalb eines relativ kurzen Zeitraumes von etwa 100 Tagen stellt sich ein gleich bleibender Strom von $4,46 \text{ g/m}^2$ ein.

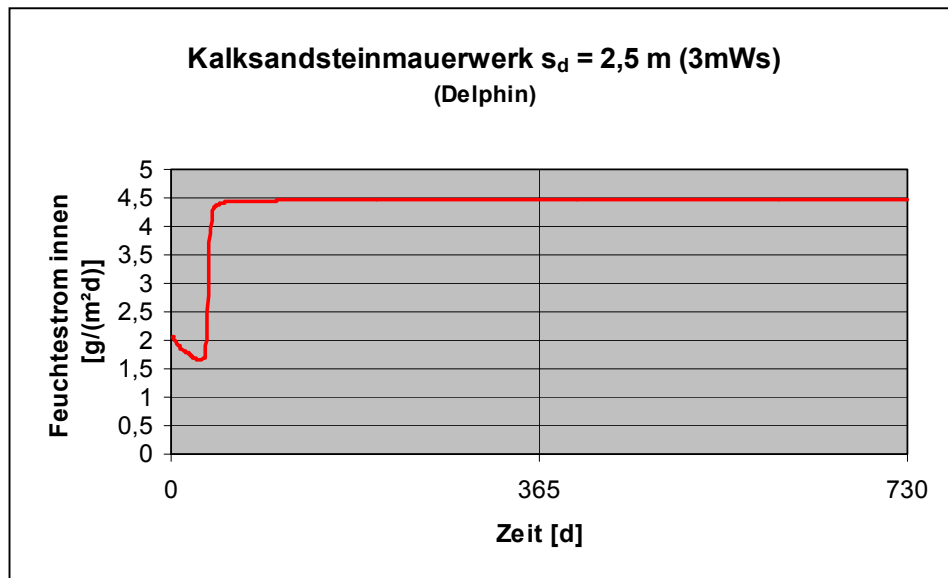


Abb. 6.31: Feuchtstrom MW ($s_d = 2,5 \text{ m}$), Delphin

Im Gegensatz zu einer Betonwand mit einer mineralischen Innenbeschichtung tritt bei dieser Bemessungsvariante bereits innerhalb des Zeitraumes von 2 Jahren eine Sättigung des Mauerwerks ein.

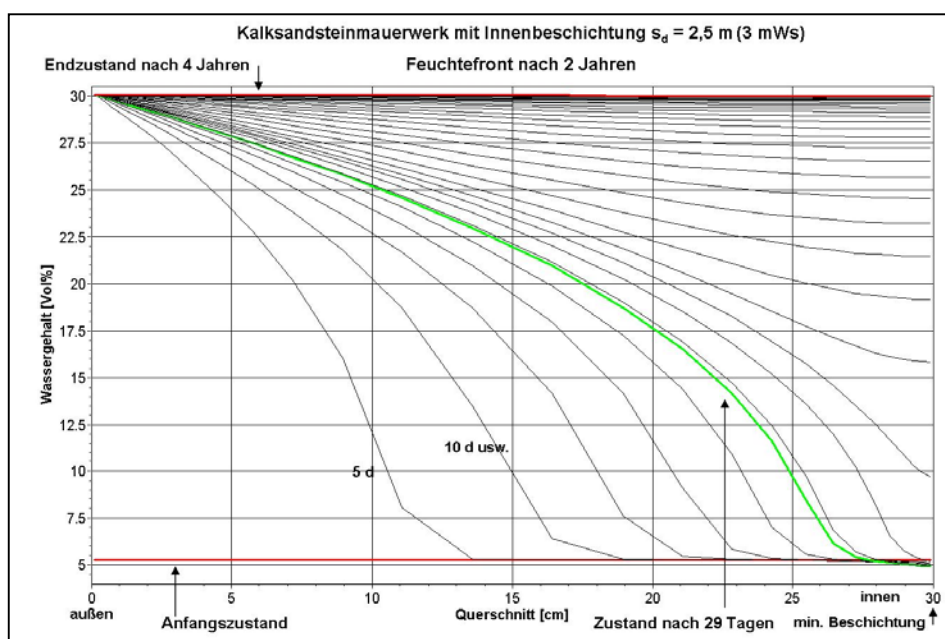


Abb. 6.32: Feuchtfreie Front MW ($s_d = 2,5 \text{ m}$), Delphin

6.9.2 Berechnung einer Außenwand aus Mauerwerk ($s_d = 160 \text{ m}$) – Delphin

Bei einer Aufbringung einer Bitumenbahn auf die Innenoberfläche stellt sich für die Wasserabgabe ebenfalls ein Verlauf gemäß Abschnitt 6.5.2 ein. Es entsteht ein unwesentlicher Feuchtestrom nach innen von $0,066 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$. Die Feuchtestfront ergibt sich analog der Abbildung 6.32.

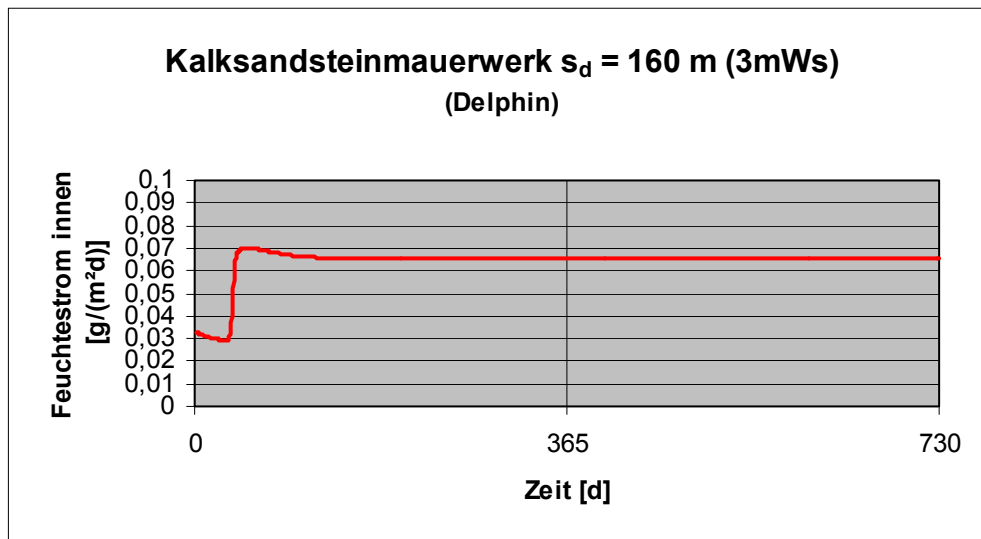


Abb. 6.33: Feuchtestrom MW ($s_d = 160 \text{ m}$), Delphin

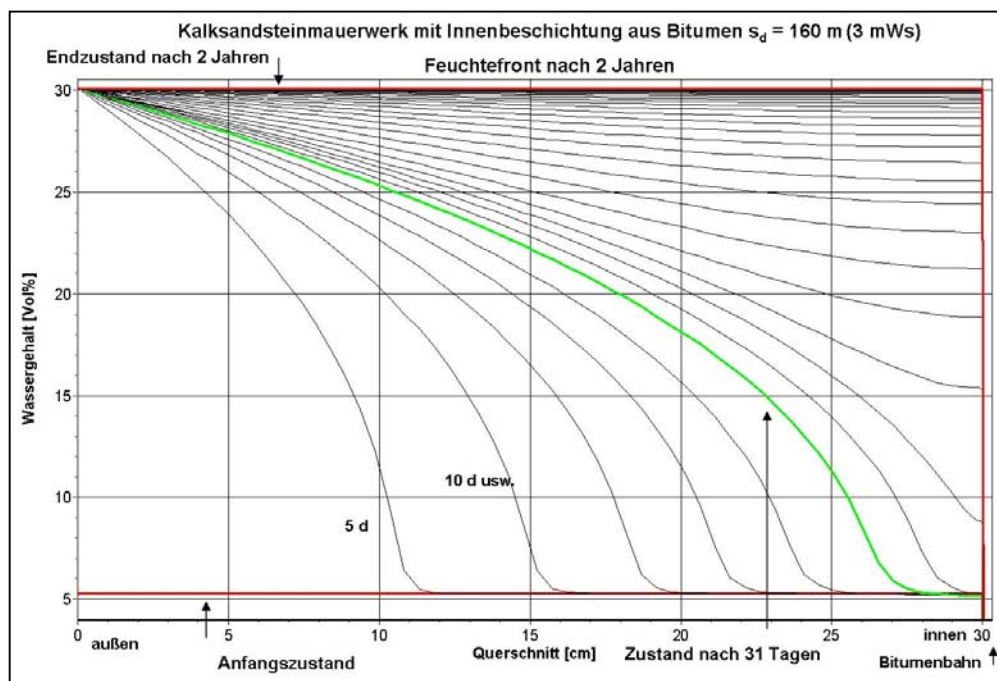


Abb. 6.34: Feuchtestrom MW ($s_d = 160 \text{ m}$), Delphin

6.10 Zusammenfassung der Ergebnisse – Delphin

Die dargestellten Diagramme zeigen die Ergebnisse der Berechnungen mit Delphin. Es handelt sich jeweils um den eingeschwungenen Zustand, der sich in Abhängigkeit von den Materialien nach unterschiedlich langen Berechnungszeiträumen ergeben hat und durch die horizontale Tangente in den Verläufen des Feuchtstromes gekennzeichnet ist.

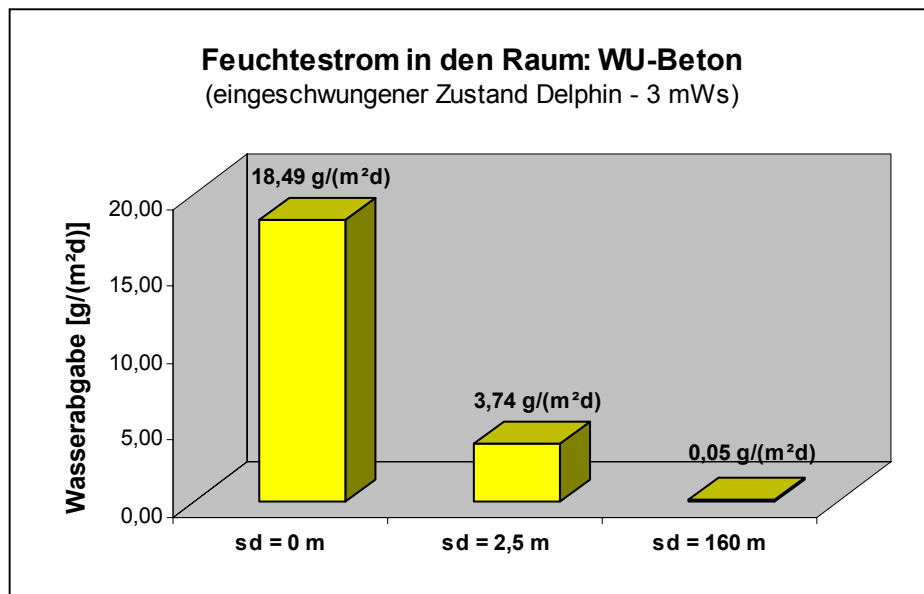


Abb. 6.35: Feuchtstrom WU-Beton, Delphin

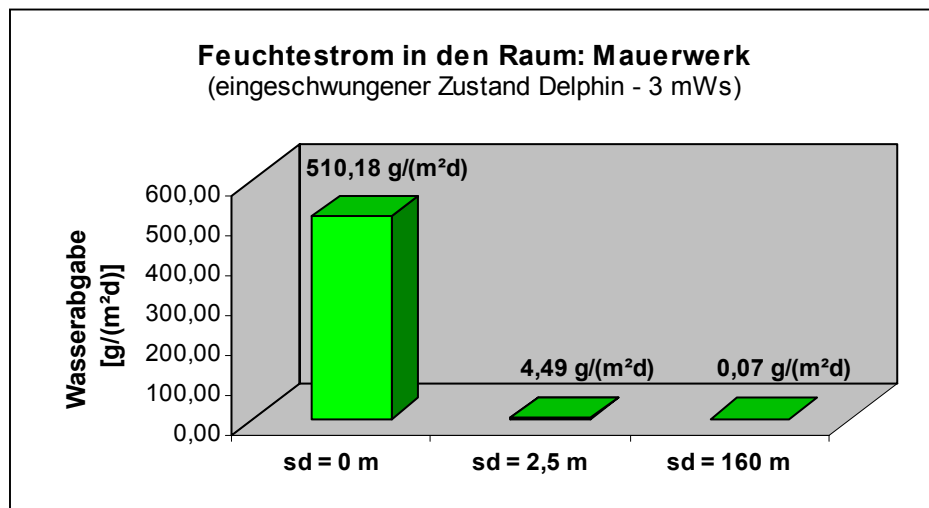


Abb. 6.36: Feuchtstrom MW, Delphin

6.11 Berechnung des Wassertransportes nach Kießl

Kießl hat ein stationäres Verfahren für die Berechnung des Wasserdurchganges durch Bauteile aus wasserundurchlässigem Beton entwickelt, welches auf experimentell zu bestimmenden Feuchteleitkoeffizienten basiert. Die Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung der Kapillarität des Betons, der Diffusion und des hydrostatischen Druckes.⁹⁷

Im Folgenden wird der Wasserdurchgang analog zu den Berechnungen mit den Simulationsprogrammen durch ein 30 cm dickes Bauteil dargestellt.

