

Navrhování konstrukcí z digitálního betonu

ověřená technologie

prosinec 2025

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav:

Ing. Milan Holý, Ph.D.
Ing. Karel Hurtig
doc. Ing. Miroslav Sýkora, Ph.D.
Ing. arch. Oto Melter
Ing. David Čítek, Ph.D.
Ing. Petr Sejkot, Ph.D.

Technická univerzita v Liberci:

Ing. Vladislav Bureš, Ph.D.

Červenka Consulting s.r.o.:

Ing. Jan Červenka, Ph.D.

 <p>KLOKNERŮV ÚSTAV ČVUT V PRAZE</p>	<p>České vysoké učení technické v Praze Kloknerův ústav</p> <p>Šolínova 7 166 08 Praha 6</p>		<p>Technická univerzita v Liberci</p> <p>Studentská 1402/2 461 17 Liberec 1</p>
	 <p>ČERVENKA CONSULTING</p>	<p>Červenka Consulting s.r.o.</p> <p>Na Hřebenkách 55, 150 00, Praha 5</p>	

T A

Č R

Tato ověřená technologie je dílčím výsledkem řešení projektu FW06010422 Simulace a navrhování konstrukcí z digitálního betonu v programu FW TREND podporovaného Technologickou agenturou ČR. Ověřená technologie byla součástí pracovního balíčku WP5 Metodika posouzení a návrhu stavebních konstrukcí z digitálního betonu.

Vývoj ověřené technologie navrhování konstrukcí z digitálního betonu zahrnoval proces návrhu cementové směsi, metodiku zkušebnictví a vyhodnocování daných zkoušek tak, aby bylo možné do výpočtů parametrizovat dílčí vstupní hodnoty jako jsou pevnosti v tlaku, tahu, modul pružnosti, ale i objemové změny a trvanlivostní parametry a jejich časový vývoj. Zároveň vytvořením procesu kontroly během tisku, zkušebnictvím a ověřováním výsledných vytištěných prvků se vytvářejí podklady pro posouzení prvků a tvorbu metodik.

Navrhování konstrukcí z digitálního betonu umožňuje inovativní přístup ke konstrukčnímu a technologickému řešení tištěných prvků a objektů. Výsledek je využíván při konzultační činnosti projektového konsorcia a je využíván při odborné činnosti výzkumných institucí při vývoji nových národních a mezinárodních norem a standardů pro navrhování konstrukcí z digitálního betonu.

V souladu s návrhem projektu je rozdělení práv k výsledku v poměru Červenka Consulting s.r.o. – 20 %, Technická univerzita v Liberci – 20 % a České vysoké učení technické v Praze – 60 %.

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

Obsah

1	OBEČNĚ	5
1.1	Úvod a motivace	5
1.2	Rozsah platnosti a použití	5
1.3	Základní specifika konstrukcí z digitálního betonu	6
1.4	Symboly a zkratky	7
1.5	Terminologie a definice	7
2	MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI	9
2.1	Úvod	9
2.2	Pevnost v tlaku (28 dní)	10
2.3	Pevnosti v tahu (28 dní)	12
2.4	Modul pružnosti (28 dní)	16
2.5	Vývoj pevnosti v čase	16
2.6	Reologické vlastnosti - smršťování a dotvarování	20
2.7	Trvanlivost	23
3	POŽADAVKY NA VÝROBU	27
3.1	Obecně	27
3.1.1	Nevyztužené prvky	27
3.1.2	Vyztužené prvky	28
3.2	Konstrukční pravidla pro navrhování prvků	29
3.2.1	Nevyztužené prvky	29
3.2.2	Vyztužené prvky	32
3.3	Zajištění kvality výroby	33
4	NAVRHOVÁNÍ A SPOLEHLIVOST	36
4.1	Zásady navrhování	36
4.2	Zatížení a kombinace	37
4.3	Stanovení charakteristické hodnoty materiálových vlastností	37
4.4	Stanovení návrhové hodnoty materiálových vlastností	38
4.5	Navrhování na základě zkoušek prvků	38
4.6	Navrhování na základě numerických metod	39
4.6.1	Obecné zásady	39
4.6.2	Zásady pro modelování 3D-tištěných betonových konstrukcí	40
4.7	Mezní stavy použitelnosti	43

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

5	LITERATURA	43
5.1	<i>Odborná literatura</i>	43
5.2	<i>Normativní dokumenty</i>	44
PŘÍLOHA A – Příklady navrhování na základě zkoušek		46
A.1	<i>Návrhová odolnost malých stěn s vlivem křehkého lokálního porušení</i>	46
A.2	<i>Návrhová odolnost malých stěn s vlivem křehkého lokálního porušení a koncování</i>	47
A.3	<i>Návrhová odolnost malých štíhlých stěn s vlivem křehkého lokálního porušení</i>	49
PŘÍLOHA B – Pevnost litého materiálu		53
PŘÍLOHA C – Monitorování průběhu zatěžovací zkoušky s využitím DIC		56
PŘÍLOHA D – Příklad tiskového protokolu		58

1 OBECNĚ

1.1 Úvod a motivace

Tato ověřená technologie vznikla s cílem vytvořit podklad pro navrhování konstrukcí z digitálního betonu v ČR. Digitální výroba betonu také běžně označována jako aditivní fabrikace betonu či 3D tisk betonu či 3DPC má specifika, která aktuálně platné normy a technické předpisy nepokrývají. Cílem je upozornit na tato specifika a zohlednit je při výrobě, návrhu a posouzení těchto konstrukcí. Ověřená technologie se opírá o víceleté zkušenosti s výrobou konstrukcí z digitálního betonu a vývojem speciální cementové směsi ve spolupráci Kloknerova ústavu ČVUT, firmy Červenka Consulting s.r.o. a TUL.

Díličí témata zahrnují proces návrhu cementové směsi (požadavky na vlastnosti cementové směsi pro nanášení extruzí), metodiku zkušebnictví a vyhodnocování zkoušek (průkazní zkoušky materiálu i vlastní výroby). Cílem je stanovení vstupních hodnot základních veličin (pevnosti v tlaku a tahu, modul pružnosti, objemové změny, materiálové vlastnosti ovlivňující trvanlivost, reologické vlastností popisující vývoj materiálových vlastností v čase) pro ověřování spolehlivosti. Důležitou součástí je nastavení kritérií pro kontrolu během tisku a vyhodnocení zkoušek materiálu a zkušebních prvků.

Kvalita prvků vyrobených aditivní fabrikací silně závisí na interakci mezi vlastnostmi materiálu, způsobem návrhu, kvalitou výrobního procesu a kontrolou provádění. Je ovlivněna způsobem výroby/tisku, rychlostí tisku, tvarem konstrukce, vyztužováním, objemovými změnami, klimatickými podmínkami atd. Tyto aspekty se mohou významně lišit v různých výrobních.

Motivací je proto zajistit navrhování a výrobu bezpečných konstrukcí se stejnou úrovní spolehlivosti jako v případě tradičních způsobů výroby. Ověřená technologie proto nově poskytuje pravidla pro:

- testování a kontrolu materiálových a geometrických vlastností vzorků k zajištění požadované kvality,
- navrhování (charakteristické hodnoty, díličí součinitele, konstrukční opatření atd.),
- spolehlivost při výrobě i v provozu.

Ověřená technologie je v souladu a s ohledem na specifika 3D tištěných betonových konstrukcí. Doplnuje Eurokódy, a to především ČSN EN 1990 pro zásady navrhování a ČSN EN 1992 pro navrhování betonových konstrukcí. Zohledňuje dosavadní výsledky výzkumu v ČR i v zahraničí.

1.2 Rozsah platnosti a použití

Tato ověřená technologie zaměřená na navrhování konstrukcí z digitálního betonu se vymezuje výhradně na aditivní fabrikaci extruzí cementového kompozitu. Pojem "digitální beton" není zcela přesný, protože se při výrobě využívá jemnozrnných cementových materiálů s kamenivem frakce běžně do 4 mm, jedná se tedy spíše o cementové malty. Materiálové charakteristiky a vztahy zde popsané vycházejí primárně z analýzy experimentů prováděných na tělesech z cementové směsi vyvinuté v Kloknerově ústavu ČVUT a vyrobených na 3D tiskárně v Kloknerově ústavu v laboratorních podmínkách (uvnitř budovy), pro jiná tisková zařízení a jiné cementové směsi nemusejí být uvedené vztahy mezi jednotlivými veličinami dostatečně výstižné, a proto je třeba je ověřit zkouškami a případně upravit dle konkrétních podmínek.

Ověřená technologie navazuje a doplňuje platné normy, především Eurokódy ČSN EN a je určena výhradně pro použití společně s těmito normami. Technologie se zaměřuje na

navrhování prvků malých rozměrů, u kterých lze materiálové vlastnosti a případně i působení celého prvku ověřit zkouškami. Protože se zatím stále jedná o inovativní technologii výroby, je třeba v případě prvků, které mají staticky působit (prvků s nosnou funkcí), vždy provést experimentální ověření.

Tato ověřená technologie doplňuje postupy a zásady, které zatím chybí v normách pro navrhování:

- návrh ICC 1150 (2025) poskytuje terminologii a některé zásady, často však bez jednoznačného propojení s konkrétním materiálem, použitou technologií a bez přímé souvislosti s geometrií tištěné konstrukce,
- ISO/ ASTM 52939 (2023) poskytuje pouze obecné zásady.

3DPC zatím zůstává mimo rozsah *fib* MC 2020 i Eurokódu 2. generace FprEN 1992 (2022).

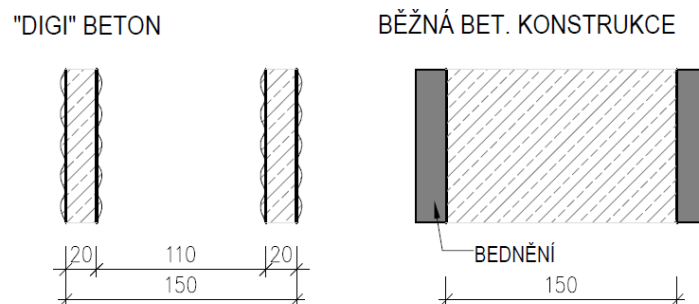
1.3 Základní specifika konstrukcí z digitálního betonu

Konstrukce vyrobené aditivní fabrikací betonu se výrazně liší od běžných betonových konstrukcí, Asprone a kol. (2022). Běžné betonové konstrukce jsou odlévané do bednění, hutněné, zatěžované až po náběhu dostatečné pevnosti, zpravidla se jedná o masivní prvky, jejichž finální tvar poměrně dobře odpovídá projektovanému.

