# OBSAH

**Předmluva k českému vydání** ..... 11

**Předmluva k anglickému vydání** ..... 12

**Životopis** ..... 14

**1. Terminologie: některé vlastní volby** ..... 15

1.1 O titulu knihy ..... 15
1.2 Poměr voda/cement, příměsi/cement, nebo voda/pojivo ..... 15
1.3 Beton s normální pevností/obyčejný beton/běžný beton ..... 16
1.4 Vysokopevnostní nebo vysokohodnotný beton ..... 16

**2. Úvod** ..... 18

**3. Ohlédnutí do historie** ..... 22

3.1 Předchůdci a průkopníci ..... 22
3.2 Od plastifikátorů k superplastifikátorům ..... 24
3.3 Nastupují křemičité úlety ..... 26
3.4 Současný stav věcí ..... 27

**4. Opodstatněnost vysokohodnotného betonu** ..... 29

4.1 Úvod ..... 29
4.2 Pohled investora ..... 29
4.3 Pohled projektanta ..... 30
4.4 Pohled dodavatele stavby ..... 31
4.5 Pohled výrobce betonu ..... 31
4.6 Z pohledu na životní prostředí ..... 32
4.7 Vybrané návrhy ..... 33
4.7.1 Budova „Water Toner Place“ ..... 33
4.7.2 Stavba těžní plošiny „Gullfaks“, postaveno v roce 1991, Norsko ..... 34
4.7.3 Viadukty „Sylans/Glacière“ ..... 37
4.7.4 Budova „Scotia Plaza“ ..... 39
4.7.5 Most „Île de Ré“, postaven v roce 1988, Francie ..... 40
4.7.6 Budova „Two Union Square“, postavena v roce 1988 v Seattlu, Washington, USA ..... 42
4.7.7 Most „Joigny“, postaven v roce 1989, Francie ..... 44
4.7.8 Most „Monteé St-Rémi“, postaven v roce 1993 blízko Montrealu, Kanada ..... 46
4.7.9 Most „Pont de Normandie“, dokončen v roce 1993, Francie ..... 48
4.7.10 Stavba těžební plošiny „Hibernia“, dokončena v roce 1996 v Newfoulandu, Kanada ..... 51
4.7.11 Most konfederace mezi ostrovem Prince Edwarda a městem New Brunswick, postaven v roce 1997, Kanada ..... 53

**5. Vysokohodnotný beton – principy** ... 57

5.1 Úvod ... 57
5.2 Porušení betonu při zatížení v tlaku ... 57
5.3 Zlepšení pevnosti zhydratované cementové pasty ... 58
5.3.1 Pórovitost ... 60
5.3.2 Pokles velikosti hydratačních produktů ... 63
5.3.3 Redukce nehomogenit ... 63
5.4 Zlepšení pevnosti tranzitní zóny ... 63
5.5 Pátrání po pevném kamenivu ... 64
5.6 Reologie směsi s velmi nízkým vodním součinitelem ... 64
5.6.1 Optimalizace zrnitosti kameniva ... 65
5.6.2 Optimalizace zrnitosti částic cementu ... 65
5.6.3 Použití minerálních příměsí ... 65
5.7 Zákon vodního součinitele ... 65
5.8 Závěrečné poznámky ... 66

**6. Přehled důležitých vlastností vybraných složek vysokohodnotného betonu** ... 67

6.1 Úvod ... 67
6.2 Portlandský cement ... 67
6.2.1 Složení ... 67
6.2.2 Výroba slínku ... 68
6.2.3 Mikrostruktura slínku ... 71
6.2.4 Výroba portlandského cementu ... 74
6.2.5 Přejímací zkoušky portlandského cementu ... 76
6.2.6 Hydratace portlandského cementu ... 76
6.2.7 Závěry k problematice hydratace portlandského cementu z hlediska přípravy vysokohodnotných betonů ... 78
6.3 Portlandský cement a voda ... 79
6.3.1 Od plastifikátorů k superplastifikátorům ... 79
6.3.2 Typy superplastifikátorů ... 82
6.3.3 Výroba superplastifikátorů ... 82
6.3.4 Hydratace portlandského cementu v přítomnosti superplastifikátoru ... 85
6.3.5 Ústřední role síranu vápenatého ... 87
6.3.6 Použitelnost superplastifikátorů ... 88
6.3.7 Závěrečné poznámky ... 89
6.4 Materiály nahrazující cement ... 89
6.4.1 Úvod ... 89
6.4.2 Křemičité úlety ... 91
6.4.3 Struska ... 95
6.4.4 Popílek ... 98
6.4.5 Závěrečné poznámky ... 101