$$Q = \frac{1}{d} \times [FC \times \Delta c + FT \times \Delta \vartheta + FP \times \Delta h] \quad (\text{Gl. 6.4})$$

mit	d	Bauteildicke
	FC	Hygrischer Feuchteleitkoeffizient, der von der Theorie der kapillaren Flüssigkeitsbewegung in porösen Stoffen ausgeht $FC_{\text{Beton}} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h} = 24 \text{ g/md}$
	Δc	Wassergehaltsdifferenz in den Bauteiloberflächen in m^3 Wasser pro m^3 Material $c_1 \approx 22$ [Vol.-%] gesättigter Beton $c_2 \approx 5$ [Vol.-%] Beton in der Ausgleichsfeuchte $\Delta c = 17$ %
	FT	Thermischer Feuchteleitkoeffizient, der von einem temperaturbedingten Feuchtetransport in flüssigem und in dampfförmigem Zustand unter Berücksichtigung von Sorptionsvorgängen ausgeht und primär vom Feuchtegehalt des Baustoffes abhängt $FT = 10^{-8} \text{ m}^2/\text{h.K.} = 0,24 \text{ g/m.d.K.}$ bei temperaturbedingten Feuchtigkeitsanreicherungen $FT = 10^{-12} \text{ m}^2/\text{h.K.} \approx 0 \text{ g/m.d.K.}$ bei temperaturbedingten Austrocknungen
	$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz der Bauteiloberflächen [K]
	FP	Gesamtdruckbezogener Feuchteleitkoeffizient, der die Transportintensität durch ein poröses Material infolge eines Gesamtdruckgradienten beschreibt $FP \approx 10^{-10} \text{ cm/s} = 0,1 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$
	Δh	Gesamtdruckunterschied [m Wassersäule]

⁹⁷ Vgl. Gertis (1980)

Aus Gl. 6.4 ergibt sich mit

$$d = 0,3 \text{ m}$$

$$FC = 24 \text{ g/(md)}$$

$$\Delta c = 0,22 - 0,05 = 0,17 \text{ [nach Cziesielski]}$$

$$FT = 0$$

$$\Delta \vartheta = 10^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = -10 \text{ K}$$

$$FP = 0,1 \text{ g/(m}^2\text{d)}$$

$$\Delta h = 3 \text{ m}$$

der folgende Feuchtestrom durch das Bauteil:

$$Q = \frac{1}{0,3} \times [24 \times 0,17 + 0 \times (-10) + 0,1 \times 3,0] = 14,6 \text{ g/(m}^2\text{d)}$$

Im Vergleich mit den Ergebnissen aus den Computerprogrammen stellt sich heraus, dass der Feuchtestrom durch das WU-Bauteil in der gleichen Größenordnung liegt und somit für eine überschlägige Ermittlung hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass die Annahmen bezüglich der Randbedingungen, insbesondere das Grundwasser betreffend, sowohl bei WUFI als auch bei Delphin richtig gewählt wurden.

6.12 Alternative Berechnungsvariante einer Außenwand – WUFI und Delphin

Alternativ zu den oben durchgeführten Berechnungen wird nachfolgend eine Variante vorgestellt, die auf den Versuchsergebnissen von Beddoe und Springenschmid basiert und die Theorie verfolgt, dass durch wasserundurchlässigen Beton der maßgebende Feuchtetransport ausschließlich durch Diffusion vonstatten geht. Zum besseren Verständnis wird die Theorie zunächst kurz vorgestellt.

Das Modell geht davon aus, dass sich kein kontinuierlicher Kapillar- bzw. Diffusionsstrom durch das Bauteil vollzieht, sondern dass sich hinsichtlich der Baufeuchte ein stabiler Ausgleichszustand einstellt. Zur Unterstützung dieser These wurden Versuche an Betonzylindern unterschiedlicher Dicke von 50 mm bis 800 mm durchgeführt. Die erste Probenreihe wurde an den Mantelflächen mit Epoxidharz abgedichtet und mit dem Fuß in ein Wasserbad gestellt. Die zweite Reihe wurde zusätzlich an der unteren Stirnfläche abgedichtet, so dass keine äußere Wasseraufnahme erfolgen konnte (siehe Abbildung 6.37).

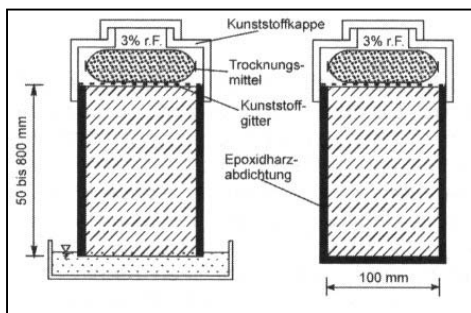


Abb. 6.37: Betonprobekörper, Oberseite trocken, links: im Fußbad, rechts: unten abgedichtet [Beddoe (2004), S. 94]

Ziel war es, die Wasserabgabe der beiden Versuchsreihen miteinander zu vergleichen um zu sehen, ob sich Unterschiede aus der wasserbeanspruchten und der unten abgedichteten Versuchsanordnung ergeben. Auf den genauen Messvorgang wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen, da lediglich die Ergebnisse von Interesse sind.

Es hat sich herausgestellt, dass bereits ab Probenhöhen von 100 mm die verdunstete Menge der Proben, die an der Unterseite Wasser aufnehmen und derer, die unten abgedichtet sind, annähernd gleich sind. Beddoe und Springenschmid folgern daraus, dass die Eindringtiefe des Wassers nicht nach Gleichung 5.11 in Abschnitt 5.4 berechnet werden kann. Sie widersprechen der Annahme, dass die Eindringgeschwindigkeit mit zunehmender Tiefe abnimmt, was wiederum das Abtrocknen des Bauteils auf der Innenseite zur Folge hat. Das aufgestellte Modell besagt vielmehr, dass sich im Querschnitt ein Kapillarbereich und ein Austrocknungsbereich einstellen. Das heißt, dass ab einer Probendicke von etwa 150 mm von der Innenseite her ein etwa 80 cm tiefer Austrocknungsbereich und an der Außenseite ein ca. 70 cm tiefer Kapillarbereich entstehen (siehe Abbildung 6.38).

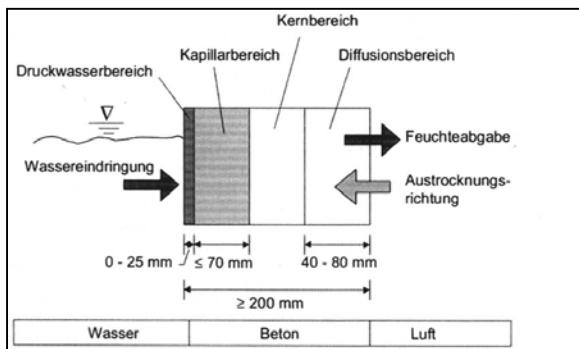


Abb. 6.38: Arbeitsmodell nach Beddoe/Springenschmid [Alfes (2005)]

Dies bedeutet, dass sich bei Plattendicken von mehr als 150 mm die beiden Bereiche nicht überschneiden und sich eine mittlere Schicht ergibt, in der kein Wassertransport stattfindet. Somit resultiert die Wasserabgabe fast ausschließlich aus der Eigenfeuchte des Bauteils.

Die Vermutung, dass die kapillare Steighöhe nur anfangs nach dem Wurzel-Zeit-Gesetz zunimmt wird unter anderem auf die in Abschnitt 5.2 beschriebene Selbstabdichtung des Betons zurückgeführt. Aus dieser Annahme lässt sich also folgern, dass sich im Gegensatz zu den zu Beginn durchgeführten Berechnungen nur ein vernachlässigbarer Feuchtestrom durch das Bauteil ergibt. Dieser wird nicht durch eine kapillar eindringende Wasserfront beeinflusst.

Um die daraus entstehenden erheblichen Unterschiede in der Feuchteabgabe im Vergleich zu den obigen Berechnungen zu zeigen, wird dieser Diffusionsstrom sowohl mit WUFI als auch mit Delphin berechnet.

6.12.1 Durchführung der Berechnung

Da die erwähnten Autoren davon ausgehen, dass die kapillare Wasseraufnahme ab einer Bauteildicke von 150 mm keinen Einfluss mehr auf die Feuchteabgabe hat, werden die Berechnungen für die 30 cm dicke Außenwand nur für den 23 cm dicken Bereich durchgeführt, der sich abzüglich des etwa 7 cm tiefen Kapillarbereiches ergibt. Ausgehend von den oben verwendeten Normalbetonen wird der Wasseraufnahmekoeffizient jeweils zu Null gesetzt. Des Weiteren wird für den Anfangszustand die Baufeuchte angenommen, das heißt, es wird von einer Sättigung des Betons ausgegangen. Im Innenraum werden analog zu den vorherigen Berechnungen konstante Verhältnisse angesetzt. Die Bemessungsergebnisse liefern somit die Feuchteabgabe in den Innenraum, der ausschließlich aus der Baufeuchte resultiert. Die Berechnungen werden ausschließlich für ein Bauteil ohne eine innenseitige Beschichtung durchgeführt, da die Ströme ohnehin wesentlich ge-

ringer ausfallen, als bei den oben durchgeführten Untersuchungen. Eine Innenbeschichtung hat aber natürlich eine Verlangsamung des Austrocknungsvorganges zur Folge.

Die Berechnung liefert also als Ergebnis die vorübergehend abgegebene Baufeuchte. Da im Erdreich von nahezu konstanten Klimaverhältnissen ausgegangen werden kann, ist es möglich, den an der Grenze des Kapillarbereiches zum Kernbereich beginnenden Diffusionsstrom mit dem Verfahren nach Glaser zu berechnen.⁹⁸ Dieser sich im Dauerzustand einstellende Massenstrom wird in Abschnitt 6.12.2 angegeben.

Die Verläufe in Abbildung 6.39 zeigen, dass der Feuchtestrom in den Innenraum, der sich aus der Baufeuchte ergibt, über einen Zeitraum von 5 Jahren stark abnimmt. Erfolgt die Betrachtung über einen längeren Zeitraum, ist davon auszugehen, dass die Feuchteabgabe weiter abnimmt und gegen Null konvergiert. Nachdem im Anfangszustand noch ein relativ hoher Feuchtestrom zu beobachten ist (WUFI: 19 g/(m²d), Delphin: 55 g/(m²d)), nimmt dieser innerhalb eines Jahres stark ab und erreicht Werte von unter 5 g/(m²d). Im weiteren Verlauf sinken die Diffusionsströme auf 1,68 g/(m²d) (Delphin) bzw. 0,61 g/(m²d) (WUFI) ab. Die Unterschiede sind wiederum auf die unterschiedlichen Stoffkennwerte zurückzuführen.

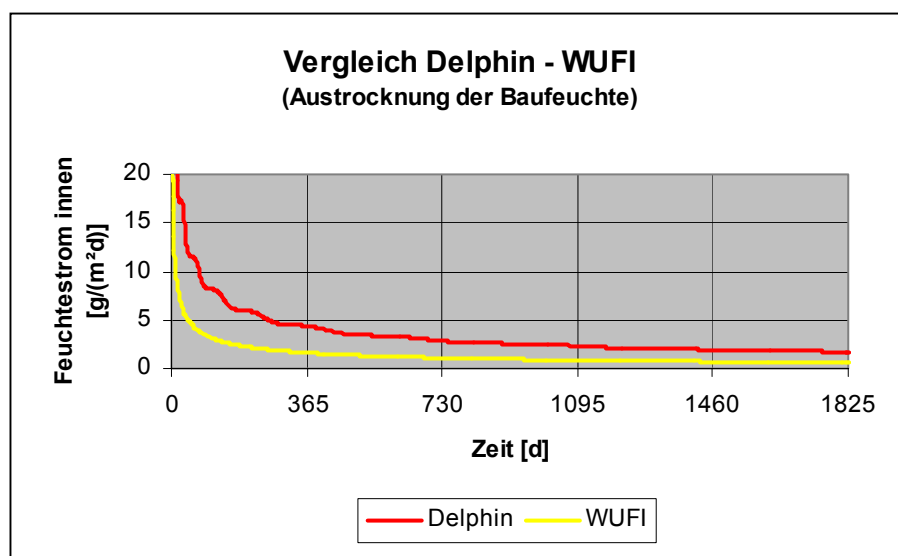


Abb. 6.39: Feuchtestrom innen WU-Beton, WUFI und Delphin

In den Abbildungen 6.40 und 6.41 sind jeweils die Feuchtestromfronten dargestellt. Es erfolgt eine Abtrocknung von der Innenseite in das Bauteil. Der kurze Abfall des Wassergehaltes auf der Außenseite ist zu vernachlässigen, da er keinen Einfluss auf die Wasserabgabe in den Raum hat und nur auf Grund der Modellsimulation auftritt. In der Realität schließt nach Beddoe und Springenschmid an dieser Stelle der Kapillarbereich an.