Konstrukce z digitálního betonu jsou zpravidla prvky tvořené subtilní skořepinou vyráběné extruzí nejčastěji pomocí zařízení portálového typu či angulárních robotů. Tištěná konstrukce umožňuje optimalizaci spotřeby materiálu. Výsledný tvar konstrukce není „hladký“ (pokud není speciálně hlazen) a odlišuje se od projektované tloušťky. Jednotlivé vrstvy jsou volně nanášeny (nehutněny, bez omezení deformací v příčném směru, tvoří „bochánky“) a okamžitě zatěžovány vlastní tíhou nových vrstev.

Tento způsob výroby vyžaduje speciální požadavky na cementovou směs, která musí umožňovat extruzi, být čerpatelná a zároveň tixotropní, tj. mít schopnost držet tvar. Tisková směs je na rozdíl od běžného betonu jemnozrnná, používají se urychlovače tuhnutí a tvrdnutí, směs vykazuje proto výrazně vyšší objemové změny oproti betonům používaným pro monolitické konstrukce.

Výsledné materiálové vlastnosti jsou závislé na procesu výroby, materiál je anizotropní v závislosti na uspořádání tiskové stopy a postupu výroby. Vyztužování nelze provádět běžným způsobem jako u klasických masivních betonových konstrukcí a vyžaduje specifické přístupy.



Obr. 1-1: Rozdíl mezi vytištěnou konstrukcí a běžnou monolitickou konstrukcí.

1.4 Symboly a zkratky

X	směr podélný - rovnoběžný s tiskovou stopou
Y	směr boční - kolmý k tiskové stopě v horizontální rovině
Z	směr svislý - kolmý k tiskové stopě ve vertikální rovině
f_{cx}	pevnost v tlaku ve směru podélném s vlákny
f_{cy}	<i>tlak kolmo na tiskovou stopu v půdorysné rovině</i>
f_{cz}	<i>tlak kolmo na tiskovou stopu ve svislém směru</i>
f_{ctx}	pevnost v prostém tahu ve směru podélném s vlákny
$f_{ctx,ohyb-z}$	pevnost v tahu za ohybu ve směru podélném s vlákny, při zatěžování ze směru Z
$f_{ctx,ohyb-y}$	pevnost v tahu za ohybu ve směru podélném s vlákny, při zatěžování ze směru Y
$f_{ctx,ohyb-x}$	pevnost v tahu za ohybu ve směru z při zatěžování ze směru x
$E_{cm,x}$	modul pružnosti ve směru podélném s vlákny
$E_{cm,z}$	modul pružnosti ve směru svislém

1.5 Terminologie a definice

3D tisk bez úpravy geometrického tvaru	tisková stopa nebo skořepina s průřezem vytištěným bez úpravy tak, aby odpovídal danému tvaru, profilu nebo hladkosti, například s využitím posuvných lišt
Vlákna	rozptýlená vlákna zlepšující vlastnosti výsledného cementového materiálu, zejména pevnost v tahu a ohybu a zamezující vzniku a šíření trhlin, obecně mohou být plastová, skleněná, ocelová, kompozitní
Drátky	vlákna z oceli
Extruze	technologický proces výroby, při kterém se materiál protlačuje skrz tvarovací otvor za vzniku požadovaného tvaru prvku, tzv. tiskové stopy
Směr podélný	směr rovnoběžný s osou tiskové stopy
Směr svislý	směr kolmý na tiskovou stopu a zároveň svislý k podlaze při výrobě
Směr boční	směr kolmý na tiskovou stopu a zároveň vodorovný při výrobě
Vršek prvku	horní strana prvku vzhledem k poloze při výrobě
Spodek prvku	spodní strana prvku vzhledem k poloze při výrobě
Tisková vrstva	část prvku o výšce jedné tiskové stopy
Čas vrstvy	čas, za který byla vyrobena jedna tisková vrstva
Planární tisk	jednotlivé tiskové vrstvy jsou rovinné, vodorovné a mají konstantní tloušťku
Neplanární tisk	jednotlivé tiskové vrstvy nesplňují podmínky planárního tisku
Převis vrstev	tiskové vrstvy nejsou po výšce prvku přímo nad sebou, ale jsou půdorysně odskočeny v bočním směru
Soutisk stop	2 nebo více stop vedle sebe provázaných styčnou plochou

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

Skořepina	plocha tvořená tiskovými vrstvami, může být jednostopá nebo vícestopá, což určuje její tloušťku
Vnější skořepina	obálka průřezu prvku v půdoryse = vnější stěny průřezu prvku
Vnitřní skořepina	výplet/síťování průřezu = vnitřní stěny průřezu prvku v půdoryse
Tisková stopa	trajektorie průřezu vycházejícího z extrudéru
Průměrná šířka tiskové stopy	průměrná šířka skořepiny přepočtená z objemu pro výpočet vlastní tíhy
Efektivní šířka tiskové stopy	šířka na styku dvou tiskových stop nad sebou ("v úžlabí")
Nominální šířka tiskové stopy	maximální šířka tiskové stopy v ose stopy
Efektivní styčná plocha	svislá - styčná plocha při soutisku stop nebo vodorovná - efektivní šířka tiskové stopy u horizontálního kontaktu

2 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI

2.1 Úvod

Pro navrhování je potřebné specifikovat materiálové vlastnosti, které obvykle zahrnují:

- pevnosti v tlaku, v tahu za ohybu a v prostém tahu, modul pružnosti (případně pracovní diagram),
- vývoj pevností a modulu pružnosti v čase,
- reologické vlastnosti – smršťování a dotvarování,
- charakteristiky ovlivňující trvanlivost.

Vzhledem k rychle se rozvíjejícím materiálům a technologiím je nezbytné založit specifikaci materiálových vlastností na výsledcích zkoušek. Doporučuje se provádět zkoušky na:

- jednoduchých a snadno vyrobitelných zkušebních tělesech menších rozměrů s jednoznačným statickým působením, možností měnit parametry a sledovat změny odolnosti s ohledem na výrobní podmínky, složení materiálu včetně případného vyztužení, geometrii, technologii apod. – příkladem jsou trámečky 40×40×160 mm pro tah za ohybu nebo jednoduchý sloup pro zkoušku v tlaku

a zároveň na

- složitějších tělesech pro ověření výpočtů a simulací, výrobních nepřesností a vlivu smršťování.

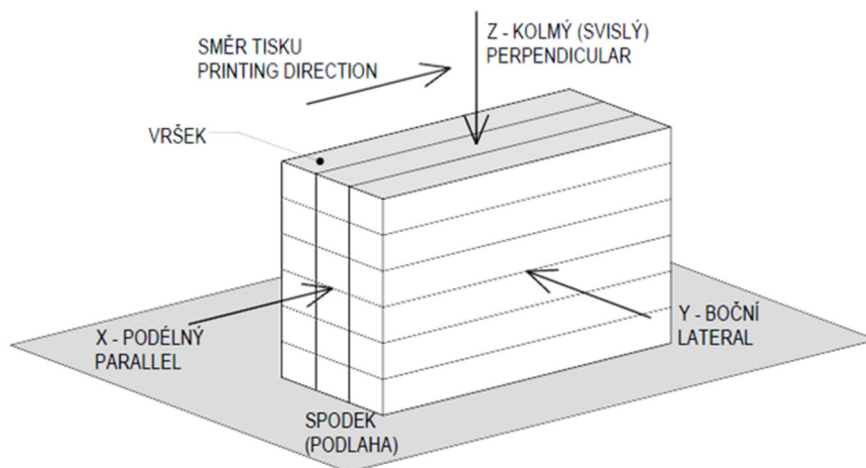
Zvláštní pozornost se doporučuje věnovat vlivu koncování – při lokálních koncentracích zatížení může dojít při zkoušce k lokálnímu křehkému porušení, které může výrazně snížit odolnost prvku, ale nemusí se jednat o výstižnou situaci s ohledem na působení prvku in-situ.

Zkušební program je nutné navrhnout s ohledem na parametry ovlivňující materiálové vlastnosti:

- složení materiálu včetně obsahu vláken, drátků a urychlovače,
- technologii:
 - směr a rychlost tisku,
 - šířka a výška stopy,
 - planární a neplanární vrstvy,
 - převisy,
 - okolní podmínky (tisk in-situ nebo v laboratoři, teplota, vlhkost),
 - požadavky na dodatečnou úpravu povrchu,
 - způsob ošetřování,
- vkládanou nebo nastřelovanou výztuž,
- směr zatěžování 3D tištěných prvků v konstrukci,
- tvar navrhované konstrukce včetně vlivu štíhlosti prvků a jednotlivých nevyztužených stěn – u štíhlých tlačných prvků a stěn, jejichž odolnost bývá ovlivněna kvalitou provedení, se doporučuje provést vyšší počet zkoušek a ověřit vliv výrobních nepřesností, excentricit při zatěžování apod.

3D tištěné prvky vykazují zpravidla ortotropní chování a často významně rozdílné mechanické vlastnosti v jednotlivých směrech. Jednotlivé vrstvy se chovají obdobně jako cementové kompozity s usměrněnými vlákny nebo drátky, vrstvy navzájem jsou však zpravidla propojeny vazbou s nižší pevností než u monolitického materiálu. Proto při zatěžování kolmo na směr vrstev je pevnost nižší a hrozí delaminace vrstev nebo porušení na rozhraní vrstev.

Obr. 2-1 ukazuje souřadnicový systém používaný v tomto dokumentu.



Obr. 2-1: Souřadnicový systém orientovaný dle směru tisku (výřez vícevrstevné skořepiny).

Materiálové charakteristiky uvedené v této kapitole jsou odvozeny na tělesech z cementové směsi vyvinuté v Kloknerově ústavu ČVUT a vyrobených na 3D tiskárně v Kloknerově ústavu v laboratorních podmínkách. Vztahují se:

- k materiálu definovanému v oddílu 1.2,
- k technologii s typickou nominální šířkou tiskové stopy 25-30 mm, typickou výškou tiskové vrstvy 10 mm, časem vrstvy v řádu sekund až po cca 1 minutu a prvům tištěným výhradně v laboratoři,
- ke způsobu ošetřování – vzorky po tisku uloženy na vzduchu o relativní vlhkosti $50 \pm 10 \%$ a teplotě $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ (pokud není uvedeno jinak pro účely porovnání).