**7. Výběr materiálů** ... 102

7.1 Úvod ... 102
7.2 Třídy vysokohodnotného betonu ... 102

7.3 Výběr materiálů ... 102
7.3.1 Výběr cementu ... 103
7.3.2 Volba superplastifikátoru ... 107
7.3.3 Kompatibilita cementu a superplastifikátoru ... 111
7.3.4 Dávka superplastifikátoru ... 119
7.3.5 Výběr finálního pojivého systému ... 120
7.3.6 Výběr křemičitých úletů ... 120
7.3.7 Výběr popílku ... 122
7.3.8 Výběr strusky ... 123
7.3.9 Možná omezení při použití strusky a popílku ve vysokohodnotném betonu ... 124
7.3.10 Výběr kameniva ... 125
7.4 Závěrečné poznámky ... 127

**8. Metody návrhu vysokohodnotného betonu ... 128**

8.1 Minulost ... 128
8.2 Tradiční způsob návrhu ... 128
8.3 Definice a užité vzorce ... 130
8.3.1 Nasycené a povrchově osušené kamenivo (NPOK) ... 130
8.3.2 Vlhkost a obsah vody ... 131
8.3.3 Objemová hmotnost ... 133
8.3.4 Obsah minerálních příměsí ... 133
8.3.5 Dávka superplastifikátoru ... 134
8.3.6 Požadovaná tlaková pevnost ... 138
8.4 Návrhová metoda ... 139
8.4.1 Formulář pro návrh směsi ... 142
8.4.2 Od pokusné směsi ke složení 1 m³ (ve stavu NPOK) ... 149
8.4.3 Složení záměsi ... 155
8.4.4 Omezení metody návrhu ... 157
8.5 Další metody pro návrh směsi ... 158
8.5.1 Metoda doporučená ACI 363 Committee on high-strength concerete ... 159
8.5.2 Metoda de Larrardova (de Larrard, 1990) ... 160
8.5.3 Zjednodušená metoda podle Mehty a Aïtcina ... 161

**9. Výroba vysokohodnotného betonu ... 163**

9.1 Úvod ... 163
9.2 Příprava před mícháním ... 164
9.3 Míchání ... 165
9.4 Kontrola zpracovatelnosti vysokohodnotného betonu ... 166
9.5 Segregace ... 167
9.6 Teplota čerstvého betonu ... 167
9.6.1 Příliš studená směs: zvýšení teploty čerstvého betonu ... 168
9.6.2 Příliš teplá směs: snižování teploty čerstvého betonu ... 168
9.7 Výroba provzdušněného vysokohodnotného betonu ... 169
9.8 Konkrétní příklady ... 170
9.8.1 Výroba betonu pro stavbu mostovky Jacques-Caetier Bridge v Sherbrooke ... 170
9.8.2 Výroba vysokohodnotného betonu ze suché směsi ... 173

**10. Příprava na betonáž: co dělat, jak to dělat a kdy to dělat** ..... 174

10.1 Úvod ..... 174
10.2 Schůzka před stavbou ..... 175
10.3 Program předběžných zkoušek ..... 175
10.3.1 Program předběžných zkoušek při stavbě Bay-Adelaide Centre v Torontu ..... 176
10.3.2 Poloprovozní zkoušky ..... 176
10.4 Kontrola kvality na betonárně ..... 177
10.5 Kontrola kvality na staveništi ..... 177
10.6 Zkoušení ..... 178
10.7 Hodnocení kvality ..... 178
10.8 Závěrečné poznámky ..... 178