⁹⁸ Klopfer (1999)

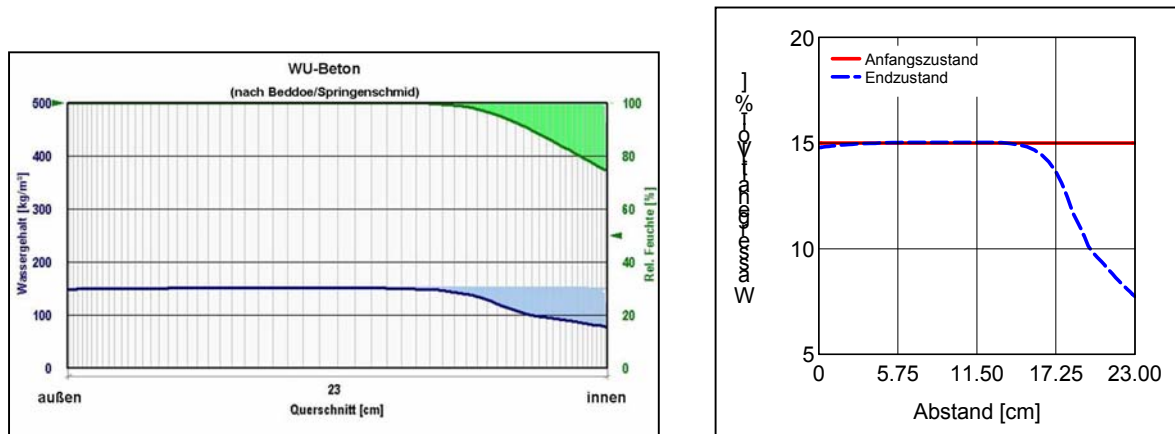


Abb. 6.40: Feuchtefront WU-Beton, links: Endzustand nach 5 a, rechts: Anfangs- und Endzustand, WUFI

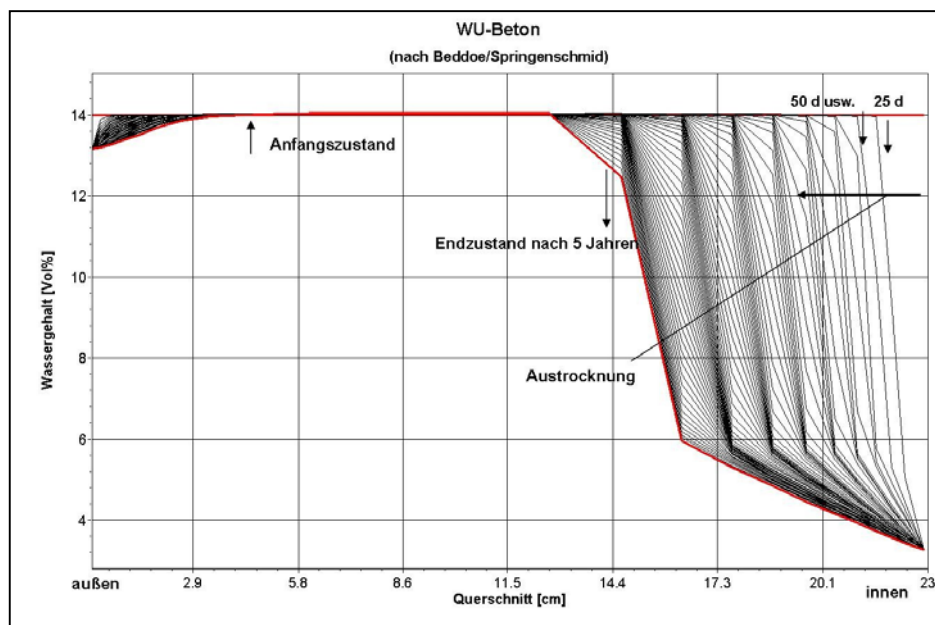


Abb. 6.41: Feuchtefront WU-Beton nach 5 a, Delphin

6.12.2 Eindiffundierende Feuchte im Dauerzustand

Die in Abschnitt 6.12.1 ermittelten Ergebnisse stellen die Feuchtestromdichten im baufeuchten Zustand dar und gelten damit nur für eine vorübergehende Zeit. Wie bereits erwähnt, kann auf Grund der Verhältnisse im erdberührten Bereich für die Berechnung der eindiffundierenden Feuchte im Dauerzustand, unter der Voraussetzung des Modells nach Beddoe und Springenschmid, das Glaser-Verfahren angewandt werden. Die durch Diffusion transportierte Flüssigkeit ergibt sich nach Gleichung 6.5.⁹⁹

⁹⁹ Vgl. Lohmeyer (2000), S. 571

$$m_D = \frac{p_a - p_i}{1,5 \times 10^6 \times \mu \times d_D} = \frac{\varphi_a \times p_{sa} - \varphi_i \times p_{si}}{1,5 \times 10^6 \times \mu \times d_D} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{h})] \quad (\text{Gl. 6.5})$$

mit $p_{a/i}$ Wasserdampf-sättigungsdruck außen bzw. innen

$p_{sa/si}$ Wasserdampf-partialdruck außen bzw. innen

d_D Bauteildicke, in der die Diffusion nach innen stattfindet (= $d - \overset{\text{Kapillarbereich}}{0,07 \text{ m}}$)

μ Wasserdampfdiffusionswiderstand, z. B. 100

Die Temperatur im Bauteil wird analog zu den oben durchgeführten Berechnungen mit 12°C angesetzt ($\rightarrow p_{sa} = 1403 \text{ Pa}$). Aus der Grenzschicht zwischen dem Kapillarbereich und dem Kernbereich ergibt sich für außen eine relative Luftfeuchte von 100 %. Die klimatischen Innenraumverhältnisse werden mit einer relativen Luftfeuchte von 50 % bei einer Temperatur von 20°C angenommen ($\rightarrow p_{si} = 2340 \text{ Pa}$).

Somit ergibt sich der Feuchtestrom in den Innenraum zu:

$$m_D = \frac{1,0 \times 1403 - 0,5 \times 2340}{1,5 \times 10^6 \times 100 \times (0,3 - 0,07)} \times 10^3 \times 24 = 0,16 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$$

Es wird deutlich, dass der Feuchtigkeitstransport aus der abgegebenen Baufeuchte erheblich größer ist als der Feuchtestrom, der wegen des Partialdruckgefälles von außen nach innen entsteht.

Nach einem Jahr überschreitet die Belastung aus der Baufeuchte den Diffusionsstrom noch etwa um das 30fache ($m_{BF} : m_D \approx 5,0 : 0,16 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$). Auch im weiteren Verlauf findet ein etwa 7mal höherer Feuchteeintrag durch das Austrocknen des Bauteiles statt.

6.13 Alternative Berechnungsvariante einer Außenwand – Lohmeyer

Die berechneten Ergebnisse aus Abschnitt 6.12.1 werden ebenfalls mit einer analytischen Berechnungsvariante verglichen. Mit Gl. 6.6 kann eine rechnerische Abschätzung der Austrocknung auf der Bauteilinnenseite erfolgen. Voraussetzung ist wiederum die Annahme, dass sich in einer Randzone von 80 mm ein Austrocknungsbereich befindet. In diesem Bereich stellt sich dann im Laufe der Zeit die Ausgleichsfeuchte im Beton ein. Die durchschnittlich täglich entweichende Wassermenge ergibt sich über einen Austrocknungszeitraum von 5 Jahren wie folgt:¹⁰⁰

¹⁰⁰ Vgl. Lohmeyer (2000), S. 571

$$\begin{aligned}
 m_A &= \frac{(w_{\bar{u}} + w_n - w_g) \times d_A}{t} \\
 &= \frac{z \times \Delta w/z + \Delta H \times z \times 0,4 - \rho_B \times f_A}{t} \times d_A \text{ [kg/(m}^2\text{d)]}
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 6.6}$$

mit	$w_{\bar{u}}$	Überschusswasser (= $z \times \Delta w/z$)
	w_n	bei der Hydratation noch nicht gebundenes Wasser (= $\Delta H \times z \times 0,40$)
	w_g	durch Adhäsion gehaltenes Wasser (Ausgleichsfeuchte) (= $\rho_{\text{Beton}} \times f_A$)
	w/z	Wassorzementwert, z.B. 0,55
	ΔH	restlicher Hydratationsgrad, z.B. 100 % - 75 % = 25 % = 0,25
	f_A	Ausgleichsfeuchte des Betons, z.B. 2 M.-%
	d_A	austrocknende Bauteildicke → 80 mm
	t	Zeit der Austrocknung, z.B. 5 Jahre

$$m_A = \frac{(300 \times (0,55 - 0,40) + 0,25 \times 300 \times 0,4 - 2350 \times 0,02) \times 0,08}{1825} \times 1000 = 1,22 \text{ g/(m}^2\text{d)}$$

Das Ergebnis liegt im Bereich der Simulationsergebnisse in Abschnitt 6.12.1.

6.14 Bewertung der Ergebnisse

Im Zuge der durchgeführten Berechnungen hat sich herausgestellt, dass die Ergebnisse, die mit den Simulationsprogrammen WUFI und Delphin erzielt werden, in etwa die gleiche Größenordnung aufweisen und somit die gleichen Aussagen bezüglich der Feuchteströme zulassen (siehe auch Tabelle 6.5). Es hat sich ergeben, dass mit WUFI unter der Annahme einer Wasserbeaufschlagung durch Regen auf der Außenseite eine Druckbeanspruchung durch Grundwasser hinreichend gut dargestellt werden kann. Dies zeigt der Vergleich der Ergebnisse aus dem druckbeanspruchten Bauteil nach Delphin und dem aus WUFI (siehe Abbildung 6.42).

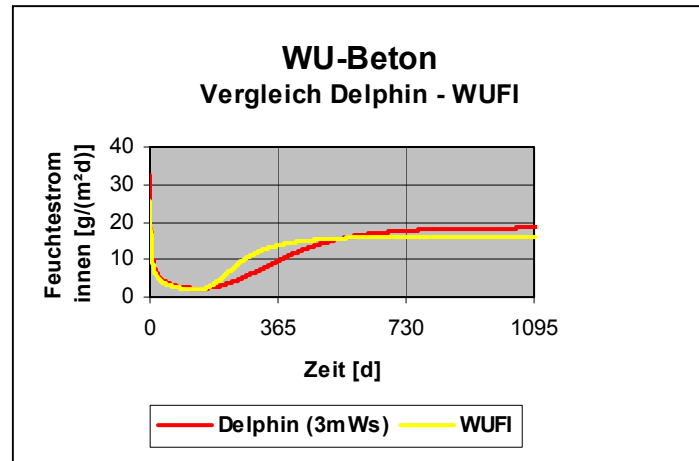


Abb. 6.42: Vergleich Feuchtestrom WUFI und Delphin nach 3 a

Durch den Vergleich der Auswirkungen der Druckhöhe (siehe Abschnitt 6.8.3) bei Delphin hat sich vielmehr gezeigt, dass der Unterschied zwischen dem Ansatz einer 3 m hohen Wassersäule sowie dem einer 0 m hohen Wassersäule annähernd den gleichen Feuchteintrag in den Raum zur Folge hat.

Die Differenzen, die sich aus den Berechnungen ergeben, sind auf die verfahrensspezifisch unterschiedlich ermittelten Materialkennwerte zurückzuführen. Das treibende Potential bildet jeweils der Wassergehaltsgradient. Unter Verwendung des Kapillardruckgradienten bei Delphin wären womöglich andere Ergebnisse zu erwarten, insbesondere bei der Annahme von unterschiedlichen Druckhöhen. Da dies auf Grund von nicht zu klärenden numerischen Problemen bei der Verwendung eines Wasserkontaktes als Randbedingung aber nicht möglich war, kann ein solches Verhalten nicht beurteilt werden.

Natürlich weichen die Feuchteströme in den Raum bei der Betrachtung der unterschiedlichen Ansätze bei der Berechnung des Feuchtedurchganges durch einen wasserundurchlässigen Beton erheblich voneinander ab. Es ist einleuchtend, dass nach der Theorie von Beddoe und Springenschmid der Feuchtestrom aus dem Bauteil erheblich geringer ist. Welcher der beiden Ansätze den Feuchtetransport am besten beschreibt, kann nicht abschließend geklärt werden.

Das Problem besteht darin, dass die Berechnungen mit WUFI und Delphin als auch die Variante nach Kießl keine zeitliche Veränderung des Betongefüges wie zum Beispiel die in Abschnitt 5.2 erläuterte Selbstheilung berücksichtigen. Dies dürfte grundsätzlich zu einer zusätzlichen Abminderung des Feuchtestromes führen.

Eine nicht zu vernachlässigende Feststellung ist die Tatsache, dass die WU-Richtlinie (November 2003) den Versuchsergebnissen von Beddoe und Springenschmid folgt und

davon ausgeht, dass ein Kapillartransport von Wasser durch die Bauteildicke hindurch unabhängig vom hydrostatischen Druck und vom Schichtenaufbau nicht erfolgt.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass eine Berechnung durch ein Bauteil aus wasserundurchlässigem Beton im erdberührten Bereich mit den Simulationsprogrammen unter Verwendung des jeweiligen Normalbetons (= WU-Beton) zumindest verlässliche Ergebnisse liefert, wobei die Variante nach Beddoe/Springenschmid meiner Meinung nach den wahrscheinlicheren Fall wiedergibt.

Abhängig von den Stoffkennwerten und den getroffenen Annahmen der Eingangsparameter ergeben sich für eine 30 cm dicke Betonaußenwand im Grundwasser unter der Voraussetzung einer nachlaufenden Feuchtestfront, wie aus Tabelle 6.5 ersichtlich ist, Feuchteströme in den Raum von 14,6 g/(m²d) bis 18,49 g/(m²d).

Die alternative Berechnungsvariante liefert Ergebnisse im Bereich von 0,62 g/(m²d) bis 1,68 g/(m²d) und nimmt über einen längeren Zeitraum weiter ab. Die zu Beginn durch die Baufeuchte abgegebene Feuchte liegt allerdings mit 20 g/(m²d) bzw. 50 g/(m²d) noch wesentlich höher. Der nach dem Glaser-Verfahren ermittelte Diffusionsstrom im Dauerzustand stellt bei einem 30 cm dicken Außenbauteil nur eine untergeordnete Rolle dar.

Da es in dem zu bearbeitenden Thema um das nachträgliche Abdichten von erdberührten Bauteilen geht und somit um Bauten im Bestand, ist aber ausschließlich der eingeschwungene Zustand von Interesse.

Berechnungsvariante	Feuchtestrom innen [g/(m ² d)] (eingeschwungener Zustand)
WUFI – WU-Beton	16,13
Delphin – WU-Beton (3 mWs)	18,49
Delphin – WU-Beton (0 mWs)	18,28
Kießl – WU-Beton	14,6
WUFI – WU-Beton nach Beddoe/Springenschmid (Austrocknung)	0,62
Delphin – WU-Beton nach Beddoe/Springenschmid (Austrocknung)	1,68
Glaser-Verfahren – WU-Beton (Dauerzustand)	0,16
Lohmeyer – WU-Beton (Austrocknung)	1,22
WUFI – WU-Beton s _d = 2,5 m	3,41
Delphin – WU-Beton s _d = 2,5 m (3 mWs)	3,74
WUFI – WU-Beton s _d = 160 m	0,06
Delphin – WU-Beton s _d = 160 m (3 mWs)	0,05
WUFI – MW	788,18
Delphin – MW (3 mWs)	510,18
WUFI – MW s _d = 2,5 m	4,02
Delphin – MW s _d = 2,5 m (3 mWs)	4,49
WUFI – MW s _d = 160 m	0,06
Delphin – MW s _d = 160 m (3 mWs)	0,07

Tabelle 6.5: Zusammenfassung der Ergebnisse

Die eventuellen Auswirkungen auf den Feuchtetransport werden im nächsten Kapitel erläutert. Außerdem wird ein Ansatz diskutiert, der Aussagen über einen sich aufbauenden Druck hinter der Abdichtung erlaubt.