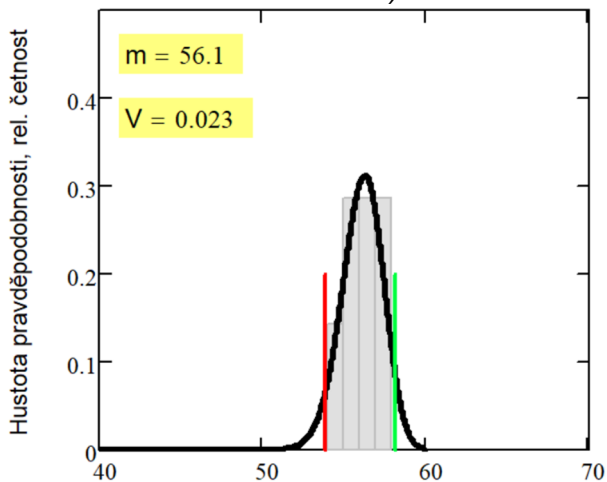
Pro použití v jiných aplikacích jsou proto průměrné hodnoty a variační koeficienty materiálových vlastností a poměry mezi nimi pouze indikativní. Pro jiná tisková zařízení, jiné cementové směsi, způsoby tisku (včetně rychlosti tisku a šířky stopy), geometrie těles, jiné podmínky při tisku a jiné ošetřování nemusejí být uvedené vztahy mezi jednotlivými veličinami dostatečně výstižné, a proto je třeba je ověřit zkouškami a případně upravit dle konkrétních podmínek. Pro tisk a ošetřování mimo laboratoř se očekává vyšší variabilita. Mohou platit odlišné poměry u pevností, předpokládají se nižší pevnosti relativně k litému materiálu.

Dosavadní výsledky zkoušek neumožňují poskytnout jednoznačná doporučení ohledně výběru vhodného pravděpodobnostního rozdělení pro pevnosti 3D tištěného materiálu. Při nedostatku dlouhodobých zkušeností se doporučuje vybrat vhodné pravděpodobnostní rozdělení na základě statistických postupů, Holický (2015). Předpokládá se, že normální nebo lognormální rozdělení mohou být vhodnými modely v obvyklých případech.

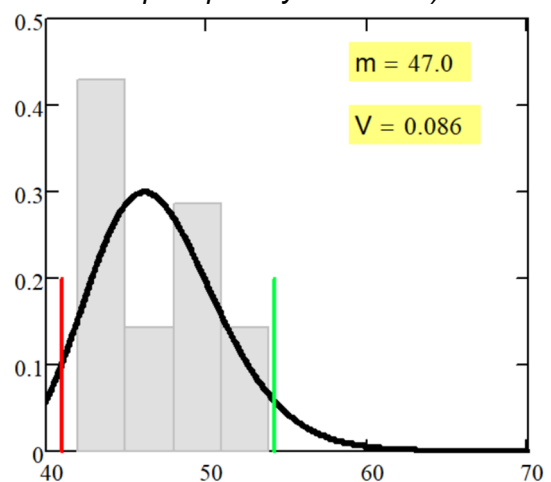
2.2 Pevnost v tlaku (28 dní)

Základní materiálovou vlastností betonu je 28denní pevnost v tlaku, a stejně je proto definována základní vlastnost tištěného cementového kompozitu. Největší pevnosti se dosahuje po směru vláken (směr x) a nejmenší při bočním zatěžování (směr y). Obr. 2-2 ukazuje histogramy, průměrné hodnoty a variační koeficienty pevností v tlaku pro různé směry zatěžování.

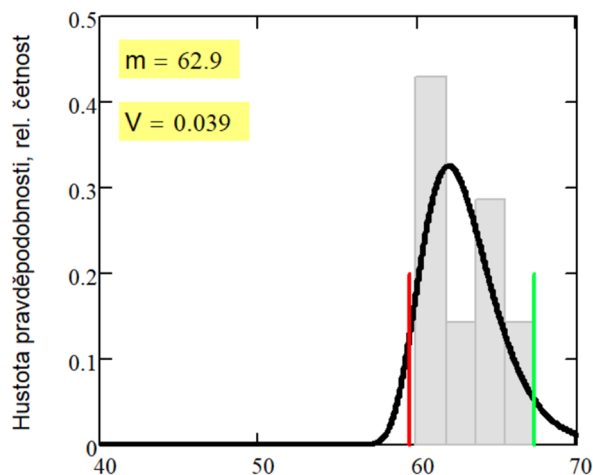
a) směr z (f_{cz} tlak kolmo na tiskovou stopu ve svislém směru)



b) směr y (f_{cy} tlak kolmo na tiskovou stopu v půdorysné rovině)



c) směr x (f_{cx} tlak ve směru rovnoběžném s tiskovou stopou)



Obr. 2-2: 28denní pevnosti v tlaku – a) f_{cz} ; b) f_{cy} ; c) f_{cx}
(vodorovná osa – pevnosti v MPa; m – průměrná hodnota, V – variační koeficient; svislé čáry: 90% konfidenční interval).

Pro průměrné hodnoty pevností v tlaku u prvků vyrobených a ošetřovaných v laboratoři platí přibližně vztah:

$$f_{cym} \approx 0,85f_{czm} < f_{czm} \approx 56 \text{ MPa} < f_{cxm} \approx 1,1f_{czm} \quad (2-1)$$

Pro průměrnou tlakovou pevnost na tištěných vzorcích v porovnání s pevností získanou na litém materiálu platí přibližně vztah:

$$f_{czm} \approx 0,8f_{cm, \text{litý}} \quad (2-2)$$

Variabilitu pevností v tlaku u těchto prvků lze přibližně charakterizovat variačními koeficienty:

$$V_{fcz} < 5 \%, V_{fcx} < 5 \%, V_{fcy} < 10 \% \quad (2-3)$$

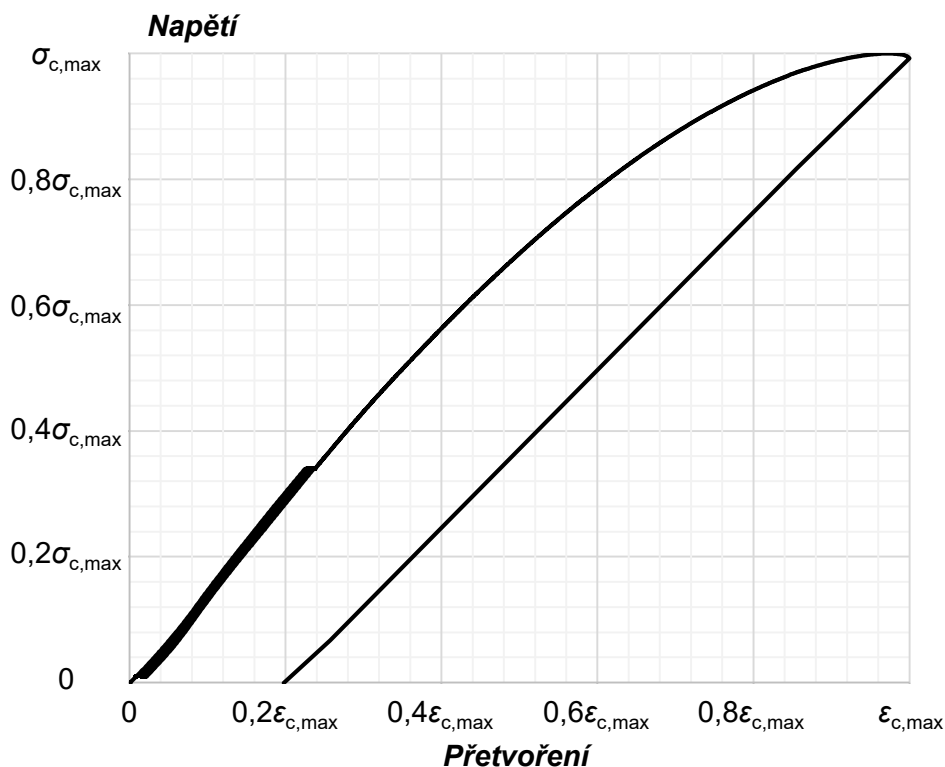
Odhady ve vztazích (2-1) až (2-3) lze použít pro předběžné hodnocení, pro podrobné hodnocení spolehlivosti je potřebné zpřesnění na základě zkoušek.

Obr. 2-2 ukazuje pevnosti pro tištěný materiál s urychlovačem - pro porovnání jsou v příloze B uvedeny pevnosti pro litý materiál.

Ošetřování významně ovlivňuje pevnost v tlaku. Pro materiál bez urychlovače dochází k poklesu pevnosti v tlaku o 10-15 % při ošetřování na vzduchu v porovnání se vzorky umístěnými ve vodě.

Významný je také vliv obsahu urychlovače – při ošetřování na vzduchu dochází u materiálu s urychlovačem k poklesu pevnosti v tlaku o přibližně 25 % oproti materiálu bez urychlovače.