**11. Doprava, ukládání a kontrola vysokohodnotného betonu** ..... 179

11.1 Doprava vysokohodnotného betonu ..... 179
11.2 Konečná úprava zpracovatelnosti před ukládáním betonu ..... 179
11.3 Ukládání vysokohodnotného betonu ..... 179
11.3.1 Čerpání ..... 180
11.3.2 Vibrace ..... 181
11.3.3 Hlazení betonových ploch ..... 181
11.4 Speciální stavební metody ..... 183
11.4.1 Hřibové sloupy ..... 183
11.4.2 Postupné bednění ..... 183
11.4.3 Posuvné bednění ..... 183
11.4.4 Válcovaný vysokohodnotný beton ..... 184
11.5 Shrnutí ..... 184

**12. Ošetřování vysokohodnotného betonu s cílem snížit smrštění** ..... 185

12.1 Úvod ..... 185
12.2 Důležitost vhodného ošetřování ..... 185
12.3 Různé druhy smrštění ..... 186
12.4 Hydratační reakce a jejich důsledky ..... 186
12.4.1 Pevnost ..... 187
12.4.2 Teplo ..... 188
12.4.3 Smrštění ..... 189
12.5 Smrštění betonu ..... 192
12.5.1 Teplotní kontrakce ..... 192
12.5.2 Jak vhodným ošetřováním vysokohodnotného betonu redukovat autogenní smrštění a smrštění odpařováním a jejich účinky ..... 192
12.6 Proč je autogenní smrštění u vysokohodnotného betonu důležitější než u běžného betonu ..... 194
12.7 Je použití ošetřovacích zařízení dostatečné k minimalizaci nebo vyloučení smrštění betonu? ..... 195
12.8 Ošetřování vysokohodnotného betonu ..... 195
12.8.1 Velké sloupy ..... 196
12.8.2 Velké nosníky ..... 197

12.8.3 Malé nosníky ... 198
12.8.4 Tenké desky ... 198
12.8.5 Silná deska ... 199
12.8.6 Ostatní případy ... 199
12.9 Jak se ujistit, že beton je v praxi dostatečně ošetřován ... 199
12.10 Závěr ... 200

**13. Vlastnosti čerstvého betonu** ... 201

13.1 Úvod ... 201
13.2 Objemová hmotnost ... 202
13.3 Sednutí kužele ... 202
13.3.1 Měření ... 202
13.3.2 Faktory ovlivňující sednutí ... 203
13.3.3 Zlepšení reologie betonové směsi ... 203
13.3.4 Ztráta zpracovatelnosti ... 204
13.4 Obsah vzduchu ... 204
13.4.1 Provzdušněný vysokohodnotný beton ... 204
13.5 Zpomalení tuhnutí ... 205
13.6 Závěrečné poznámky ... 206

**14. Vzrůst teploty ve vysokohodnotném betonu** ... 207

14.1 Úvod ... 207
14.2 Srovnání přírůstku teploty v betonu pevnosti 35 MPa a ve vysokohodnotném betonu ... 208
14.3 Některé důsledky růstu teploty v betonu ... 208
14.3.1 Účinek vyšší teploty na tlakovou pevnost vysokohodnotného betonu ... 209
14.3.2 Nehomogenity růstu teploty v konstrukčním prvku z vysokohodnotného betonu ... 209
14.3.3 Účinek teplovodního gradientu, vznikajícího v důsledku ochlazování vysokohodnotného betonu ... 209
14.3.4 Účinek zvýšené teploty na mikrostrukturu betionu ... 210
14.4 Vliv různých parametrů na růst teploty ... 211
14.4.1 Vliv dávky cementu ... 211
14.4.2 Vliv teploty okolí ... 213
14.4.3 Vliv tvaru konstrukčního prvku ... 215
14.4.4 Vliv materiálu bednění ... 216
14.4.5 Současný vliv teploty čerstvého betonu a teploty okolí ... 216
14.4.6 Poznámky na závěr ... 217
14.5 Jak ovlivnit maximální teplotu dosaženou v konstrukčním prvku z vysokohodnotného betonu ... 217
14.5.1 Snížení teploty ukládaného betonu ... 218
14.5.2 Použití přísad zpomalujících tuhnutí ... 218
14.5.3 Použití minerálních příměsí ... 219
14.5.4 Použití cementu s nízkým hydratačním teplem ... 219
14.5.5 Použití horké vody a tepelně izolovaných forem nebo vyhřívaných a izolačních rohoží při zimní betonáži ... 219
14.6 Jak ovlivnit teplotní gradienty ... 220
14.7 Shrnutí ... 220