7 Möglichkeiten und Grenzen von erdberührten Bauteilen bei höherwertiger Nutzung

Im Folgenden wird auf die Möglichkeiten einer Umnutzung einer Weißen Wanne, das heißt eines wasserundurchlässigen Bauwerks aus Beton, eingegangen. Man kann grundsätzlich zwei Maßnahmen unterscheiden, eine Weiße Wanne von innen so auszuführen, dass eine höherwertige Nutzung realisierbar ist:

Zum einen kann eine Aufständering des raumseitigen Boden- oder Wandaufbaus erfolgen. Zum anderen stellt sich die Frage, inwieweit eine Innenbeschichtung direkt auf das Bauteil aufgebracht werden kann. Die beiden Varianten werden im Folgenden vorgestellt und auf ihre Möglichkeiten und Grenzen hin diskutiert.

Hierfür werden die Rechenergebnisse aus Kapitel 6 aufgenommen, um den Einfluss des Feuchteintrages auf die Raumnutzung bzw. auf eine hinterlüftete Aufständering darzustellen. Des Weiteren werden Versuche vorgestellt, die unter anderem Aussagen über einen sich einstellenden hydrostatischen Druck auf der Negativseite hinter einer Innenabdichtung erlauben.

7.1 Problematik der höherwertigen Nutzung von Weißen Wannern

Nach der WU-Richtlinie werden bei der Planung und Ausführung von Bauwerken aus wasserundurchlässigem Beton zwei Beanspruchungs- und Nutzungsklassen unterschieden. Erstere beziehen sich auf die in Kapitel 3 dargestellten Lastfälle im Sinne der DIN 18195. Die Beanspruchungsklasse 1 gilt für drückendes und nichtdrückendes Wasser sowie für zeitweise aufstauendes Sickerwasser. Die Beanspruchungsklasse 2 gilt für Bodenfeuchte und nicht stauendes Sickerwasser.

Hinsichtlich der Nutzung sind nach Klasse A feuchte Stellen an der Bauteiloberfläche unzulässig. Dies betrifft somit die behandelte Thematik einer höherwertigen Nutzung. Die Nutzungsklasse B lässt an der Oberfläche in begrenztem Maße feuchte Stellen zu, allerdings dürfen keine Wasseransammlungen entstehen. Als Beispiele hierfür sind Tiefgaragen oder untergeordnete Lagerkeller zu nennen.

An dieser Stelle soll noch einmal kurz die Funktionsweise einer Weißen Wanne hervorgehoben und an Hand eines Schadensbeispiels die Problematik einer zusätzlichen Innenabdichtung verdeutlicht werden. Die wesentliche Eigenschaft der Weißen Wanne ist die, dass der Beton sowohl die tragende als auch die abdichtende Funktion des Bauwerks übernimmt. Das heißt, dass keine durchgehende Außenabdichtung, beispielsweise aus Bitumen, ausgeführt wird. Bauwerke, die nach diesem Prinzip ausgeführt werden, gelten als wasserundurchlässig (und nicht wie teilweise in der Literatur zu lesen als wasserdicht),

wenn der Boden und die Wände im Keller als trocken empfunden werden. Dies ist der Fall, wenn in den entsprechenden Räumen mehr Wasser verdunsten kann, als von außen durch das Bauteil eindringt.

In Bezug auf die in Kapitel 5 beschriebenen Feuchtetransporte kann man mit hinreichender Sicherheit feststellen, dass bei frei an die Innenraumluft grenzenden, druckwasserbelasteten WU-Betonbauteilen in der innenoberflächennahen Zone des Bauteilquerschnittes die durch Dampfdiffusion transportierte Wassermenge größer ist als die durch Kapillarität oder Sickerströmungen nachstoßenden Wassermengen. Wenn dies nicht so wäre, würde man an der Oberfläche der Rauminnenseite Feuchteflecken in Form von eingedunkelten oder glänzend nassen Bereichen erkennen. Solange aber für eine ausreichende Belüftung gesorgt wird, zum Beispiel durch eine Lüftungsanlage oder Ähnliches, stellt die Bauweise etwa im Bereich von Tiefgaragen mit unbehandelten Betonoberflächen eine funktionstüchtige und in der Baupraxis seit langer Zeit bewährte Ausführungsweise dar. Die Tatsache, dass auf der Innenseite des wasserundurchlässigen Bauteils Wasser verdunstet, wird durch das folgende leicht nachzuvollziehende Beispiel unterstrichen. In einem Keller aus WU-Beton wurde unter einer sich auf der Sohlplatte befindlichen Polystyrolplatte ein dünner Wasserfilm festgestellt. Die Ursache hierfür war auf die verhinderte Verdunstung zurückzuführen, da neben der Platte die freie Oberfläche in einem trockenen Zustand vorgefunden wurde.¹⁰¹

Hieraus ergibt sich die wesentliche Problematik in Bezug auf eine höherwertige Nutzung. Wenn Keller in WU-Bauweise in einer solchen Art genutzt werden sollen, ist eine unbehandelte Betonoberfläche ungeeignet. Auf der Bodenplatte müssen Beläge entweder mit oder ohne Dämmschichten eingebaut werden. Ebenso sollen in der Regel die Wandflächen verputzt oder bekleidet werden.

Wichtig ist, dass eventuell auftretende Risse im Bauwerk frühzeitig erkannt und abgedichtet werden. Wenn erstmal von innen ein Bodenaufbau erfolgt ist, ist eine Ortung von Fehlstellen nur noch schwer möglich und eine Sanierung mit einem großen Aufwand verbunden.

7.1.2 Sanierung von Rissen

Wenn es im Beton zu Rissen kommt, die breiter als die selbstheilenden Risse sind (siehe Abschnitt 5.2), müssen diese abgedichtet werden. Hierbei gilt es, die Risse zu unterscheiden, die einerseits kurz nach der Betonage, also im noch jungen Beton, und andererseits im erhärteten Beton entstehen, bei dem eine umgehende Nachbehandlung nicht mehr möglich ist.

¹⁰¹ Vgl. Cziesielski (1995), S. 129

Im erstgenannten Fall treten die Risse auf Grund von Setzungen im Beton oder durch zu schnelles Austrocknen auf. Diese Fröhschwindrisse sind nur wenige Millimeter tief und können durch eine entsprechende Nachbehandlung, zum Beispiel durch ein gründliches Zureiben mit einer Schaufel oder Ähnlichem, geschlossen werden. Wenn der junge Beton schon erhärtet ist, können die Risse bei der Nachbehandlung mit Zementschlämmen zugebürstet werden.

Treten die Risse aber erst nach einiger Zeit auf, unter anderem durch Eigenspannungszustände, Zwänge oder Temperatureinwirkungen, sind insbesondere bei einem wasserführenden Riss weitergehende Maßnahmen erforderlich, die nachfolgend erläutert werden.¹⁰²

Injizieren wasserführender Risse und Fehlstellen

Die im Folgenden beschriebene Ausführung kommt zum Einsatz, wenn die Risse nicht vor dem Verfüllen der Baugrube festgestellt wurden bzw. keine Abdichtung vor dem Wasserzutritt in die Risse durchgeführt wurde.

Wenn ein Bauwerk einer ständigen Wasserbeanspruchung ausgesetzt ist, kommt es an Rissbildungen oder Fehlstellen zum Wassereintrag. Dies betrifft oft den Bereich von Wand-Sohlenanschlüssen und von Durchdringungen. Eine Möglichkeit der Schadenssanierung bietet eine abdichtende Injektion mit Bohrpackern. Hierbei werden die Bohrkanäle wechselseitig vom Riss in einem Winkel von 45° hergestellt, so dass die Bohrung den Riss in der Mitte des Bauteiles durchstößt. Als Injektionsgut eignen sich unter anderem Polyurethanharze. Diese schäumen durch eine Reaktion mit dem Wasser auf und erzielen durch eine etwa 20fache Volumenvergrößerung eine schnelle Abdichtung. Unterschieden werden geschlossenzellige und offenzellige Polyurethane. Bei diesen ist eine Nachinjektion durch nichtschäumende Polyurethane oder Epoxidharze notwendig, um eine dauerhafte Abdichtung sicherzustellen.

Des Weiteren werden Acrylharzgele eingesetzt, die bei Wasserkontakt schnell aufquellen. Sie werden aber nur dort verwendet, wo ständig mit einer Wasserbeanspruchung zu rechnen ist, da sie die Eigenschaft haben, bei Wasserentzug zu schrumpfen.

Zementsuspensionen und Zementleime können nur in Rissen eingesetzt werden, die nicht mit Wasser gefüllt sind, da dies durch eine Veränderung des Wasser-Zementfaktors einen Materialschwund mit einer damit verbundenen schlechteren Dichtwirkung zur Folge hat.

Es sollten nach Möglichkeit grundsätzlich niedrigviskose Materialien eingesetzt werden, da es ansonsten auf Grund der angewandten Verdrängungstechnik zu neuen Rissen kommen kann. Bei hochviskosen Injektionsmaterialien besteht die Gefahr, dass diese sich nicht in den vorhandenen Rissen verteilen.

¹⁰² Vgl. Lohmeyer (1995), S. 191 ff.

Im Weiteren wird ein Versuch vorgestellt, mit dem ein Ausblick auf den sich einstellenden hydrostatischen Druck hinter einer Innenbeschichtung bei einem durch Grundwasser belastetem Bauwerk gegeben werden soll.

7.2 Innenseitige Beschichtung

7.2.1 Versuchsdurchführung zur Permeabilität einer Weißen Wanne

Bei den Versuchen handelt es sich um eine Untersuchung zur Permeabilität einer Weißen Wanne, die an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich am Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion durchgeführt worden ist. Es sollte geklärt werden, inwieweit sich der auf der Außenseite anliegende hydrostatische Druck auf Grund von aufstauendem Sickerwasser oder Grundwasser auf eine nachträgliche Innenabdichtung auswirkt. Es stellt sich also die Frage, ob sich auf der Innenseite zeitlich verzögert derselbe Druck einstellt wie auf der Außenseite oder ob sich der Druck im Bauteilquerschnitt teilweise oder ganz abbaut.

Versuchsbeschreibung

Um die Permeabilität und die Druckverhältnisse im Beton zu messen, wurden fünf 50 mm und zwei 100 mm dicke Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm untersucht, die einen w/z-Wert von 0,5 und einen Größtkorn der Zuschläge von 16 mm aufwiesen. Um einen möglichst hohen Sättigungsgrad zu erreichen, wurden die Proben über mehrere Wochen im Wasser gelagert. Danach konnten die Proben in die Prüfeinrichtung eingebaut werden (siehe Abbildung 7.1). Die Betonkerne wurden anschließend mit einem Wasserdruck von 1,2 bar beaufschlagt, was einer 12 m hohen Wassersäule entspricht. Mit Hilfe eines Steigrohres und eines Manometers auf der dem Wasserdruck abgewandten Seite konnte der Durchfluss durch die Proben bzw. der sich aufbauende Druck auf der Rückseite der Probe gemessen werden.¹⁰³

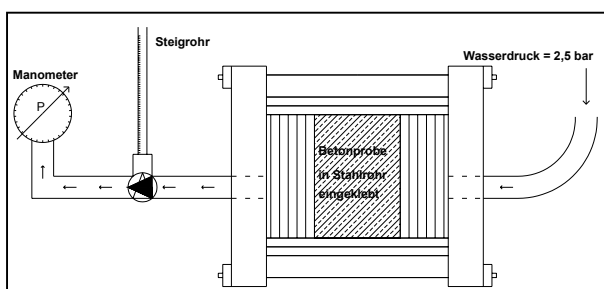


Abb. 7.1: Versuchsaufbau zur Messung der Permeabilität

¹⁰³ Vgl. Richner (2002)

Versuchsergebnisse

Es muss zunächst konstatiert werden, dass die Ergebnisse nur einen bedingten Aussagewert haben. Es wurden lediglich eine geringe Anzahl von Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse, wie nicht anders zu erwarten war, erhebliche Streuungen aufwiesen. Des Weiteren konnten Untersuchungen an 150 mm dicken Proben aus Zeitgründen nicht mehr durchgeführt werden. Zudem wurden die Versuche frühzeitig abgebrochen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird dennoch versucht, die Resultate heranzuziehen, um Aussagen über die bereits beschriebene Thematik zu tätigen. Durch Berechnungen ist es nicht möglich, die Vorgänge zu beschreiben und Anforderungen an Innenabdichtungen zu formulieren. Die Grundlage der Versuchsergebnisse stellen allerdings einen Ansatzpunkt für weitere Versuche dar, um die tatsächlichen Mechanismen weiter zu durchleuchten.

Nach den Versuchsmessungen konnte festgestellt werden, dass sich bei den 50 mm dicken Betonzylindern innerhalb weniger Tage ein konstanter Fluss durch die Probe eingestellt hat. Die berechneten Durchlässigkeitswerte k liegen zwischen 3 und 20 ml/(m \times bar \times d). Der sich einstellende Druck wurde ausschließlich an zwei der fünf Proben parallel zum Fluss gemessen. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich bei der ersten Probe innerhalb eines Monats auf der Innenseite der angelegte Druck von 1,2 bar aufgebaut hat. Bei der zweiten Probe konnte nach einem Monat ein Druck von ca. 0,4 bar abgelesen werden, wobei sich mit hinreichender Sicherheit bei einer Weiterführung des Experimentes ebenfalls ein Druck von 1,2 bar eingestellt hätte.

Bei den untersuchten 100 mm dicken Proben konnte kein Fluss und somit auch kein Druck jenseits der Probe ermittelt werden, wobei auch hier die Versuche frühzeitig abgebrochen wurden.

7.2.2 Interpretation der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der 50 mm dicken Proben heranzuziehen, scheint in Bezug auf den sich aufbauenden Druck auf eine Innenabdichtung nur bedingt sinnvoll. Die Abmaße sind zu gering und es ist fraglich, ob tatsächlich Rückschlüsse auf einen sich aufbauenden hydrostatischen Druck auf der Innenseite getroffen werden können. Allerdings können sie zum Vergleich mit weiteren Proben größeren Abmaßes herangezogen werden.