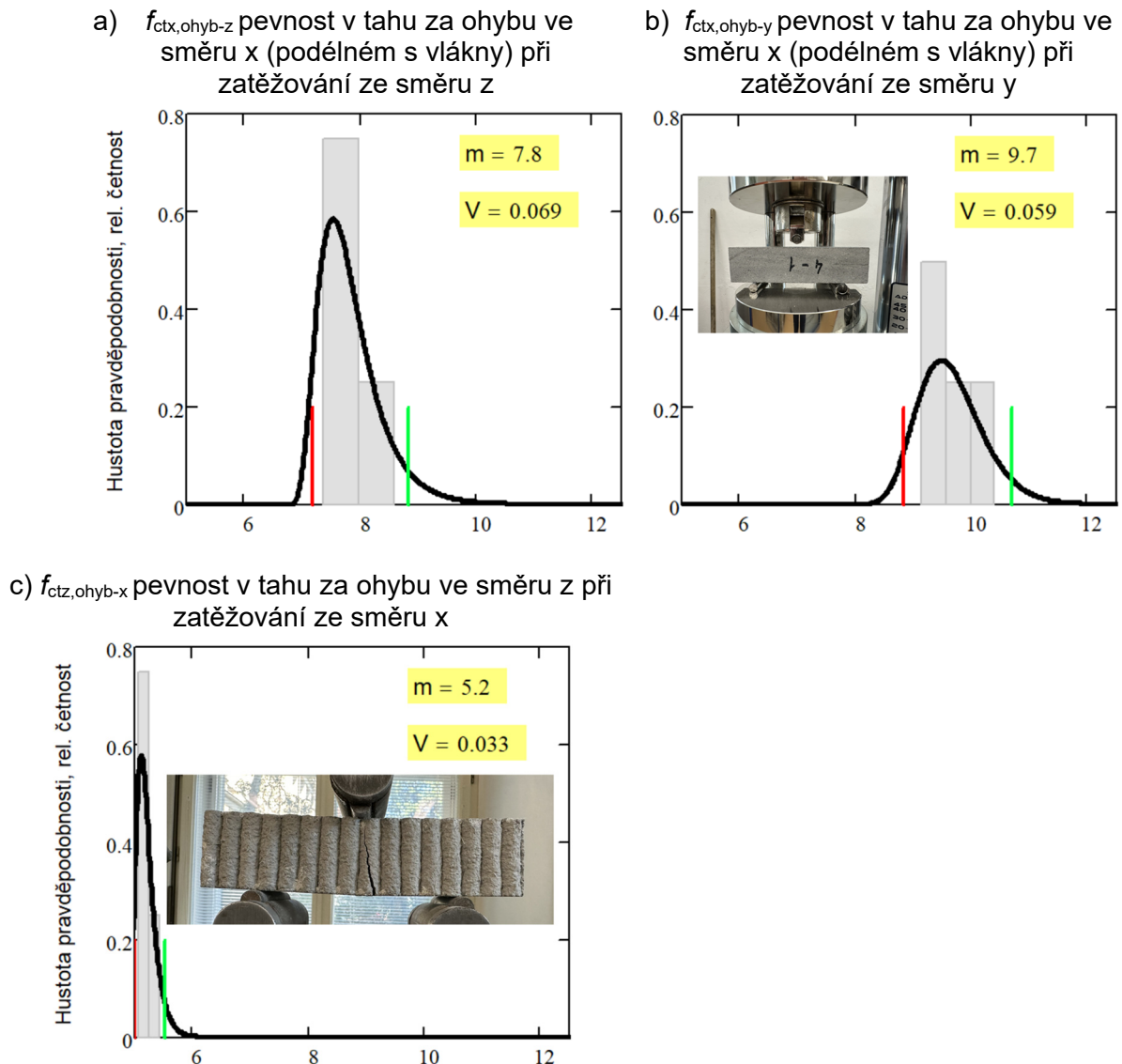
Obr. 2-3 ukazuje typický pracovní diagram zkoušky v tlaku, maximální přetvoření se pro materiál uvažovaný v této technologii (28d) pohybuje okolo 3 ‰ (sestupná větev diagramu popisuje zatěžování po porušení vzorku).



Obr. 2-3: Pracovní diagram zkoušky v tlaku.

2.3 Pevnosti v tahu (28 dní)

Pevnost v tahu za ohybu. Největší pevnosti v tahu za ohybu se dosahuje při bočním zatěžování (směr y) a nejmenší při zatěžování po směru tisku (směr x). Obr. 2-4 ukazuje histogramy, průměrné hodnoty a variační koeficienty pevností v tahu za ohybu pro různé směry zatěžování. Obr. 2-4c) dokumentuje dobrou soudržnost vrstev – k porušení tahem za ohybu došlo ve vrstvě a nikoliv v místě napojení vrstev.



Obr. 2-4: 28denní pevnosti v tahu za ohybu – a) $f_{ctx,ohyb-z}$; b) $f_{ctx,ohyb-y}$; c) $f_{ctz,ohyb-x}$ – soudržnost vrstev (vodorovná osa – pevnosti v MPa; m – průměrná hodnota, V – variační koeficient; svislé čáry: 90% konfidenční interval).

Pro průměrné pevnosti v tahu za ohybu u prvků vyrobených a ošetřovaných v laboratoři platí přibližně vztah:

$$f_{ctz,ohyb-x} \approx 0,65f_{ctx,ohyb-z,m} < f_{ctx,ohyb-z,m} \approx 7,8 \text{ MPa} \approx 0,14f_{czm} < f_{ctx,ohyb-y} \approx 1,25f_{ctx,ohyb-z,m} \quad (2-4)$$

Pro průměrnou pevnost v tahu za ohybu na tištěných vzorcích v porovnání s pevností získanou na litém materiálu platí přibližně vztah:

$$f_{ctx,ohyb-z,m} \approx 0,5f_{ct,ohyb,m,litý} \quad (2-5)$$

Variabilitu pevností v tahu za ohybu lze u těchto prvků přibližně charakterizovat variačním koeficientem:

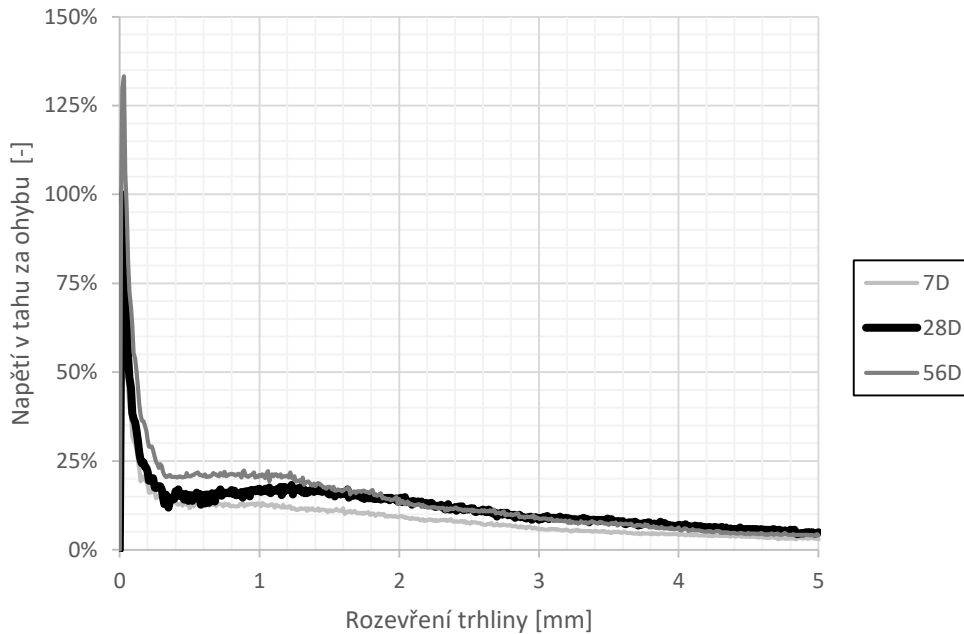
$$V_{fct,ohyb} < 10 \% \quad (2-6)$$

Odhady ve vztazích (2-4) až (2-6) lze použít pro předběžné hodnocení, pro podrobné hodnocení spolehlivosti je potřebné zpřesnění na základě zkoušek.

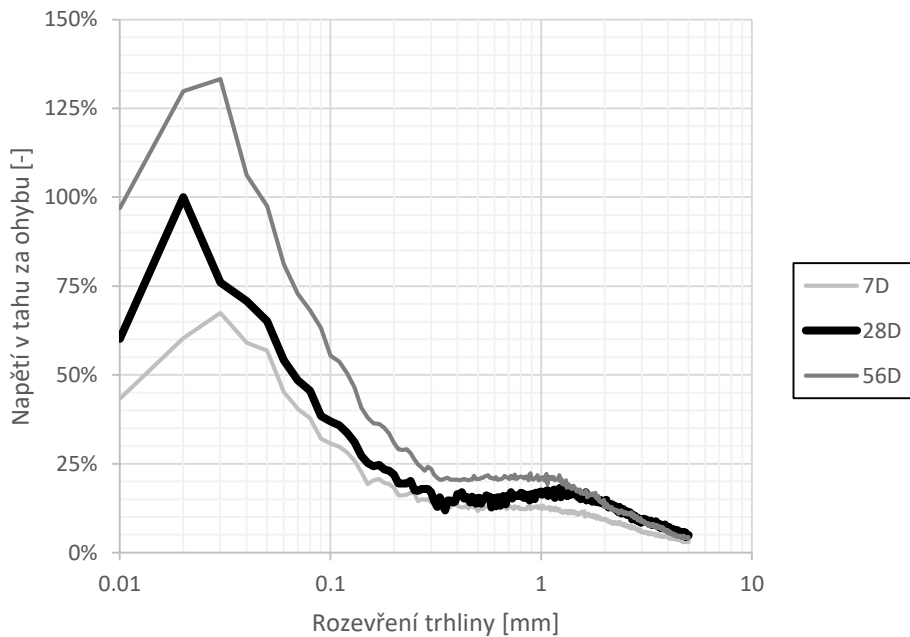
Ošetřování významně ovlivňuje pevnost v tahu za ohybu. Pro materiál bez urychlovače dochází k poklesu o 15 % při ošetřování na vzduchu v porovnání se vzorky umístěnými ve vodě. Významný je také vliv obsahu urychlovače – při ošetřování na vzduchu dochází u materiálu s urychlovačem k poklesu o přibližně 30 % oproti materiálu bez urychlovače.

Obr. 2-5 ukazuje pracovní diagram zkoušky v tahu za ohybu, příklady hodnot napětí pro různé šířky trhliny jsou uvedeny v tab. 2-1 (zkoušky byly provedeny na tělesech 100×100×400 mm s vrubem podle ČSN EN 14651+A1).

a) Napětí v tahu za ohybu relativně k maximálnímu napětí 28denní pevnosti



b) vodorovná osa v logaritmickém měřítku



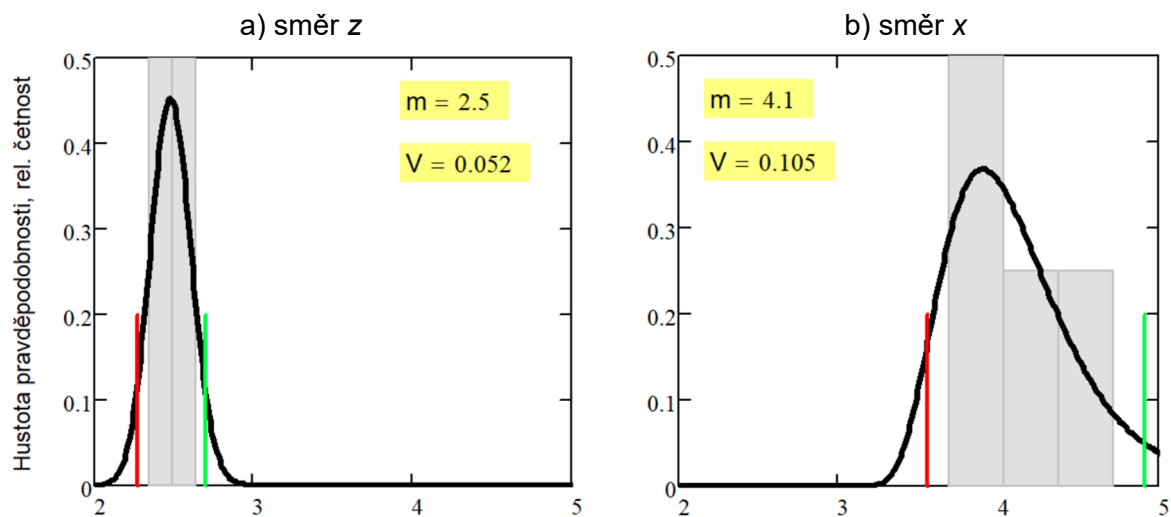
Obr. 2-5: Pracovní diagram zkoušky v tahu za ohybu.

