

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 4

Bauingenieurwesen

Dipl.-Ing. Stefan Grasberger,  
Dortmund

Nr. 186

## Gekoppelte hygro- mechanische Material- modellierung und numerische Simulation langzeitiger Degradation von Betonstrukturen



GRADUIERTENKOLLEG  
*Computational  
Structural  
Dynamics*

Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen  
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau  
Ruhr-Universität Bochum

*HLuHB Darmstadt*



15398914

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung und Motivation . . . . .	1
1.2	Ziele und Umfang der Arbeit . . . . .	4
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1	Einführung . . . . .	7
2.2	Porenverteilung und Porosität . . . . .	8
2.3	Hygroskopisches Verhalten von Beton . . . . .	9
2.3.1	Klassifikation . . . . .	9
2.3.2	Feuchtespeicherung und Verteilung . . . . .	10
2.4	Hygrisch induzierte Spannungen . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Thermodynamische Grundlagen</b>	<b>16</b>
3.1	Makroskopische Modellbildung teilgesättigter poröser Medien . . . . .	16
3.1.1	Allgemeines . . . . .	17
3.1.2	Kinematik . . . . .	18
3.1.3	Totaler Spannungstensor . . . . .	18
3.1.4	Massenbilanz . . . . .	19
3.2	Anwendung der beiden Hauptsätze der Thermodynamik . . . . .	20
3.2.1	Der erste Hauptsatz . . . . .	20
3.2.2	Der zweite Hauptsatz . . . . .	21
3.3	Konstitutive Gleichungen . . . . .	23
3.3.1	Identifikation der Dissipationen . . . . .	23
3.3.2	Entropiebilanz . . . . .	24

3.3.3	Zustandsgleichungen . . . . .	24
3.3.4	MAXWELL Beziehungen . . . . .	25
3.4	Transportgesetze . . . . .	26
3.5	Zusammenfassung . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Thermo-hygro-mechanische Materialmodellierung von Beton</b>	<b>29</b>
4.1	Beton als poröses Medium . . . . .	30
4.2	Zustandsgleichungen . . . . .	31
4.2.1	Spezifizierung der freien HELMHOLTZ-Energie . . . . .	31
4.2.2	Inkrementelle, undrainierte Zustandsgleichung für die Spannungen .	33
4.2.3	Inkrementelle Zustandsgleichung für den Flüssigkeitsdruck . . . . .	34
4.2.4	Inkrementelle Zustandsgleichung für die Entropie . . . . .	36
4.2.5	Inkrementelle, drainierte Zustandsgleichung für die Spannungen . .	36
4.3	Identifikation der Materialparameter . . . . .	37
4.3.1	Poroclastische Kopplungskoeffizienten . . . . .	38
4.3.2	Einfluß der Schädigung . . . . .	41
4.3.3	Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung . . . . .	42
4.4	Effektive Spannungen . . . . .	45
4.4.1	Einführung . . . . .	45
4.4.2	Elastische effektive Spannung . . . . .	46
4.4.3	Plastische effektive Spannung . . . . .	48
4.4.4	Identifikation des plastischen BIOT Koeffizienten . . . . .	48
4.5	Beschreibung dissipativer Prozesse . . . . .	49
4.5.1	Grenze des elastischen Materialbereichs . . . . .	50
4.5.2	Evolutionsgleichungen . . . . .	52
4.5.3	Schranken für $b^p$ . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Transport</b>	<b>55</b>
5.1	Feuchtetransport . . . . .	55
5.1.1	Einführung . . . . .	55
5.1.2	Makroskopische Formulierung des Feuchtetransports in Beton . . . .	56
5.1.3	Einfluß des Feuchtegehaltes . . . . .	58

---

5.1.4	Einfluß der Porosität . . . . .	59
5.1.5	Einfluß von Rissen . . . . .	61
5.2	Wärmetransport . . . . .	65
5.3	Gekoppelter Wärme- und Feuchtetransport . . . . .	65
5.3.1	Einfluß des Feuchtegehalts auf den Wärmetransport . . . . .	66
5.3.2	Einfluß der Temperatur auf den Feuchtetransport . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Numerische Umsetzung</b>	<b>70</b>
6.1	Rand- und Anfangsbedingungen . . . . .	70
6.2	Schwache Form der Anfangsrandwertaufgabe . . . . .	72
6.3	Zeitliche Diskretisierung . . . . .	73
6.4	Konsistente Linearisierung . . . . .	73
6.5	Räumliche Diskretisierung . . . . .	74
6.5.1	Ansatzfunktionen . . . . .	75
6.5.2	Diskretisierung der Elementgrößen . . . . .	75
6.5.3	Vektor der inneren Kräfte . . . . .	76
6.5.4	Tangentiale Steifigkeitsmatrix . . . . .	78
6.6	Iterative Lösung . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Verifikation des Modells anhand von Experimenten</b>	<b>82</b>
7.1	Poroelastizität . . . . .	82
7.1.1	Trocknung eines Betonbalkens unter kombinierter Belastung . . . . .	82
7.2	Poroplastizität – Schädigung . . . . .	86
7.2.1	Zyklisch belasteter Balken mit mittigem Schlitz . . . . .	86
7.2.2	Abhängigkeit der Festigkeit vom Feuchtegehalt . . . . .	89
7.2.3	Einfluß von Rissen auf den Feuchtetransport . . . . .	96
<b>8</b>	<b>Anwendungsbeispiele</b>	<b>103</b>
8.1	Austrocknung und Wiederbefeuchtung einer eingespannten Betonwand . . . . .	103
8.2	Betonscheibe unter mechanischer, thermischer und hygrischer Belastung . . . . .	107
8.3	Numerische Simulation einer Tunnelinnenschale . . . . .	112
8.3.1	Einführung . . . . .	112
8.3.2	Risse in Innenschalen . . . . .	113

---

8.3.3	Geometrie und Modellierung . . . . .	116
8.3.4	Einwirkungen . . . . .	119
8.3.5	Ergebnisse – unbewehrte Tunnelinnenschale . . . . .	121
8.3.6	Ergebnisse – Vergleich . . . . .	127
8.3.7	Zusammenfassung . . . . .	129
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>130</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	130
9.2	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	131
9.3	Ausblick . . . . .	133
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>134</b>