Zur Interpretation der Ergebnisse für die 100 mm dicken Proben wird das Modell von Beddoe und Springenschmid herangezogen, welches bereits in Kapitel 6 beschrieben worden ist. Wenn man diesen Ansatz auf die Messergebnisse des zu Beginn beschriebenen Versuches bezieht, erscheint es nachvollziehbar, dass bei der 100 mm dicken Probe in dem betrachteten Zeitraum kein Durchfluss gemessen werden konnte, da die Probe gerade noch dicker ist als der beschriebene Kapillarbereich (\rightarrow 70 mm). Die 50 mm dicke

Probe ist gerade noch dünner als 70 mm, was einen Durchfluss zu Folge hat. Auf Grund der lediglich 100 mm dicken Probe wäre meiner Meinung nach aber nach einem längeren Zeitraum wegen eines Überschneidens des Austrocknungs- bzw. Kapillarbereiches ein Durchfluss durchaus zu erwarten gewesen.

Wenn man die durchgeführten Versuche mit dem eben beschriebenen Modell in Verbindung bringt, kann man davon ausgehen, dass sich nach dem Einstellen der Ausgleichsfeuchte bei dickeren Bauteilen ab etwa 150 bis 200 mm nur ein unwesentlicher Druck von maximal $0,002 \text{ N/mm}^2$ hinter einer Beschichtung einstellen würde, was weit unter den Anforderungen an die Haftzugfestigkeiten¹⁰⁴ von Beschichtungen liegt.¹⁰⁵

Die Problematik, die sich aus den Versuchen nach Beddoe und Springenschmid ergibt, ist die, dass von außen kein Druck auf die Proben eingewirkt hat, sondern die Erkenntnisse im Prinzip aus einem Saugversuch resultieren. Kommt es aber zu einer Druckbeanspruchung durch Grundwasser oder womöglich zu einer Rissbildung am beanspruchten Bauwerk, dürften die Flüsse im Bauteil wesentlich höher liegen als in dem betrachteten Modell. Außerdem erscheint es physikalisch nicht ganz einleuchtend, dass im Kern des Betonquerschnittes trotz eines Wasserdampfpartialdruckgefälles zwischen den Bauteiloberflächen ein Konzentrationsausgleich nicht stattfindet und somit eine Zone ohne Wasserdampfdiffusion entsteht.

Interessant wäre die Betrachtung von 150 mm dicken Proben gewesen, bei denen nach Beddoe und Springenschmid zwei voneinander unabhängige Bereiche vorliegen. Wenn man den eben beschriebenen Ansatz verfolgt, ist es wahrscheinlich, dass sich auf der Innenseite der Probe nicht der gleiche hydrostatische Druck aufbaut wie auf der Außenseite.

7.2.3 Behinderung der freien Durchströmung

Eine weitere Betrachtungsweise führt ebenfalls zu dem Schluss, dass sich hinter der Abdichtung kein wesentlicher hydrostatischer Druck aufbauen wird. Sie geht auf den in Abschnitt 5.4 beschriebenen Vorgang der laminaren Strömung zurück.

Die Fließtheorie besagt, dass eine Durchströmung Druckunterschiede voraussetzt, wobei der Widerstand des strömenden Wassers von der Viskosität des Wassers abhängt und nicht von der Oberflächenspannung des Wassers bezogen auf die Kapillarwandung.

Der Viskositätskoeffizient beschreibt den Widerstand in den Grenzflächen zwischen Schichten mit verschiedenen Fließgeschwindigkeiten und ist im Newton'sche Fließgesetz definiert:

¹⁰⁴ Vgl. DAfStb (1990)

¹⁰⁵ Vgl. Beddoe (1999), S. 158 ff.

$$\tau = \eta \times \frac{dv}{dx} = \nu \times \rho \times \frac{dv}{dx} \quad (\text{Gl. 7.1})$$

mit	τ	Scherspannung
	η	dynamischer Viskositätskoeffizient [Pa × s]
	ν	kinematischer Viskositätskoeffizient [m ² /s]
	ρ	Rohdichte Wasser [kg/m ³]
	v	Geschwindigkeit [m/s]
	x	Wegkoordinate [m]

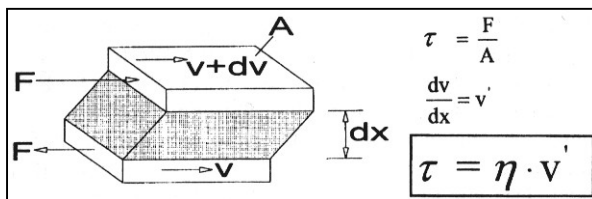


Abb. 7.2: Newton'sches Fließgesetz, Scherströmung [Klopfer (2002), S. 378]

Zur Erläuterung wird die in Abbildung 7.2 dargestellte Flüssigkeitsschicht zwischen zwei Platten betrachtet. Wenn diese gegeneinander verschoben werden, entsteht eine der Verschiebung entgegenwirkende Widerstandskraft F , welche zum einen von der Art der Flüssigkeit und zum anderen von der Temperatur abhängig ist. Die Relativgeschwindigkeit dv der Platten bezogen auf den Plattenabstand dx gibt das Geschwindigkeitsgefälle v' an. Die Kraft F kann nun bezogen auf die Fläche A als Scherspannung bezeichnet werden, welche proportional zum Geschwindigkeitsgefälle ist. Wenn man nun eine kreiszylindrische glatte Röhre betrachtet, folgt das Fließen dem Gesetz von Hagen-Poiseuille, dessen Anwendung in kapillarporösen Stoffen allerdings keine Anwendung finden kann (vgl. Abschnitt 5.4).

Es folgt, dass auf Grund der kleinen Kapillaren und Poren im Beton, die zusätzlich bereichsweise mit Luft gefüllt sind, ein freies Durchströmen wegen der Oberflächenspannung des Wassers beinahe unterbunden wird.¹⁰⁶

Da in Betonbauteilen der Fließvorgang des Wassers nahezu völlig unterbunden wird, ergibt sich daraus, dass auf der Innenseite Beschichtungen aufgebracht werden können, die den Wasserdurchgang auf dem Wege der Diffusion behindern.

Hierfür bieten sich zum Beispiel Epoxidharz, Polyurethan oder mineralische Dichtungsschlamm an.

Wassereindringversuche nach DIN 1048, die an der TU Berlin an einem stark durchlässigen Beton durchgeführt wurden, haben ergeben, dass durch Probekörper mit den oben

¹⁰⁶ Vgl. Cziesielski (1995), S. 147

genannten Beschichtungen der Wasserdurchgang im Gegensatz zu einer Referenzprobe ohne Beschichtung erheblich gemindert wurde.

In Bezug auf die Haftzugfestigkeit zeigten die Proben keinen wesentlichen Unterschied im Vergleich zu der trockenen Referenzprobe.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt die ETH in Zürich, die ebenfalls an trockenen und nassen Proben Haftversuche an Verklebungen für eine nachträglich von innen angebrachte Wärmedämmung durchgeführt hat. Dort wurde ein Kleber aus Heißbitumen (Bitumen 100/25) sowie ein Zweikomponentenkleber auf Bitumenbasis (PC 56) geprüft, wobei sich herausstellte, dass im Vergleich von wassergelagerten und trockenen Proben kein signifikanter Unterschied in den Haftzugfestigkeiten bestand (siehe Tabelle 7.1).

Mittlere Haftzugfestigkeit [N/mm²]			
Heißbitumen 100/25		Zweikomponentenkleber PC 56	
Nass	Trocken	Nass	Trocken
0,174	0,182	0,624	0,624

Tabelle 7.1: Haftzugfestigkeiten von bituminösen Klebern [Pittsburgh Corning GmbH]

Die Ergebnisse insbesondere an der TU Berlin zeigen allerdings, dass geringe Mengen an Wasser durch die Beschichtungen hindurchtreten. Dies lässt sich auch aus den Ergebnissen der Berechnungen aus Kapitel 6 erkennen.

Von Fiebrich¹⁰⁷ sind speziell die Eigenschaften in Bezug auf die Adhäsion von Kunststoffbeschichtungen auf ständig durchfeuchtetem Beton untersucht worden, auf die an dieser Stelle nur verwiesen wird. Es hat sich diesbezüglich gezeigt, dass die Adhäsionsfestigkeit von einer Vielzahl von Einflussparametern abhängt, unter anderem von der Vorbehandlung der Betonoberfläche, der Applikation sowie den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Beschichtung und von den klimatischen Randbedingungen.

Es hat sich herausgestellt, dass mit den verwendeten Berechnungsprogrammen nur Aussagen über den Feuchteeintrag gemacht werden können, die auf Grund der nicht vollständig geklärten Wassertransportvorgänge im Beton ohnehin mit Vorsicht zu genießen sind. Hinsichtlich der Untersuchung eines sich einstellenden Drucks hinter einer Abdichtung liefern sie keine Berechnungsvariante. Ebenso haben die Experimente der ETH Zürich nur eine bedingte Aussagekraft, wobei trotz allem davon ausgegangen werden kann, dass sich zeitlich verzögert kein Druck hinter einer Innenabdichtung aufbauen wird.

Selbst wenn sich in weiteren Versuchen herausstellen sollte, dass sich auf der Negativseite zeitlich verzögert doch der von außen anstehende Druck aufbaut, ist fraglich, ob dies überhaupt ein Problem darstellt. Ein Bauwerk, das 10 m tief im Grundwasser steht, erfährt eine Druckbelastung von 1 bar oder 10 mWs. Dies entspricht der Haftzugfestigkeit einer

¹⁰⁷ Vgl. Fiebrich (1990)

Beschichtung von 0,1 N/mm². Im Vergleich mit den Ergebnissen aus Tabelle 7.1 würde sich somit bezüglich eines Ablösens der Innenbeschichtung keine Problematik einstellen. Eine mineralische Dichtungsschlämme weist beispielsweise eine Haftzugfestigkeit von 0,5 N/mm² auf.¹⁰⁸

Anwendung der Rechenergebnisse auf Aussagen über Druck hinter Abdichtung

Aus den Verläufen des Wassergehalts hinter einer Innenabdichtung (siehe Kapitel 6) ist ersichtlich, dass die Poren des Querschnitts sich nahezu bis zur freien Wassersättigung und somit nicht bis zur vollständigen Sättigung mit Wasser füllen. Somit sind die Voraussetzungen für ein freies Durchströmen nicht erfüllt, was wiederum zum Schluss einer behinderten Durchströmung nach Abschnitt 7.2.3 führt. Auch beim Ansatz eines äußeren Drucks (Delphin) stellt sich keine Überschreitung der freien Wassersättigung und der maximale Wassergehalt, bei dem alle Poren mit Wasser gefüllt sind, wird nicht erreicht.

7.3 Auswirkungen des Feuchteintrags in den Raum – Feuchtebilanz

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass sich bezüglich der Abtrocknung auf der Innenseite des Bauwerkes keine Probleme einstellen, wenn sichergestellt wird, dass die Wassermenge im Inneren des Bauteiles an der Luft wieder verdunsten kann, damit sich auf der Bauteiloberfläche kein Wasserfilm bildet.

Bei der folgenden Gleichung 7.2 wird davon ausgegangen, dass der Verdunstungsvorgang nicht durch eine wasserdampfdichte Schicht behindert wird. Die beim Verdunsten durch die Luft aufnehmbare Feuchtemenge Q_V kann rechnerisch wie folgt ermittelt werden:

$$Q_V = n \times m_s \times \frac{(100 - \varphi)}{100} \times V \times 24 \text{ [g/m}^2\text{d]} \quad (\text{Gl. 7.2})$$

mit	Q_V	von der Luft aufnehmbare Feuchtemenge [g/m ² d]
	n	Luftwechselzahl [1/h]
	$n = 0,2$	bei üblichen Kellerfenstern oder Keller nicht belüftet
	$n \geq 0,5$	für belüftete Räume
	m_s	max. Wassergehalt der Luft [g/m ³], 20°C → 17,3 g/cm ³
	φ	rel. Luftfeuchtigkeit, z.B. 50 %
	V	auf die Außenwandfläche bezogenes Raumvolumen [m ³ /m ²], z.B. 2,5 m ³ /m ²

¹⁰⁸ Vgl. Schomburg (2004)

Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn

$$Q_V > 1,5 \times Q \quad (\text{Gl. 7.3})$$

Für die angesetzten klimatischen Innenverhältnisse aus den Berechnungen in Kapitel 6 ergibt sich mit einer beispielhaften Annahme eines auf die Außenwandfläche bezogenen Raumvolumens von $2,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ eine aufnehmbare Feuchtemenge von:

$$Q_V = 0,2 \times 17,3 \times \frac{100 - 50}{100} \times 2,5 \times 24 = 103,8 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$$

Wenn man die Rechenergebnisse des Feuchtedurchganges aus Kapitel 6 zugrunde legt und vom „unsichersten“ Fall ausgeht, ergibt sich für den Feuchteeintrag in den Raum:

$$Q_{\text{wand}} = Q_{\text{Sohle}} = 2 \times 18,49 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d}) = 36,98 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d}).$$

Somit ist der Nachweis nach Gleichung 7.3 erfüllt:

$$Q_V = 103,8 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d}) > 1,5 \times 36,98 = 55,47 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d}).$$

Zusätzlich zu dem aus den Bauteilen resultierenden Feuchten muss die Feuchteproduktion aus der Nutzung beachtet werden. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Feuchteproduktion durch eine Person am Tag etwa $40 \text{ g}/\text{h}$ beträgt¹⁰⁹, ergibt sich bei einem 8-stündigen Aufenthalt zweier Personen bezogen auf eine 10 m^2 große Nutzfläche ein Wert von $64 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$. Im Vergleich zu der sich aus dem Bauteil ergebenden Feuchtigkeit erscheint die Belastung auf Grund der Nutzung sogar noch höher ($Q_N = 64 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d}) > 36,98 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d}) = Q_{\text{BT}}$).