Tab. 2-1. Pevnost betonu v tahu za ohybu – reziduální hodnoty pevnosti.

Stáří vzorku [dny]	Pevnost v tahu za ohybu při max. zatížení σ_u [MPa]	Mez úměrnosti $f_{ct,L}$ pro CMOD 0,05 mm [MPa]	Zbytkové pevnosti v tahu za ohybu při různých hodnotách rozevření trhliny CMOD [MPa]			
			$f_{R,1}$ - CMOD 0,5 mm	$f_{R,2}$ - CMOD 1,5 mm	$f_{R,3}$ - CMOD 2,5 mm	$f_{R,4}$ - CMOD 3,5 mm
7	3,69	0,57	0,12	0,11	0,07	0,05
28	5,47	0,65	0,15	0,16	0,11	0,08
56	7,29	0,97	0,21	0,18	0,11	0,07

*Crack mouth opening displacement - rozevření na čele trhliny.

Pevnost v prostém tahu. Vyšších pevností v prostém tahu se dosahuje při zatěžování po směru tisku (směr x - rovnoběžně s tiskovou stopou) oproti pevnostem při zatěžování kolmo na vrstvy (směr z - svisle kolmo k tiskové stopě). Obr. 2-6 ukazuje histogramy, průměrné hodnoty a variační koeficienty pevností v prostém tahu pro různé směry zatěžování.



Obr. 2-6: 28denní pevnosti v prostém tahu – a) f_{ctz} ; b) f_{ctx}
(vodorovná osa – pevnosti v MPa; m – průměrná hodnota, V – variační koeficient; svislé čáry: 90% konfidenční interval).

Pro průměrné pevnosti v prostém tahu u prvků vyrobených a ošetřovaných v laboratoři platí přibližně vztah:

$$f_{ctzm} \approx 2,5 \text{ MPa} \approx 0,5f_{ctz,ohyb-x}; f_{ctxm} \approx 4,1 \text{ MPa} \approx 0,5f_{ctx,ohyb-z} \quad (2-7)$$

Variabilitu pevností v prostém tahu lze u těchto prvků přibližně charakterizovat variačním koeficientem:

$$V_{fct} \approx 10 \% \quad (2-8)$$

Odhady ve vztazích (2-7) a (2-8) lze použít pro předběžné hodnocení, pro podrobné hodnocení spolehlivosti je potřebné zpřesnění na základě zkoušek. Pevnost f_{ctz} charakterizuje soudržnost vrstev s rozhodujícím vlivem technologie – u této pevnosti lze obvykle obtížně stanovit významnou závislost na jiných materiálových vlastnostech a doporučuje se ji vždy stanovit na

základě zkoušek. Ze vztahů (2-7) vyplývá, že pevnosti v prostém tahu odpovídají přibližně polovičním pevnostem v tahu za ohybu, obdobně jako u UHPC.

2.4 Modul pružnosti (28 dní)

Pro průměrné hodnoty modulu pružnosti u prvků vyrobených a ošetřovaných v laboratoři platí pro tlakové namáhání přibližně:

$$E_{cm,z} \approx 20 \text{ GPa} \approx 350f_{czm}; E_{cm,x} \approx 25 \text{ GPa} \approx 400f_{cxm} \quad (2-9)$$

V porovnání s modulem pružnosti získaným na litém materiálu platí přibližně:

$$E_{cm,z} \approx 2/3 E_{cm,litý}; E_{cm,x} \approx 0,8E_{cm,litý} \quad (2-10)$$

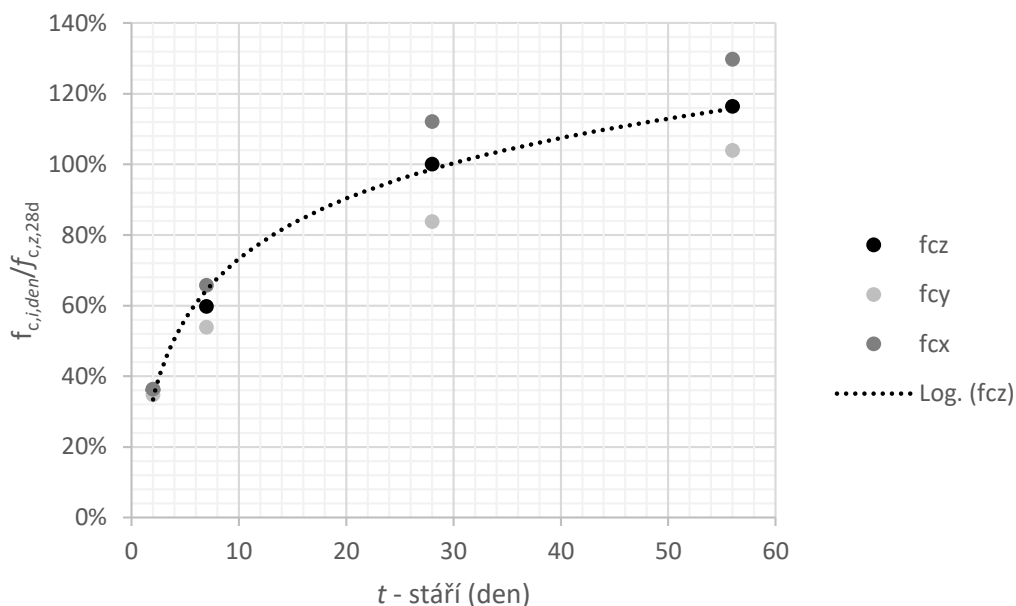
Variabilita modulu pružnosti je zanedbatelná, $V_{Ec} < 3 \%$. Modul pružnosti tištěného materiálu je tedy nižší než u litého materiálu.

Odhady ve vztazích (2-9) a (2-10) lze použít pro předběžné hodnocení, pro podrobné hodnocení spolehlivosti je potřebné zpřesnění na základě zkoušek.

Efektivní hodnotu s ohledem na účinky dotvarování lze stanovit obdobně jako pro běžný beton – viz oddíl 2.6.

2.5 Vývoj pevnosti v čase

Obr. 2-7 ukazuje vývoj pevností v tlaku v závislosti na čase ve stáří 2 až 56 dní.

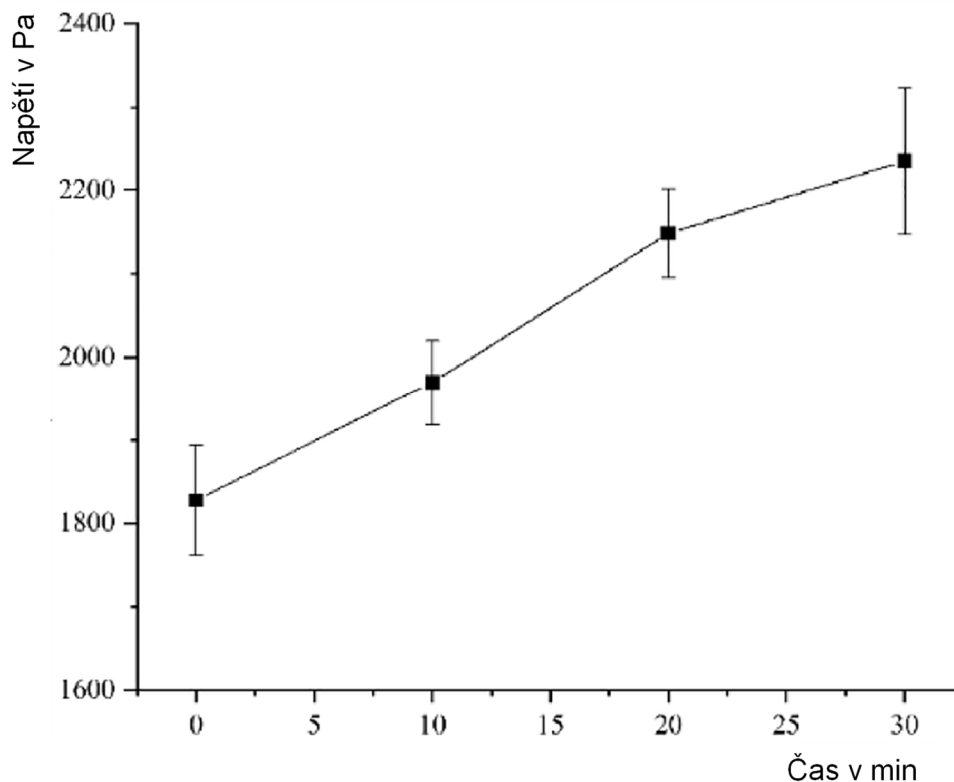


Obr. 2-7: Vývoj pevností v tlaku v závislosti na čase.