**15. Zkoušení vysokohodnotného betonu** ... 221

15.1 Úvod ... 221
15.2 Zkoušení pevnosti v tlaku ... 221
15.2.1 Vliv zkušebního zařízení ... 222
15.2.2 Vliv zkušebního postupu ... 224
15.2.3 Vliv vzorku ... 227
15.2.4 Vliv ošetřování ... 229
15.2.5 Pevnost na jádrových vývrtech a pevnost na vzorcích ... 230
15.3 Křivka napětí – deformace ... 231
15.4 Měření smršťování ... 232
15.4.1 Současná metoda ... 232
15.4.2 Vývoj smrštění v betonu s vysokým vodním součinitelem ... 233
15.4.3 Vývoj smrštění v betonu s nízkým vodním součinitelem ... 234
15.4.4 Počáteční růst hmotnosti a samovysychání ... 235
15.4.5 Nová metoda pro měření smrštění od odpařování vody ... 235
15.5 Měření dotvarování ... 236
15.5.1 Jak se vzorky ošetřují v současnosti ... 236
15.5.2 Vývoj různých deformací betonu během dotvarování ve 28 dnech ... 237
15.5.3 Deformace, které nastanou v betonu s vysokým vodním součinitelem při zatěžování mladého betonu ... 238
15.5.4 Deformace, které nastanou v betonu s nízkým vodním součinitelem při zatěžování mladého betonu ... 239
15.5.5 Doporučená metoda ošetřování betonu před měřením dotvarování ... 239
15.6 Několik poznámek k dotvarování a smrštění ... 240
15.7 Měření permeability ... 240
15.8 Měření modulu pružnosti ... 242

**16. Mechanické vlastnosti** ... 243

16.1 Úvod ... 243
16.2 Pevnost v tlaku ... 244
16.2.1 Počáteční tlaková pevnost vysokohodnotného betonu ... 244
16.2.2 Vliv maximální teploty dosažené při tvrdnutí betonu na pevnost v tlaku ... 245
16.2.3 Vliv obsahu vzduchu na tlakovou pevnost ... 245
16.2.4 Dlouhodobý vývoj pevnosti v tlaku ... 245
16.3 Pevnost v tahu ohybem a v příčném tahu ... 246
16.4 Modul pružnosti ... 247
16.4.1 Teoretické úvahy ... 248
16.4.2 Empirický přístup ... 250
16.4.3 Několik závěrečných poznámek k modulu pružnosti ... 252
16.5 Poissonova konstanta ... 253
16.6 Křivky napětí – deformace ... 253
16.7 Dotvarování a smrštění ... 255
16.8 Odolnost vysokohodnotného betonu proti únavovému namáhání ... 256
16.8.1 Úvod ... 256
16.8.2 Definici ... 258
16.8.3 Odolnost betonových konstrukcí proti porušení únavou ... 259
16.9 Závěrečné poznámky ... 260