Die Überlegungen führen zu einer nachfolgend dargestellten Lösung, bei der ein Abtrocknen der Oberfläche gewährleistet ist und eine höherwertige Nutzung trotz allem gegeben ist.

¹⁰⁹ Vgl. Cziesielski (2002), S. 10.112

7.4 Aufständering

Durch eine Aufständering des Fußbodens bzw. einem Ständerwerk der Wand soll gewährleistet werden, dass das durch das Bauteil transportierte Wasser auf der Rauminnenseite frei verdunsten kann. Durch eine Konstruktion wie auf den Abbildungen 7.3 und 7.4 zu sehen, wird erreicht, dass die Bauteiloberfläche mit Luft bestrichen wird und eine Verdunstung somit nicht behindert wird.

Die Problematik besteht in dem relativ hohen Aufwand, einen sicheren und flächendeckenden Luftstrom und einen Luftwechsel im Zwischenraum zu erzielen.

Außerdem muss vermieden werden, dass im Zwischenraum hohe Luftfeuchtigkeiten entstehen, da dadurch die Gefahr von einer Schimmelpilzbildung gegeben ist. Als nachteilig müssen ebenfalls die hohen Kosten sowie die Konstruktionshöhe angeführt werden, die bei einer geringen Raumhöhe zu Nutzungseinschränkungen führen kann.

Es ergibt sich allerdings auch ein nicht unwesentlicher Vorteil gegenüber einer direkt auf das Bauteil aufgetragenen Innenbeschichtung. Wenn Rissbildungen rechtzeitig erkannt werden sollen, besteht die Möglichkeit, die Sohle über Revisionsklappen zu begutachten und gegebenenfalls Sanierungsmaßnahmen nach Abschnitt 7.1.2 einzuleiten.

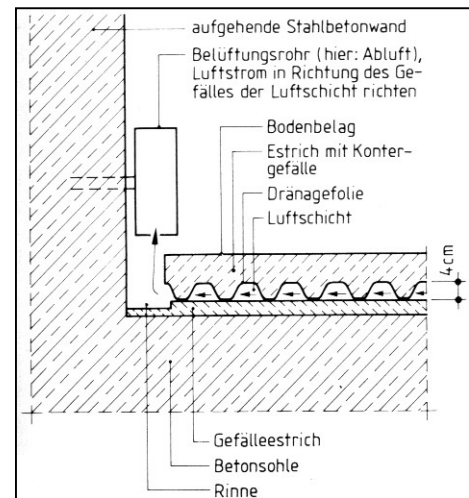


Abb. 7.3: Aufgeständerter Boden

[Cziesielski (1997), S. 707]

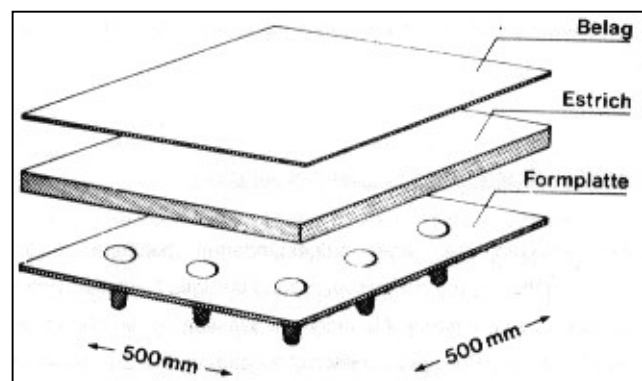
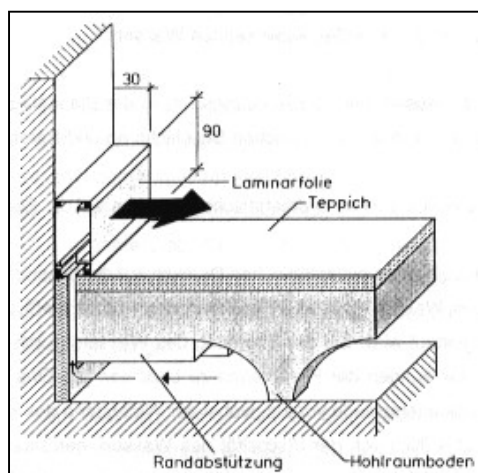


Abb. 7.4: Aufgeständerter Fußboden [Cziesielski (1995), S. 145]

7.5 Praktische Untersuchungen

Da offensichtlich sowohl Laborverfahren als auch Computersimulationen die Problematik der höherwertigen Nutzung betreffend an ihre Grenzen stoßen, werden im Folgenden einige Untersuchungen der AIBau vorgestellt. Diese wurden an Gebäuden durchgeführt, die sich seit mehreren Jahren in drückendem Wasser befinden und deren Untergeschosse mit der Bauweise einer Weißen Wanne ausgeführt worden sind.

Beim ersten Objekt (siehe Abbildung 7.5, links) wird der Keller als unbeheizter Hobbyraum genutzt. Die Oberflächen sind beschichtet, wobei der s_d -Wert ungefähr 1,2 m beträgt. Durch Messungen nach der Darr-Methode unter der Bodenbeschichtung wurde ein Feuchtegehalt von 3,9 M.-% ermittelt. Des Weiteren wurden Teilabschnitte unter anderem mit Bitumenbahnen und Dämmplatten abgedeckt und es konnte weder eine Veränderung des Feuchtegehaltes noch ein Ablösen der Beschichtung festgestellt werden.

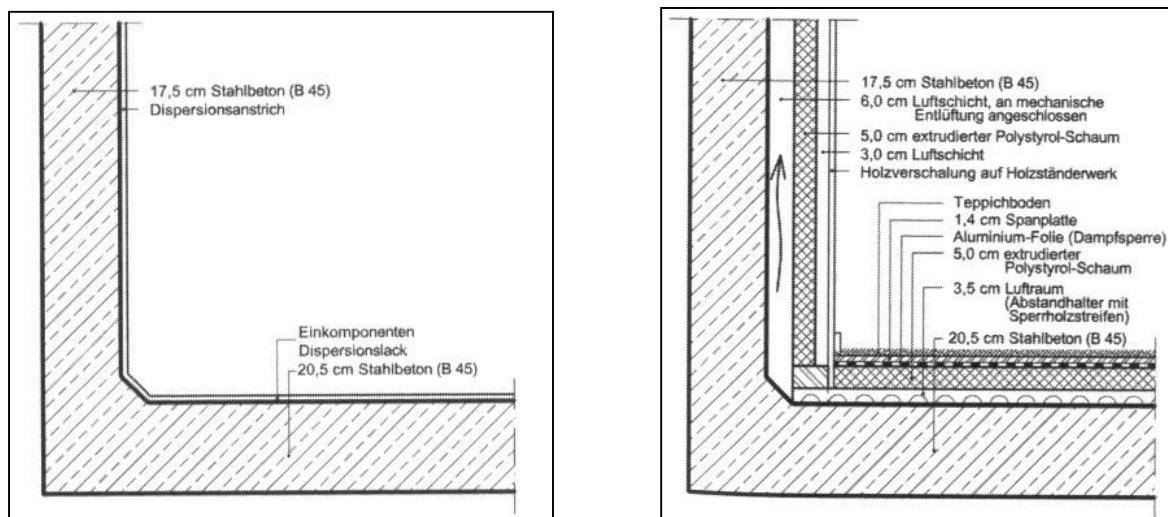


Abb. 7.5: links: Objekt 1 – Hobbyraum, rechts: Objekt 2 – Gästeschlafzimmer [Oswald (2004)]

Das zweite Gebäude (siehe Abbildung 7.5, rechts) wird seit über einem Jahrzehnt als beheiztes Schlafzimmer genutzt. Der Boden ist über eine Ausgleichslattung mit Extruderschaumplatten wärmegeklämt. Als Dampfsperre dient eine Polyethylenfolie, auf der sich geflieste Spanplatten befinden.

Der Keller des dritten Hauses (siehe Abbildung 7.6) wird ähnlich wie der des eben beschriebenen Objekts genutzt. Allerdings ist in diesem Fall die Innendämmung durch eine Luftschicht vom Untergrund getrennt. Der Zwischenraum ist an eine selten laufende Entlüftung angeschlossen.

Es hat sich zunächst herausgestellt, dass bei den letzten beiden Objekten, die Holzbauteile einen sehr hohen Feuchtegehalt von 19 M.-% aufwiesen, wodurch bereits beinahe die Gefahr von Schädlingsbefall gegeben ist. Es konnte aber auf Grund von Messungen der

Luffeuchten und des Temperaturgefälles im Bauteilquerschnitt ausgeschlossen werden, dass die hohen Luftfeuchten durch den Feuchtestrom aus dem Bauteil entstanden sind. Die Ursache liegt vielmehr in der Temperaturabsenkung hinter der Dämmung und auch eine wasserdampfundurchlässige Schicht hätte keine anderen Ergebnisse erzielt. Daraus kann gefolgert werden, dass bei beheizten Räumen eine Aufständering durchaus zu Schäden führen kann.

Wichtig ist, dass an den nicht belüfteten Oberflächen keine Hinweise auf eingedrungenes Wasser gegeben waren. Bei Ausführung einer Innendämmung erscheint die Bauweise ohne einen hinterlüfteten Zwischenraum somit besser.¹¹⁰

In naher Zukunft sollen ausführlichere Ergebnisse veröffentlicht werden, die sicherlich einen weiteren Aufschluss über die behandelte Problematik zulassen.

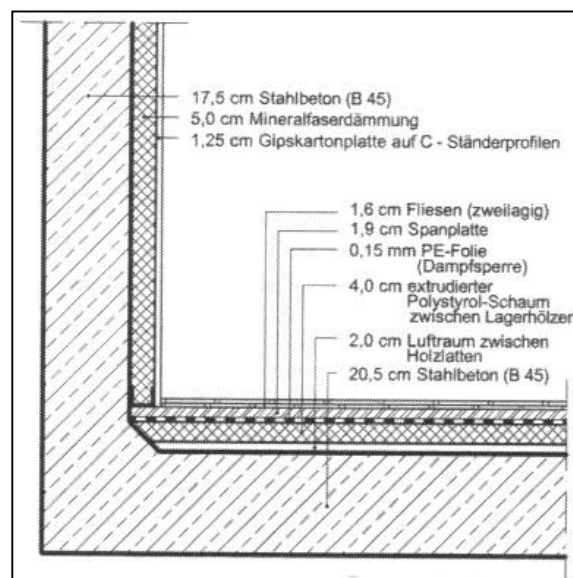


Abb. 7.6: Objekt 3 – Gästeschlafzimmer [Oswald (2004)]

¹¹⁰ Vgl. Oswald (2004)

7.6 Höherwertige Nutzung von Weißen Wannen

Zunächst ist anzumerken, dass grundsätzlich die Anforderungen an den Wärmeschutz gemäß der DIN 4108 sowie der EnEV 2002 eingehalten werden müssen. Da Nachweise des Wärmeschutzes nicht Thema dieser Ausarbeitung sind, wird auf eine genaue Beschreibung der Norm bzw. der Verordnung verzichtet.

Es ist festzuhalten, dass sich bezüglich der Nutzung von Weißen Wannen Situationen ergeben, die abhängig von der Bauweise und von der Nutzung sowohl zu unstrittigen als auch zu problematischen Lösungen führen können.

Unproblematisch ist die „traditionelle“ Ausführung, bei der die Innenoberflächen offen sind und frei belüftet werden können. Hierbei ist nur eine untergeordnete Nutzung anzustreben, wie dies zum Beispiel in Parkhäusern der Fall ist (siehe Abbildung 7.7).

Mit einer von außen aufgetragenen Perimeterdämmung kann eine höherwertige Nutzung relativ problemlos realisiert

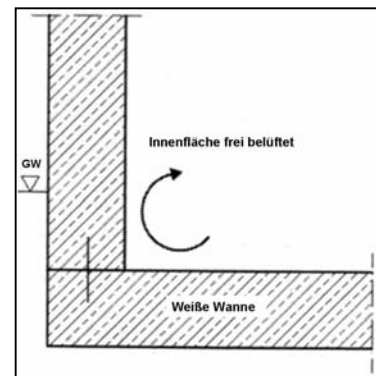


Abb. 7.7: Weiße Wanne ohne Beschichtung

werden. Selbstverständlich muss hierfür die spätere Nutzung schon in der Planungsphase bekannt sein, da im Zuge einer nachträglichen Nutzungsänderung eine solche Ausführung nicht mehr in Frage kommt. Dies ist dadurch begründet, dass sich das Bauwerk im Grundwasser befindet und gerade deswegen eine nachträgliche Innenausführung angestrebt wird. Die Abbildung 7.8 zeigt eine mögliche Ausführung, die eine höherwertige Nutzung zulässt. Der Fußbodenaufbau kann beispielsweise aus einer diffusionsdichten Schicht aus Epoxidharz, einem Estrich sowie aus einem Teppich- oder Fliesenbelag bestehen.

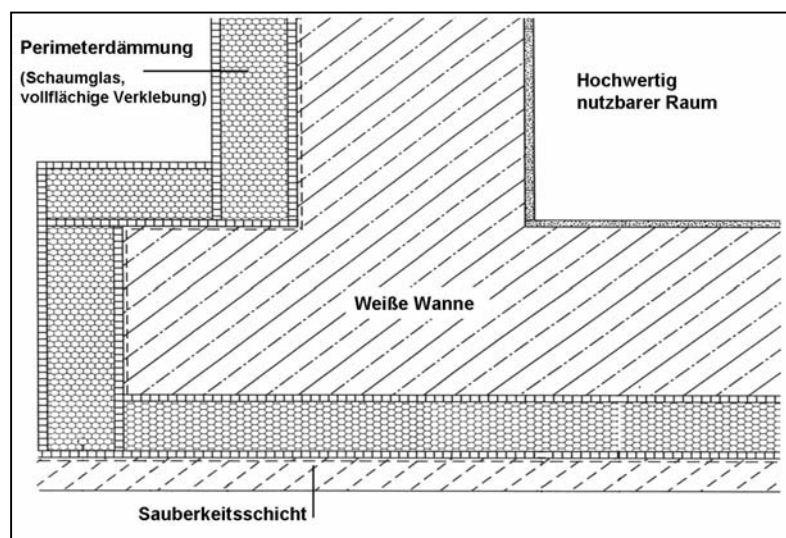


Abb. 7.8: Weiße Wanne mit Außendämmung

Die Abbildungen 7.5 und 7.6 zeigen bereits Ausführungen von innen, so wie sie bei einer Umnutzung von Kellerräumen realisiert werden können und die nach den oben beschriebenen Praxiserfahrungen im Prinzip keine Probleme darstellen. Die Abbildung 7.9 stellt hinsichtlich des Bodenaufbaus eine Ausführungsvariante mit einer 3-lagigen PE-Folie sowie einer Innendämmung aus Polyurethanschaum dar. Der aufgetragene Gipsputz an der Außenwand ist allerdings sehr fraglich, vor allem, wenn außenseitig keine Dämmung angebracht ist. Dies ist dadurch begründet, dass die Feuchtelast aus der WU-Betonkonstruktion ein Versagen des Putzes zur Folge haben kann. Besser sind Kalkzementinnenputze mit einem hohen Zementgehalt geeignet.