Časovou závislost pevnosti v tlaku kolmo na vrstvy lze popsat jako:

$$f_{czm}(t)/f_{czm}(28d) \approx \begin{cases} 0,167t & \text{pro } t < 2 \text{ dny} \\ 0,25 \ln(t) + 0,16 & \text{pro } t \geq 2 \text{ dny} \end{cases} \quad (2-11)$$

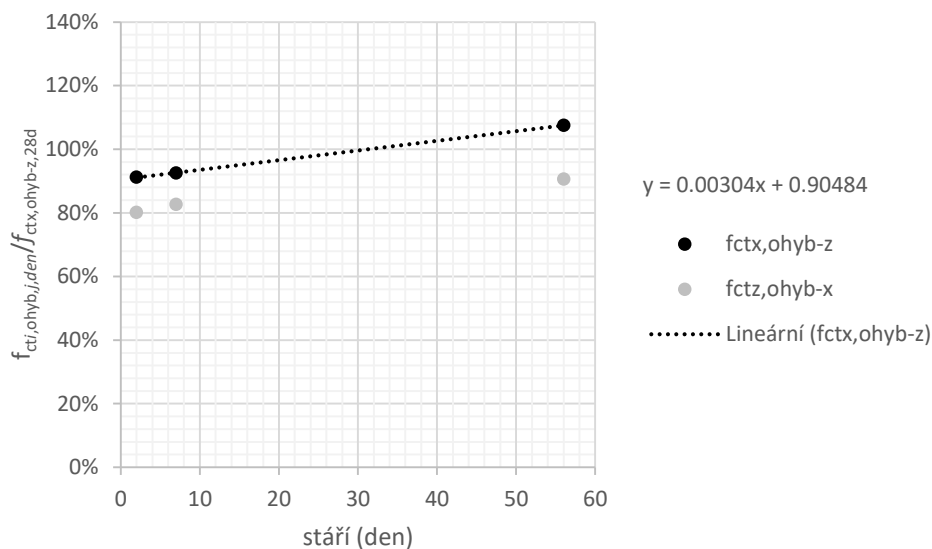
Vztah (2-11) je spíše konzervativní pro jednodenní pevnost (Sikora et al., 2025). Obr. 2-8 ukazuje vývoje rané pevnosti (Ma et al., 2022).



Obr. 2-8: Ukázka vývoje rané pevnosti (Ma et al., 2022).

Variační koeficienty u tlakových pevností $f_{c,i,den}$ lze přibližně uvažovat v rozsahu 5-10 % - vzhledem k nedostatku dat je však potřebné tyto hodnoty ověřit.

Obr. 2-9 ukazuje vývoj pevností v tahu za ohybu.



Obr. 2-9: Vývoj pevností v tahu za ohybu na čase.

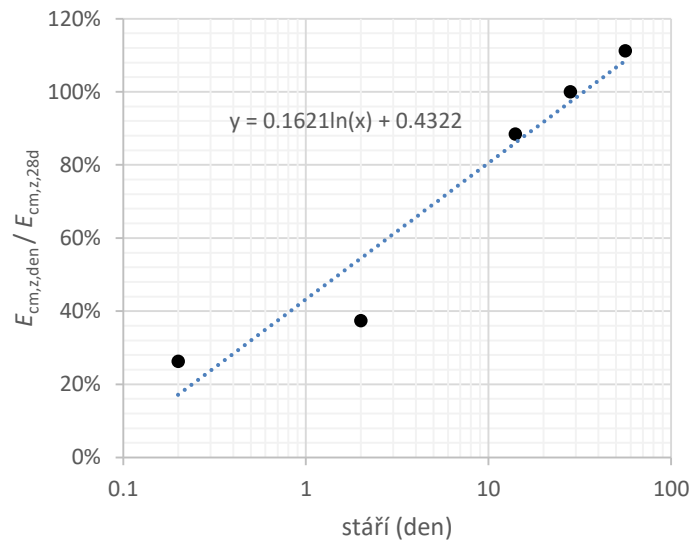
Časovou závislost pevnosti v tahu za ohybu kolmo na vrstvy lze popsat jako:

$$f_{ctx,ohyb-z,m}(t) / f_{ctx,ohyb-z,m}(28d) \approx 0,00304t + 0,905 \quad t \geq 2 \text{ dny} \quad (2-12)$$

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

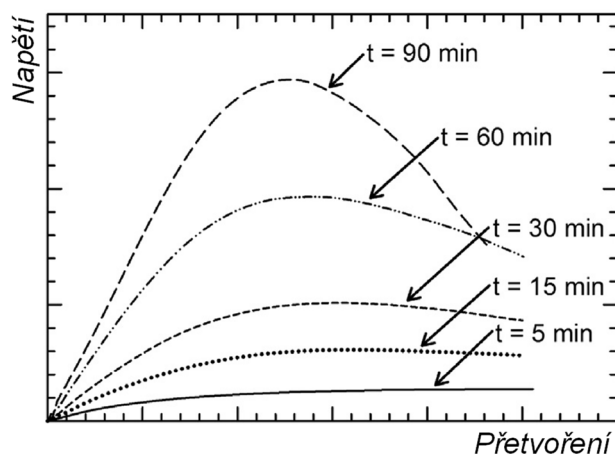
Jednodenní pevnost lze odhadnout jako 60 % dvoudenní pevnosti v tahu za ohybu (Sikora et al., 2025).

Obr. 2-10 naznačuje vývoj modul pružnosti v čase.

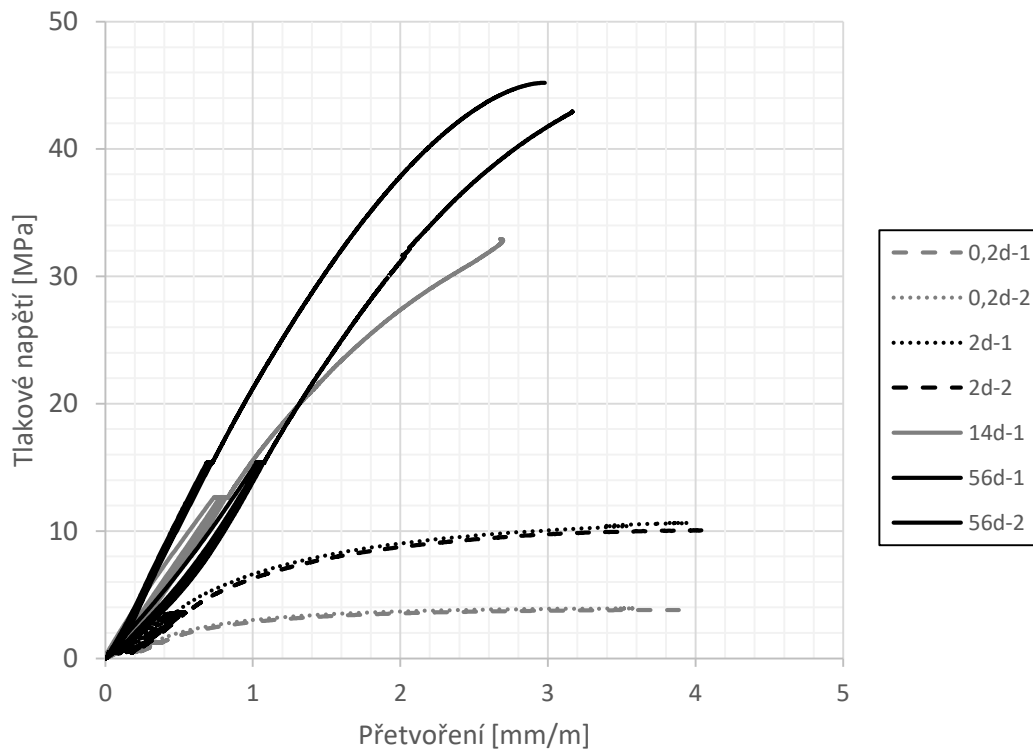


Obr. 2-10: Vývoj modul pružnosti v čase.

Obr. 2-11 a obr. 2-12 ukazují pracovní diagramy pro rané pevnosti 3DPC podle (Wolfs a kol., 2018) a pro materiál uvažovaná v této technologii.

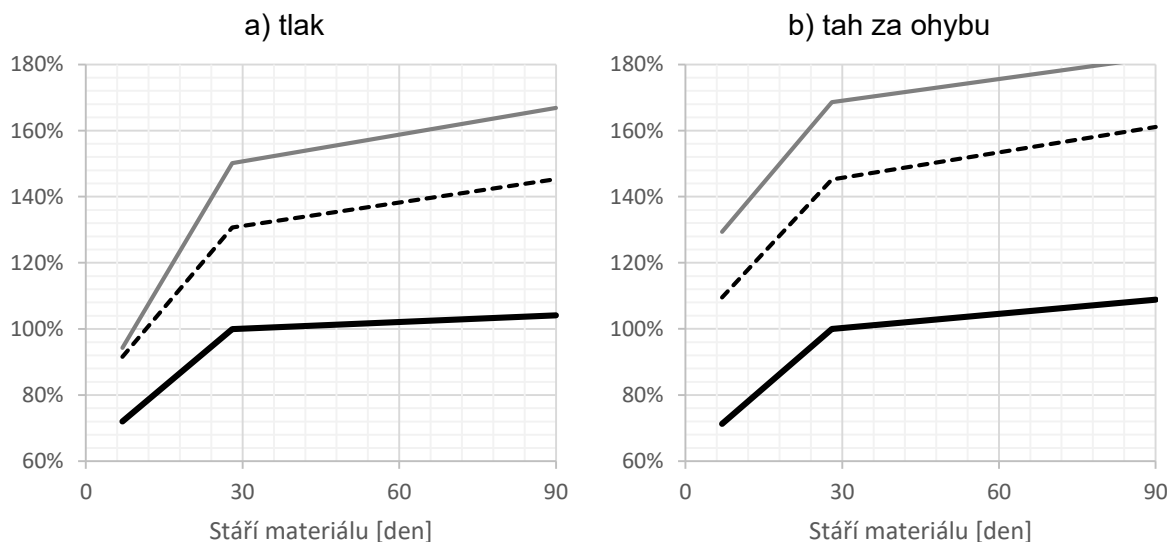


Obr. 2-11: Pracovní diagramy pro rané pevnosti 3DPC podle (Wolfs a kol., 2018).



Obr. 2-12: Pracovní diagramy pro stáří betonu 0,2 dne (~5 hodin), 2 dny, 2 týdny a 8 týdnů.

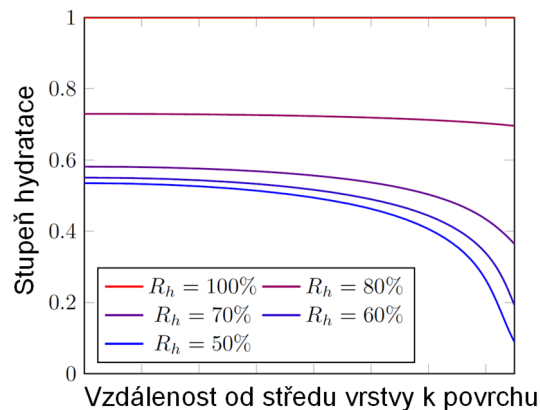
Obr. 2-13 ukazuje vliv ošetřování a urychlovače na pevnost v tlaku a v tahu za ohybu (hodnoty jsou uvedené relativně k 28denní pevnosti pro materiál s urychlovačem a ošetřovaný na vzduchu při 20 °C a relativní vlhkosti 50 %. Materiál bez urychlovače ošetřovaný za stejných podmínek dosahuje ve stáří $t \geq 28$ dnů o více než 30 % vyšší pevnosti v tlaku a o více než 45 % vyšší pevnosti v tahu za ohybu. Při ošetřování ve vodě pak vzrůstá tlaková i tahová pevnost o 15 % ($t \geq 28$ dnů). Viz také Ma et al. (2022).