## 17. Trvanlivost vysokohodnotného betonu ... 261


17.1 Úvod ... 261
17.2 Trvanlivost běžného betonu: předmět prvořadého zájmu ... 262
17.2.1 Trvanlivost: východisko dobrého návrhu ... 262
17.2.2 Stěžejní důležitost ukládání a ošetřování pro trvanlivost betonu ... 263
17.2.3 Důležitost „pokožky" betonu ... 264
17.2.4 Proč byly některé starší betony trvanlivější než ty současné? ... 265
17.3 Proč jsou vysokohodnotné betony trvanlivější než běžné betony ... 265
17.4 Trvanlivost na mikroskopické úrovni ... 267
17.5 Trvanlivost na makroskopické úrovni ... 267
17.6 Odolnost proti abrazi ... 268
17.6.1 Úvod ... 268
17.6.2 Faktory ovlivňující odolnost vysokohodnotného betonu proti abrazi ... 268
17.6.3 Aplikace ve vozovkách ... 269
17.6.4 Odolnost vodních staveb proti abrazi a erozi ... 270
17.6.5 Abraze ledem ... 270
17.7 Mrazuvzdornost ... 270
17.7.1 Mrazuvzdornost běžného betonu ... 270
17.7.2 Mrazuvzdornost vysokohodnotného betonu ... 271
17.7.3 Kolik zmrazovacích cyklů musí beton vydržet, abychom o něm prohlásili, že je mrazuvzdorný? ... 273
17.7.4 Osobní názor ... 274
17.8 Odolnost betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek ... 274
17.9 Odolnost proti penetraci chloridových iontů ... 275
17.10 Koroze výztuže ... 275
17.10.1 Použití nerezové výztuže ... 276
17.10.2 Použití pozinkované výztuže ... 276
17.10.3 Použití výztuže s epoxidovým nátěrem ... 277
17.10.4 Použití výztuže ze skleněných vláken ... 277
17.10.5 Účinnost zlepšení kvality krycí vrstvy ... 278
17.10.6 Poznámky na závěr ... 279
17.11 Odolnost betonu proti různým druhům chemické koroze ... 280
17.12 Odolnost vůči karbonataci ... 280
17.13 Odolnost proti působení mořské vody ... 280
17.14 Alkalicko-křemičitá reakce a vysokohodnotný beton ... 281
17.14.1 Úvod ... 281
17.14.2 Podmínky pro vznik AAR v běžném betonu ... 281
17.14.3 Superplastifikátory a AAR ... 281
17.14.4 Ochrana proti AAR ... 282
17.14.5 Extrapolace výsledků z běžného betonu na vysokohodnotný beton ... 282
17.15 Odolnost proti požáru ... 282
17.15.1 Je vysokohodnotný beton odolný proti požáru? ... 282
17.15.2 Požár v Eurotunelu ... 283
17.16 Závěry ... 284

**18. Speciální vysokohodnotné betony** ... 285

18.1 Úvod ... 285
18.2 Provzdušněný vysokohodnotný beton ... 285
18.2.1 Úvod ... 285
18.2.2 Návrh receptury pro přípravu provzdušněných vysokohodnotných betonů ... 286
18.2.3 Zlepšení reologických vlastností provzdušněných vysokohodnotných betonů ... 288
18.3 Lehčený vysokohodnotný beton ... 288
18.3.1 Úvod ... 288
18.3.2 Drobné kamenivo ... 289
18.3.3 Pojivové systémy ... 289
18.3.4 Mechanické vlastnosti ... 290
18.3.5 Příklady použití lehčeného vysokohodnotného betonu ... 291
18.3.6 Objemová hmotnost lehčeného betonu ... 292
18.3.7 Míra absorpce vody pórovitým kamenivem ... 293
18.3.8 Kolik vody má obsahovat pórovité kamenivo při záměsi? ... 293
18.3.9 Závěry ... 293
18.4 Těžký vysokohodnotný beton ... 293
18.5 Vysokohodnotný vláknobeton ... 294
18.6 Vysokohodnotný beton v ocelových trubkách ... 296
18.7 Válcovaný vysokohodnotný beton ... 297
18.8 Závěry ... 302

**19. Vysokohodnotné betony ultravysokých pevností** ... 303

19.1 Úvod ... 303
19.2 Technologie vyvinutá Brunauerem a jeho kolektivem ... 305
19.3 DSP ... 305
19.4 MDF ... 306
19.5 RPC ... 306

**20. Výhled** ... 309

20.1 Beton: nejpoužívanější konstrukční materiál ... 309
20.2 Krátkodobé trendy pro vysokohodnotný beton ... 309
20.3 Raději obchodujeme s trvanlivostí než s vysokou pevností ... 310
20.4 Dlouhodobé trendy vysokohodnotného betonu ... 310
20.5 Konkurence vysokohodnotného betonu ... 311
20.6 Směry výzkumu ... 311

**Literatura** ... 312

**Slovo překladatele** ... 320