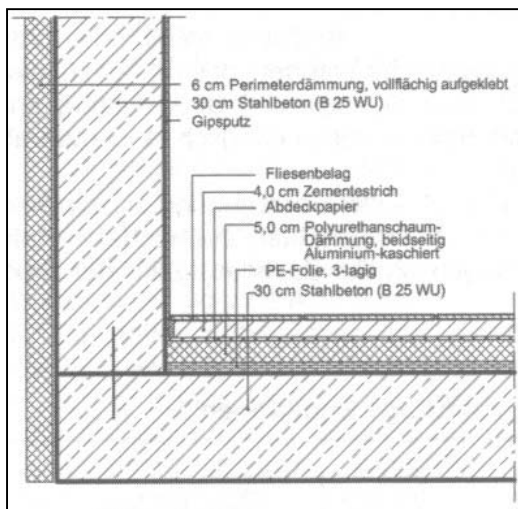


Abb. 7.9: Bodenaufbau mit PE-Folie und Dämmung [Oswald (2004)]

Um sicherzustellen, dass der erhebliche Feuchteintrag aus der Baufeuchte zumindest teilweise abgeklungen ist, sollte mit dem Innenausbau möglichst spät begonnen werden. Bei Bauten im Bestand und einer vorgesehenen Nutzungsänderung einer Weißen Wanne stellt sich die Problematik bezüglich der Baufeuchte ohnehin kaum noch, da davon auszugehen ist, dass sich bereits ein Ausgleichszustand eingestellt hat und ein Diffusionsstrom vernachlässigbar klein ist. In diesem Fall entsteht die größte Gefahr dadurch, dass bei einer höherwertigen Nutzung die Innenoberflächen nicht mehr zugänglich sind und

deshalb eventuell örtlich auftretende, rissbedingte Leckagen nur noch schwer auszumachen sind. Dies hat dann erhöhte Instandsetzungskosten zur Folge. Bei Kellern im Wohnungsbau kann davon ausgegangen werden, dass sich eine spätere Rissbildung, zum Beispiel durch Lastumlagerungen, wegen der übersichtlichen und einfachen Geometrie nicht ergeben wird. Kommt es allerdings wider Erwarten doch zu Trennrissen, und werden diese nicht rechtzeitig erkannt, ist punktuell mit einem Druck hinter einer Innenbeschichtung zu rechnen, was bei einer ungenügenden Haftzugfestigkeit einer Innenbeschichtung zu Problemen führen kann. Des Weiteren besteht dann die Gefahr, dass eine dampfdichte Sperrschicht unterlaufen wird und es zu Wasseransammlungen kommt.

8 Zusammenfassung

Wie in der vorliegenden Arbeit dargelegt worden ist, stellen Abdichtungen von erdberührten Bauteilen in der Bauwerksinstandsetzung eines der größten Probleme dar. Einerseits findet man fehlerhaft ausgeführte Abdichtungen vor. Andererseits sind gerade bei Altbauten gar keine Abdichtungen ausgeführt, da die Kellerräume eine Art Puffer zu den bewohnten Geschossen darstellten und eine gewisse Raumfeuchte in Kauf genommen wurde. Dies ist heute gerade bei einer Nutzungsänderung zu bewohnten Kellerräumen oder Ähnlichem nicht mehr erwünscht.

Es zeigt sich, dass nach Möglichkeit eine Außenabdichtung einer Innenabdichtung vorzuziehen ist, da die Feuchtigkeit dadurch vom Bauwerk abgehalten und eine Durchfeuchtung der Wand verhindert wird. Eine Innenabdichtung sollte lediglich dann ausgeführt werden, wenn das Freilegen der Außenwand zum Beispiel wegen angrenzenden Neubauten nicht möglich ist.

Für die nachträgliche vertikale Außenabdichtung hat sich ergeben, dass sich kunststoff-modifizierte Bitumendickbeschichtungen und flexible Dichtungsschlämme durchgesetzt haben. Dies liegt zum Großteil an der einfachen Verarbeitung bei schwierigen Flächen, die zum Beispiel durch Rohrdurchführungen gestört sind. Deshalb werden Bahnabdichtungen nur noch selten ausgeführt. In den Materialeigenschaften stehen die Beschichtungen den Bahnabdichtungen in nichts nach, vorausgesetzt, es werden die vorgegebenen Schichtdicken eingehalten. Die einzige Einschränkung ergibt sich daraus, dass die KMB und die Dichtungsschlämme nicht bei anstehendem Grundwasser als Lastfall aufgebracht werden dürfen, sondern maximal bis zum Lastfall des aufstauenden Sickerwassers.

Im Fall einer nachträglichen Innenabdichtung werden vorzugsweise starre Dichtungsschlämme aufgebracht. Wenn die Oberfläche unverändert bleiben soll, bieten sich ebenfalls Injektionsverfahren an.

Eine nachträgliche Vertikalabdichtung muss, sowohl innen als auch außen, immer in Kombination mit einer nachträglichen Horizontalsperre gesehen werden, damit das Bauwerk wannenartig umgeben ist. Hierbei werden in Abhängigkeit der Randbedingungen des Mauerwerks mechanische oder Injektionsverfahren eingesetzt. Bei den Erstgenannten haben sich das Mauersäge- und das Chromstahlblechverfahren durchgesetzt.

Im Hinblick auf die Untersuchung der Feuchteinträge durch Mauerwerke und durch wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton haben sich aus den unterschiedlichen Rechenansätzen und Modellbetrachtungen erhebliche Differenzen des Feuchteintrages ergeben, wobei deutlich geworden ist, dass die Durchfeuchtung eines Mauerwerks bei einer Grundwasserbelastung schnell erreicht ist und ein Feuchteintritt auch in flüssiger Form zu erwarten ist.

Die Problematik besteht zunächst grundsätzlich in den angesetzten Stoffkennwerten. Bei den Berechnungsmethoden mit WUFI und Delphin wird von Feuchteleitkoeffizienten ausgegangen, bei denen die zeitliche Veränderung des Betongefüges nicht berücksichtigt wurde. Bei der Bearbeitung dieser Diplomarbeit konnte festgestellt werden, dass sich mittlerweile in der Praxis die Annahme durchzusetzen scheint, dass der Wassertransport infolge der Kapillaraktivität von WU-Beton und auf Grund eines hydraulischen Gefälles zu vernachlässigen ist. Dies wird unter anderem durch die Aufnahme der Theorie von Beddoe und Springenschmid in die WU-Richtlinie des DAfStb unterstützt. Das heißt, dass sich in ungerissenen Bauteilen mit Dicken über 20 cm und Beton mit einem w/z-Wert $\leq 0,60$ auch innerhalb großer Zeiträume die Austrocknungsfront auf der inneren Nutzseite und die von außen eindringende Wasserfront nicht überdecken.

Der resultierende Feuchteeintrag in den Raum ergibt sich somit zum Großteil aus der Baufeuchte, wobei der Diffusionsstrom im Dauerzustand mit hinreichender Genauigkeit für Bauteile im erdberührten Bereich mit dem Glaser-Verfahren berechnet werden kann.

In Bezug auf die Simulation erdberührter Bauteile hat sich herausgestellt, dass mit den angesetzten Randbedingungen bezüglich der Grundwassersituation mit WUFI im Vergleich zu Delphin hinreichend genaue Ergebnisse erzielt werden. Aus den oben genannten Gründen muss allerdings bedacht werden, dass der Ansatz für eine kontinuierlich durchtretende Wassermenge zur Berechnung des Feuchtedurchgangs bei Betonbauteilen mit großer Wahrscheinlichkeit ohnehin zu große Werte liefert. Die Tatsache, dass mit WUFI kein hydrostatischer Druck auf das Bauteil angesetzt werden kann, ist dadurch zu vernachlässigen.

Die Frage, ob sich hinter einer Innenbeschichtung auf der Oberfläche einer Weißen Wanne der an der Außenseite anstehende Druck aufbaut, kann nicht abschließend beantwortet werden. Die Interpretation der vorliegenden Untersuchungen zur Permeabilität einer Weißen Wanne der ETH in Zürich lässt meiner Meinung nach bei einer Beziehung der Ergebnisse auf das Modell von Beddoe und Springenschmid (\rightarrow maßgebender Feuchteeintrag aus der Baufeuchte) den Schluss zu, dass sich auf Grund eines beschränkten Kapillarbereiches nur ein unwesentlicher Druck hinter der Abdichtung aufbaut. Ebenso kann davon ausgegangen werden, dass durch die in den Poren und Kapillaren eingeschlossene Luft die Oberflächenspannung des Wassers ein freies Durchströmen nahezu unterbindet. Hierzu müssten allerdings Langzeitversuche angestrebt werden, die genauere Aussagen über einen sich aufbauenden Druck erlauben. Die Experimente der ETH bilden dafür eine gute Grundlage, wobei insbesondere Probendicken mit einer Dicke von mindestens 150 mm (besser: 200 mm) betrachtet werden sollten.

Insbesondere durch die Praxiserfahrungen hat sich herausgestellt, dass eine höherwertige Nutzung von erdberührten Bauteilen, die als Weiße Wannen ausgeführt werden, kein

Problem darstellt. Nach Möglichkeit sollte die Nutzung bereits in der Planungsphase feststehen, damit die bei weitem unproblematischste Lösung einer außen anliegenden Perimeterdämmung realisiert werden kann.

Wird allerdings erst nach einigen Jahren die Entscheidung getroffen, eine Weiße Wanne höherwertig zu nutzen, bilden zum Beispiel dampfdichte Schichten wie bituminöse Dichtungsbahnen mit einer Aluminiumeinlage einen Schutz bezüglich eines feuchteempfindlichen Ausbaus. Darüber hinaus wird häufig eine hinterlüftete Konstruktion favorisiert, da teilweise die Ansicht besteht, dass sich hinter einer diffusionsdichten Schicht ein Wasserbett bildet. Dies kann auf Grund der Praxisuntersuchungen aber mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden. Bei aufgeständerten Holzkonstruktionen besteht hingegen die Gefahr, dass durch die Abkühlung der aus der Innenraumluft eindringenden Luft die relative Luftfeuchtigkeit im Zwischenraum erhöht wird und eine verstärkte Schimmelgefahr gegeben ist.

Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass eine Weiße Wanne eine bewährte Abdichtungskonstruktion darstellt und eine höherwertige Nutzung realisierbar ist, allerdings mit der Einschränkung, dass wasserführende Risse hinter einer Innenbeschichtung nur schwer lokalisierbar sind und unter Umständen zu einem Schaden führen können.

9 Literaturverzeichnis

9.1 Normen, Richtlinien und Merkblätter

Bauberatung Zement (2002)

Bauberatung Zement (Hrsg.): Zement-Merkblatt Hochbau : Wasserundurchlässige Betonbauwerke : Grundsätze der Planung und Ausführung, Heft 10 (2002), S. 6

DAfStb (2003)

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie : Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton. Berlin, 2003

DAfStb (1990)

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen : Teil 2 : Bauplanung und Bauausführung (1990)

Deitermann (o.J.)

Deitermann: Maxit Group : Richt- und Regelwerke.

<http://www.deitermann.de/pdf/tm/11020382.PDF>. Stand der Seite o.J.; Tag des Downloads: 25.06.05

Deutsche Bauchemie (2002)

Deutsche Bauchemie e.V. (Hrsg.): Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen von Bauteilen mit mineralischen Dichtungsschlämmen. Frankfurt, 2002, S. 5

Deutsche Bauchemie (2001)

Deutsche Bauchemie e.V. (Hrsg.): Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen mit kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen (KMB). Frankfurt, 2001, S. 22

Deutsche Bauchemie (1999)

Deutsche Bauchemie e.V. (Hrsg.): Richtlinie für die Planung und Ausführung von Abdichtungen erdberührter Bauteile mit flexiblen Dichtungsschlämmen. Frankfurt, 1999, S. 11

NABau (2003)

Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Hrsg.): Beiblatt 1 zu DIN 4020 : Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke : Anwendungshilfen, Erklärungen. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2003, S. 26 ff.

NABau (2003)

Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Hrsg.): DIN 4020 : Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2003

NABau (2002)

Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Hrsg.): DIN 4124 : Baugruben und Gräben - Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2002

NABau (2000)

Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Hrsg.): DIN 4123 : Ausschachtungen, Gründungen und Unterfangungen im Bereich bestehender Gebäude. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2000

NABau (2000)

Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Hrsg.): DIN 18195-1 : Bauwerksabdichtungen : Grundsätze, Definitionen, Zuordnung der Adichtungsarten. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2000, S. 6 ff.