Legenda: „urychlovač, 20 °C, 50 % RH“ – černá plná; „bez urychlovače, 20 °C, 50 % RH“ – černá čárkovaná; „bez urychlovače, 20 °C, voda“ – šedá plná.

Obr. 2-13: Vliv ošetřování a urychlovače na pevnost (relativně k 28denní pevnosti materiálu s urychlovačem ošetřovaným na vzduchu při 20 °C a 50 % RH).

Obr. 2-14 naznačuje vliv vzdálenosti od středu vrstvy k povrchu na stupeň hydratace, který přímo ovlivňuje pevnost materiálu (Pierre, M. a kol., 2025).



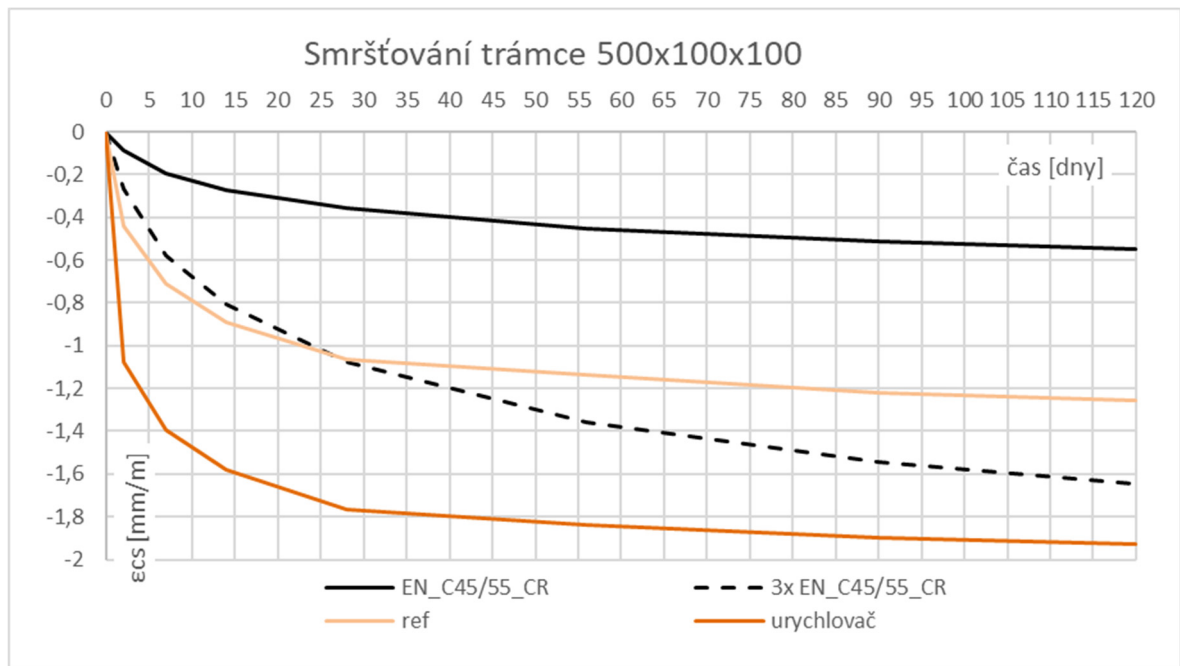
Obr. 2-14: Vliv vzdálenosti od středu vrstvy k povrchu na stupeň hydratace (Pierre, M. a kol., 2025).

2.6 Reologické vlastnosti - smršťování a dotvarování

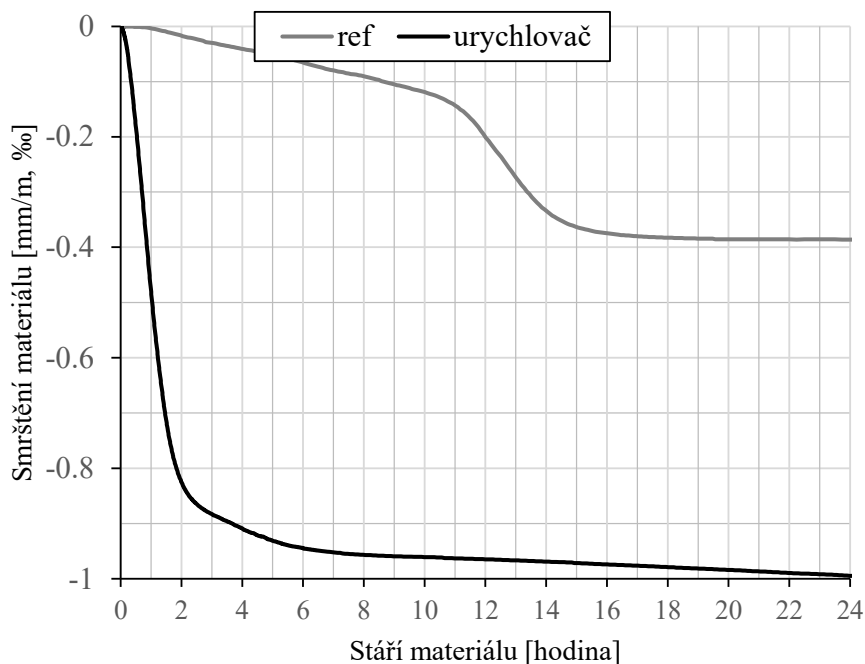
Smršťování

Smršťování je klíčovým problémem konstrukcí vyráběných aditivní technologií výroby z cementových materiálů. V případě tištěných konstrukcí se jedná často o velmi subtilní průřezy, u kterých je vývoj smršťování umocněn vlivem rychlého vysychání. Z důvodu aplikace jemnozrnné směsi a použití urychlovačů jsou navíc hodnoty smršťování i více než 3x větší oproti běžným betonům obdobných pevnostních tříd a s výrazně rychlejším náběhem.

Obr. 2-15 ukazuje celkové smršťování pro materiál s a bez urychlovače v závislosti na čase (0-120 dní) do grafu byl doplněn i předpokládaný vývoj smršťování podle nového Eurokódu FprEN 1992-1-1: 2022. Jedná se o měřené hodnoty smršťování trámů, které byly ošetřovány 1 den a následně byly uloženy v prostředí při průměrné vlhkosti 50 %. Výpočet dle EC odpovídá pevnostní třídě C45/55 s cementem s rychlým náběhem pevnosti. Pro ilustraci byly do grafu vloženy také hodnoty dle EC vynásobené 3x, z čehož je zřejmé, že nejen velikost, ale i náběh smršťování je zcela jiný.



Obr. 2-15: Průběh celkového smršťování pro materiál s a bez urychlovače.



Obr. 2-16: Průběh smršťování v prvních 24 hodinách pro materiál s urychlovačem a bez urychlovače (ref).

Samotný materiál na cementové bázi má vysokou pevnost v tlaku, ale nízkou pevnost v tahu a je velmi křehký – bez přidání drátků/vláken se chová obdobně jako keramika. V důsledku smršťování nejčastěji vznikají problémy se vznikem trhlin v období do stáří 14 dní, v některých případech je pozorován i pozdější vznik vyvolaný nejspíše kombinací vynucených namáhání od smršťování a teploty.

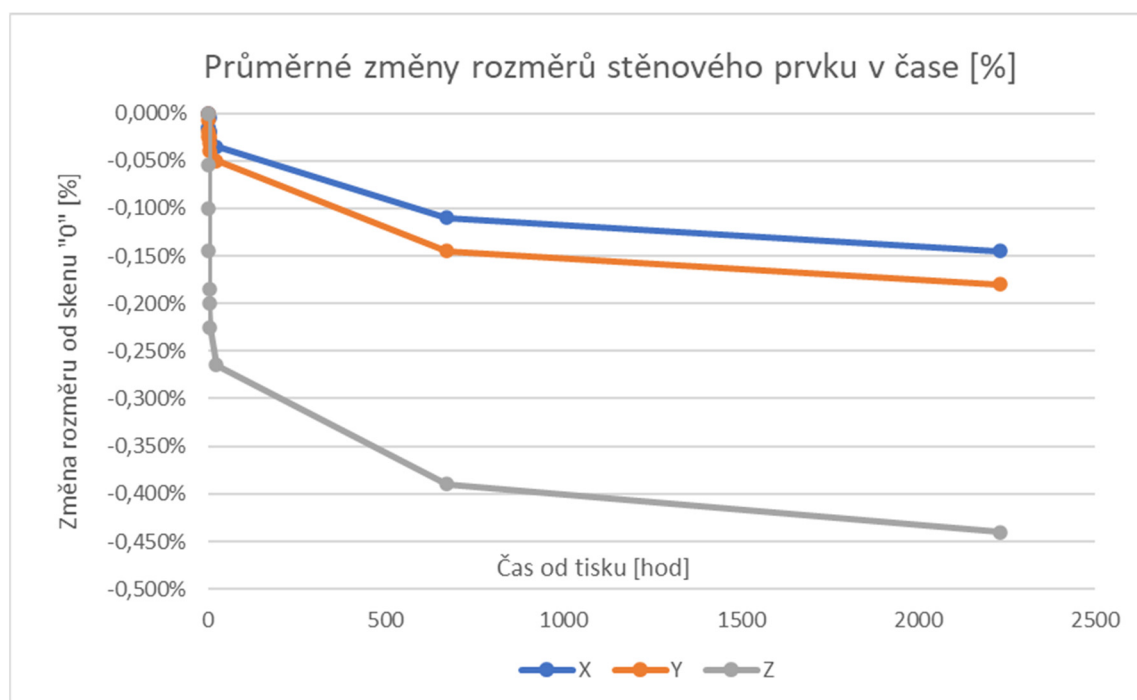
Projevy smršťování digitálního betonu lze omezit přidáním rozptýlené výztuže do směsi (např. ocelových drátků, polypropylenových nebo PVA), případně pomocí kontinuálního vyztužování ocelovým lankem. Tyto způsoby vyztužování nicméně přinášejí různé technologické problémy při výrobě. V současné době je nejúčinnější metodou vkládání běžné betonářské výztuže.