NABau (1991)

Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Hrsg.): DIN 4030 : Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1991

NABau (1990)

Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Hrsg.): DIN 4021 : Aufschluss durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1990

NABau (1987)

Normenausschuss Bauwesen (NABau) (Hrsg.): DIN 4022-1 : Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels : Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1987

Schomburg (2004)

SCHOMBURG GmbH & Co KG: Bauwerksabdichtung und Instandsetzung.
http://static.schomburg.de//tm/deutsch/Aquafin_2K_M.pdf. Stand der Seite
07/2004; Tag des Downloads: 06.07.2005

WTA (2004)

WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.): Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit : Merkblatt E 4-4-04/D. München : WTA-Publications, 2004, S. 6

WTA (2003)

WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.): Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile : Entwurf Merkblatt E 4-6-03/D. München : WTA-Publications, 2003, S. 6

WTA (2002)

WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.): Nachträgliche mechanische Horizontalsperre : Merkblatt 4-7-02/D. München : WTA-Publications, 2002

WTA (2001)

WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.): Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse : Merkblatt 6-2-01/D. München : WTA-Publications, 2001, S. 6

WTA (1998)

WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (Hrsg.): Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile : Merkblatt E 4-6-98/D. München : WTA-Publications, 1998, S. 3, 9 ff., 20

9.2 Literatur**Alfes (2005)**

Alfes, Christoph: WU-Bauweise mit Fertigteilen : Hinweise für Planung, Herstellung und Ausführung. In: WU-Bauwerke aus Beton : Planung und Ausführung nach der neuen DAfStb-Richtlinie "Wasserundurchlässige Bauteile aus Beton" (WU-Richtlinie). hrsg. von Beton Marketing Nord GmbH, 2005

Arendt (1990)

Arendt, Claus: Verfahren zur Ursachenermittlung bei Feuchtigkeitsschäden an erdberührten Bauteilen. In: Oswald, Rainer ; Schild, Erich (Hrsg.) : Aachener Bausachverständigentage 1990 : Erdberührte Bauteile und Gründungen. Wiesbaden ; Berlin : Bauverlag GmbH, 1990, S. 101

Beddoe (2004)

Beddoe, Robin ; Schießl, P.: Wassertransport in WU-Beton – kein Problem! : Untersuchungsergebnisse. In: Oswald, Rainer (Hrsg.) : Aachener Bausachverständigentage 2004 : Risse und Fugen in Wand und Boden. Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlag, 2005, S. 94

Beddoe (1999)

Beddoe, Robin ; Springenschmid, Rupert: Feuchtetransport durch Bauteile aus Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau. o.O. : Ernst & Sohn (1999), Nr. 4, S. 158-166

Bonk (2001)

Bonk, Michael: Sanierung von Abdichtungen. In: Cziesielski, Erich (Hrsg.) : Lufsky Bauwerksabdichtung. 5. Aufl. Leipzig ; Stuttgart ; Wiesbaden : B. G. Teubner Verlag, 2001, S. 379, 385, 411, 416

Budelmann (2004)

Budelmann, Harald: Bauschäden : Entstehung – Vermeidung – Instandsetzung. Braunschweig, Universität, Fachbereich 6, Vorlesungsumdruck, 2004, S. 10, 64, 86

Cziesielski (2001)

Cziesielski, Erich: Berechnung bituminöser Abdichtungen und Prinzipien. In: Cziesielski, Erich (Hrsg.) : Lufsky Bauwerksabdichtung. 5. Aufl. Leipzig ; Stuttgart ; Wiesbaden : B. G. Teubner Verlag, 2001, S. 96

Cziesielski (1997)

Cziesielski, Erich ; Vogdt, Frank : Bauwerksabdichtungen. In: Cziesielski, Erich (Hrsg.) : Lehrbuch der Hochbaukonstruktion. 3. Aufl. Stuttgart : B. G. Teubner Verlag, 1997, S. 707

Cziesielski (1995)

Cziesielski, Erich: Feuchtetransport durch Bauteile aus WU-Beton und konstruktive Folgerungen. In: Dierks, Klaus ; Hees, Gebhard ; Specht, Manfred (Hrsg.) : Gründungsbawerke aus wasserundurchlässigem Beton : Qualitätssicherung durch Konstruktion, Berechnung und Ausführung mit Kostenvergleich. 2. erweiterte Aufl. Berlin : TU-Berlin, 1995, S. 129, 131 ff., 134, 137 ff.

Fiebrich (1990)

Fiebrich, Michael: Kunststoffbeschichtungen auf ständig durchfeuchtetem Beton : Adhäsionseigenschaften, Eignungsprüfkriterien, Beschichtungsgrundsätze. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1990

Flassenberg (2003)

Flassenberg, Georg: Abdichtung von Kellerwänden aus Porenbeton. In: Baumarkt und Bauwirtschaft : Bauverfahrenstechnik. Wiesbaden : Bundesverband Porenbeton (2003), Nr. 2, S. 62-67

Frössel (2001)

Frössel, Frank: Mauerwerkstroekenlegung und Kellersanierung : Wenn das Haus nasse Füße hat. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2001, S. 210 ff., 216, 217, 225, 246

Gertis (1980)

Gertis, Karl ; Kießl, Kurt: Feuchtetransport in Baustoffen : Eine Literaturlauswertung zur rechnerischen Erfassung hygrischer Transportphänomene. Essen, Universität, Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen, 1980, S. 19 ff.

Gertis (1976)

Gertis, Karl ; Kießl, Kurt ; Werner, Hans ; Wolfseher, Ulrich: Hygrische Transportphänomene in Baustoffen. Heft 258. Berlin ; Düsseldorf ; München : Verlag Wilhelm Ernst & Sohn KG, 1976, S. 24

Grunau (1990)

Grunau, Edvard B. ; Schmitt, Jürgen ; Köster, Johann: Abdichtung von Bauwerken. Köln : Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, 1990, S. 101, 102, 105

Haack (2003)

Haack, Alfred ; de Hesselle, Jörg ; Hornig, Ute: Wasserundurchlässiger Beton. In: Haack, Alfred ; Emig, Karl-Friedrich (Hrsg.) : Abdichtungen im Gründungsbereich und auf genutzten Deckenflächen. 2. Aufl. Berlin : Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG, 2003, 324 ff.

Hariri (2004)

Hariri, Karim: Bauwerksmonitoring und Messtechnik I. Braunschweig, Universität, Fachbereich 6, Vorlesungsumdruck, 2004, S. 135 ff.

Häupl (2004)

Häupl, Peter: Bauphysik : Klima, Wärme, Feuchte. Dresden, Universität, Fachbereich Architektur, Vorlesungsumdruck, 2004/2005, S. 262

Hauptverband der deutschen Bauindustrie (1995)

Hauptverband der deutschen Bauindustrie e.V. (Hrsg.): Lehrbrief Bauwerksabdichtung. Band 1. Wiesbaden, 1995, S. 1 ff.

Hilmer (2003)

Hilmer, Klaus: Baugrund und Dränung. In: Haack, Alfred ; Emig, Karl-Friedrich (Hrsg.) : Abdichtungen im Gründungsbereich und auf genutzten Deckenflächen. 2. Aufl. Berlin : Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG, 2003, S. 1, 8

Kabrede (2003)

Kabrede, Hans-Axel ; Spirgatis, Rainer: Abdichten erdberührter Bauteile : Gebäudeinstandsetzung. Band 1. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2003, S. 24 ff., 56, 81 ff., 110 ff., 115 ff.

Kabrede (1998)

Kabrede, Hans-Axel: Injizieren, Verpressen und Verfüllen von Beton und Mauerwerk : Der Praktiker-Leitfaden bei abdichtenden, elastischen und kraftschlüssigen Injektionen. Renningen-Malmsheim : expert-Verlag, 1998, S. 56

Kießl (1983)

Kießl, Kurt: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen -Rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung-. Essen, Universität, Diss., 1983, S. 35, 37

Klopfer (2002)

Klopfer, Heinz: Feuchte. In: Lehrbuch der Bauphysik : Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima. 5. Aufl. Stuttgart : Teubner, 2002, S. 357, 378, 379

Klopfer (2001)

Klopfer, Heinz: Werkstoffe der Bauwerksabdichtung. In: Cziesielski, Erich (Hrsg.) : Lufsky Bauwerksabdichtung. 5. Aufl. Leipzig ; Stuttgart ; Wiesbaden : B. G. Teubner Verlag, 2001, S. 37, 39

Klopfer (1999)

Klopfer, Heinz: Wassertransport und Beschichtungen bei WU-Beton-Wannen. In: Oswald, Rainer (Hrsg.) : Aachener Bausachverständigentage 1999 : Neue Entwicklungen in der Abdichtungstechnik. Wiesbaden : Vieweg & Sohn Verlag, 1999

Klopfer (1974)

Klopfer, Heinz: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen, insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen. Wiesbaden ; Berlin : Bauverlag GmbH, 1974, S. 54

Kohls (2000)

Kohls, Arno: Bauwerksabdichtungen : Die neue DIN 18195 schließt eine Lücke. In: Das Architekten-Magazin. o.O. (2000), Nr. 10, S. 29-32

Krus (1995)

Krus, Martin: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe : Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Stuttgart, Universität, Diss., 1995, S. 15

Künzel (1994)

Künzel, Hartwig: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Stuttgart, Universität, Diss., 1994, S. 9

Künzel (1982)

Künzel, Hartwig: Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. In: Bauphysik 4 (1982), Nr. 3, S. 101-107

Künzel (1974)

Künzel, Hartwig: Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen. In: Der deutsche Baumeister BDB. o.O. (1974), Nr. 1, S. 46

Lohmeyer (2000)

Lohmeyer, Gottfried: Wasserundurchlässige Konstruktionen : Bauwerkssohlplatten aus WU-Beton : Bauphysikalische Besonderheiten. In: Beton (2000), Nr. 10, S. 570-575

Lohmeyer (1997)

Lohmeyer, Gottfried: Handbuch Betontechnik : Handbuch für betongerechte Planung und Ausführung. Düsseldorf : Beton-Verlag GmbH, 1997, S. 93

Lohmeyer (1995)

Lohmeyer, Gottfried: Weiße Wannen, einfach und sicher : Konstruktion und Ausführung von Kellern und Becken aus Beton ohne besondere Dichtungsschicht. 4. Aufl. Düsseldorf : Beton-Verlag, 1995, S. 27

Lohmeyer (1993)

Lohmeyer, Gottfried: Schadenfreies Bauen : Schäden an Flachdächern und Wannen aus wasserundurchlässigem Beton. Stuttgart : IRB-Verlag, 1993, S. 18 ff.

Oswald (2004)

Oswald, Rainer: Praktische Erfahrungen bei hochwertig genutzten Räumen in WU-Betonbauwerken – Anmerkungen zur neuen WU-Richtlinie des DAfStb. In: Oswald, Rainer (Hrsg.) : Aachener Bausachverständigentage 2004 : Risse und Fugen in Wand und Boden. Vieweg & Sohn Verlag, 1999

Oswald (2004)

Oswald, Rainer: Schwachstellen : Hochwertige Raumnutzungen in Untergeschossen aus Weißen Wannen. In Deutsche Bauzeitschrift. o.O. (2004), Nr. 5, S. 90-96

Oswald (1998)

Oswald, Rainer: Auf dem Weg zu einer modernen Abdichtungsnorm : Kommentar zum neuen Entwurf DIN 18195 – Bauwerksabdichtungen. In: ARCONIS. o.O. (1998), Nr.4, S. 41-46

Oswald (1997)

Oswald, Rainer: Schwachstellen : Erscheinungsbilder und Ursachen häufiger Schwachstellen. In Deutsche Bauzeitschrift. o.O. (1997), Nr. 3, S. 109-113

Pohl (1998)

Pohl, Reiner: Alternative Bauwerksabdichtung : Leistungsfähigkeit moderner Bitumendickbeschichtungen und Dichtungsschlämmen. Landsberg/Lech : Verl. Moderne Industrie, 1998, S. 30

Reul (2001)

Reul, Horst: Handbuch Bautenschutz und Bausanierung : Schadensursachen, Diagnoseverfahren, Sanierungsmöglichkeiten. 4. Aufl Köln : Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, 2001, S. 182 ff., 188

Richner (2002)

Richner, Heinz: Permeabilität des Betons für eine Weiße Wanne. Schlussbericht der ETH Zürich, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion (2002)

Ripphausen (1989)

Ripphausen, Bernd: Untersuchungen zur Wasserundurchlässigkeit und Sanierung von Stahlbetonbauteilen mit Trennrissen. Aachen, Universität, Diss., 1989, S. 31

Rostásy (1978)

Rostásy, Ferdinand S.: Zur Herstellung von wasserundurchlässigem Beton. In: VDI-Berichte 295 : Abdichtungen im Tiefbau. hrsg. vom Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure Düsseldorf (1978), S. 49-54

Sauerbier (2002)

Sauerbier, Reiner: Beidseitig beschützbar : Nachträgliches Instandsetzen bei Kellerabdichtungen von außen und innen. In: B+B Bauen im Bestand. o.O. (2002), Nr. 4, S. 55-58

Schumann (1990)

Schumann, Dieter: Nachträgliche Innenabdichtung bei erdberührten Bauteilen. In: Erdberührte Bauteile und Gründungen. Wiesbaden ; Berlin : Bauverlag GmbH, 1990, S. 111

Smoltczyk (1990)

Smoltczyk, Ulrich: Grundbautaschenbuch Teil 1 : Baugrundgutachten. Berlin : Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, S. 45 ff.

Warnecke (2002)

Warnecke, Peter: Schutz und Sicherung historischer Bauten. Braunschweig, Universität, Fachbereich 6, Vorlesungsumdruck, 2002, S. 11, 55

9.3 PC-Programme**WUFI**

Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen unter realen Bedingungen (Version 4,0 professional)

Delphin

Numerical Simulation Program for coupled Heat, Air, Salt and Moisture Transfer (Version 4.5.3)

10 Befragte Personen

Dipl.-Ing. Jens Bode

BBS Ingenieurbüro, Wolfenbüttel

Dipl.-Ing. Uwe Gronau

BBS Ingenieurbüro, Weimar

Dipl.-Ing. Ulrich Ruisinger

Institut für Bauklimatik, TU-Dresden

Dipl.-Ing. Peter Steben

BBS Ingenieurbüro, Wolfenbüttel

Mitarbeiter

Beton Marketing Nord GmbH

Mitarbeiter

Cemex Deutschland AG

11 Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich vorstehende Diplomarbeit selbstständig angefertigt und die benutzten Hilfsmittel sowie die befragten Personen und Institutionen vollständig angegeben habe.

Braunschweig, den 17.08.2005

Christian Seibt