Dále lze vznik trhlin omezit vhodným tvarem průřezu, v případě malých a pravidelných půdorysných rozměrů tištěného prvku (např. sloup) zpravidla ke vzniku trhlin nedochází. Naopak např. dlouhé stěnové prvky jsou ke vzniku trhlin náchylné. V případě nevyztužených tenkostěnných nosných prvků má vznik trhlin zásadní vliv na odolnost a spolehlivost konstrukce.

Pokud smršťování prvků z cementového kompozitu vyrobených aditivní fabrikací významně ovlivňuje napjatost konstrukce, doporučuje se zabudovávat tyto prvky do konstrukce a zatěžovat nejdříve ve stáří 28 dní.

Dotvarování

Dotvarování v raných fázích od vlastní tíhy prvku nabývá velmi významných hodnot. Dotvarování od vlastní tíhy bylo měřeno pomocí skenování prvku tvaru "L" v časových intervalech 0, 20, 40 min a dále 1, 1,5, 2, 3, 22 hod a 28 a 93 dní od vytištění po stáří prvku 93 dní.



Obr. 2-17: Průběh smršťování (směry X, Y) a smršťování + dotvarování (směr Z) v prvních 93 dnech od vytištění, měřený na zkušebním prvku tvaru "L"

Jak je patrné z obr. 2-17, deformace od dotvarování v raných fázích od vlastní tíhy na zkušebním prvku tvaru "L" výšky 900 mm dosahovala několikanásobných hodnot oproti deformacím od smršťování. Většina deformace od dotvarování od vlastní tíhy proběhla během prvního dne.

Prvky z cementového kompozitu vyrobené aditivní fabrikací, které mají být nosné, se doporučuje pro omezení projevů raného dotvarování zabudovat do konstrukce a zatěžovat nejdříve ve stáří 28 dní.

Protože zatím nejsou k dispozici výsledky experimentálního měření dotvarování od vnějšího zatížení, z hlediska dotvarování pro další zatížení se dočasně doporučuje vyjít ze součinitele dotvarování podle *FprEN 1992-1-1: 2022* pro betonové konstrukce, φ :

- stanoví se hodnota součinitele φ pro prvek z běžného betonu s pevností odpovídající 3DPC,

- doporučuje se uvážit pro 3DPC zvýšení hodnoty součinitele dotvarování ϕ vzhledem k použití jemnozrnné směsi a většímu povrchu vystavenému vysychání, a to zejména v případě, že by dotvarování mohlo mít významnější vliv na statiku konstrukce,

2.7 Trvanlivost

Trvanlivost 3DPC se v důsledku technologických důvodů liší od běžného betonu:

- chybí větší frakce kameniva (směsi nanášené extruzí mají svojí zrnitostí a složením blízko k ultra-vysokohodnotným betonům UHPC),
- 3D prvky jsou složeny z vrstev a
- je nezbytná zásadní aplikace stavební chemie (zejména urychlovačů).

Struktura tištěného cementového kompozitu je oproti vysoce trvanlivému UHPC výrazně více porézní.

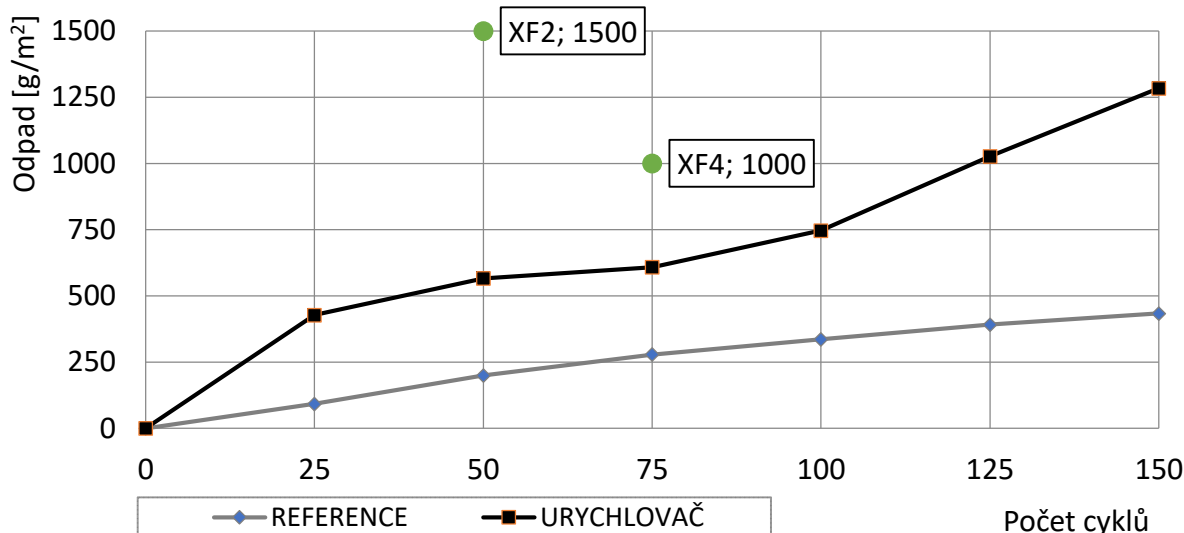
Zkoušky zaměřené na vlastnosti ovlivňující trvanlivost materiálu se provádí podle stejných metod jako u běžného betonu:

- mrazuvzdornost s vlivem chloridů podle ČSN 73 1326, metoda A nebo C s vyhodnocením podle ČSN EN 206+A2 a ČSN P 73 2404,
- mrazuvzdornost bez vlivu chloridů podle ČSN 72 2452 (malta) či ČSN 73 1322 (beton),
- urychlená zkouška karbonatace podle ČSN EN 12390-12

a případně doplňující zkouška nasákavosti podle ČSN EN 13369, příloha F a zkouška stanovení objemové hmotnosti podle ČSN EN 12390-7.

Použití urychlovače zvyšuje porozitu a nasákavost, a tím snižuje trvanlivost 3DPC. Klíčové je proto zvolit vhodný způsob ošetřování.

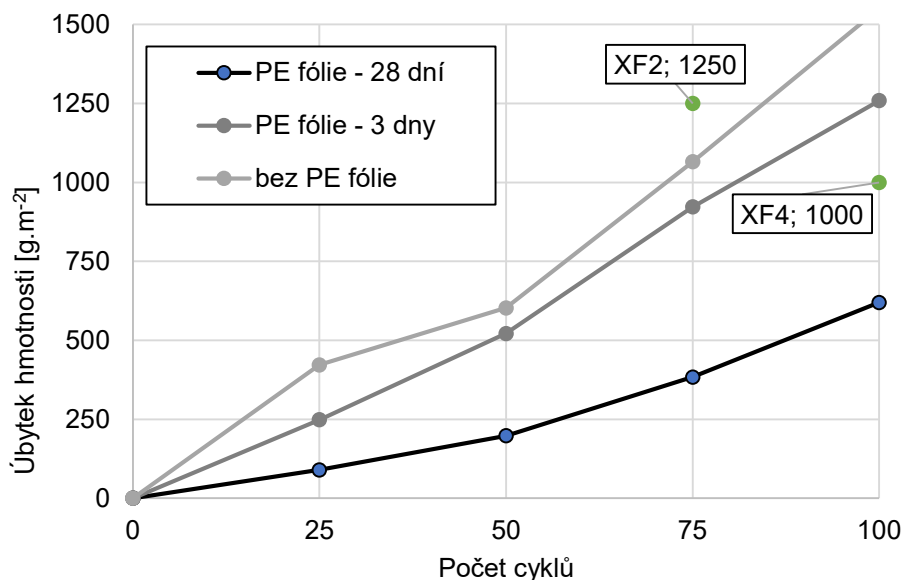
Obr. 2-18 ukazuje úbytek hmotnosti při zkoušce mrazuvzdornosti pro litý materiál podle ČSN 73 1326, metody C v závislosti na počtu cyklů a limitní hodnoty podle ČSN P 73 2404 pro kategorie prostředí XF definované v ČSN EN 206+A2. I pro agresivní prostředí XF4 je mrazuvzdornost dostatečná. Z obrázku je patrný negativní vliv urychlovače, při jehož použití urychlovače roste úbytek hmotnosti – pro 100 cyklů je přibližně dvojnásobný oproti materiálu bez urychlovače.



Obr. 2-18: Úbytek hmotnosti při zkoušce mrazuvzdornosti podle ČSN 73 1326, metody C v závislosti na počtu cyklů a limitní hodnoty pro kategorie prostředí XF.

Obr. 2-19 ukazuje úbytek hmotnosti při zkoušce mrazuvzdornosti pro různé způsoby ošetřování – prvky:

- zabalené v nepropustné fólii po dobu 28 dní,
- zabalené v nepropustné fólii po dobu 3 dní a následně ponechány bez ošetřování na vzduchu ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{RH } 55 \pm 5 \%$),
- ponechané na vzduchu ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{RH } 55 \pm 5 \%$);

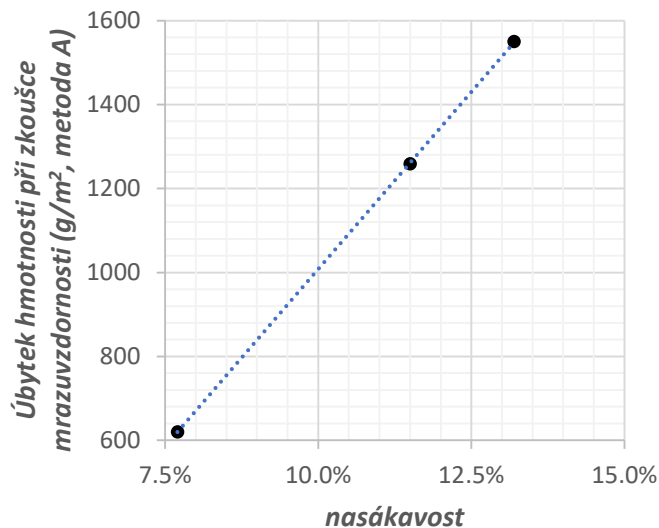


Obr. 2-19: Úbytek hmotnosti při zkoušce mrazuvzdornosti podle ČSN 73 1326, metoda A v závislosti na počtu cyklů a limitní hodnoty pro kategorie prostředí XF pro různé způsoby ošetřování.

Oproti prvkům zabaleným ve folii po 28 dní vykazují další prvky více než dvojnásobné hmotnostní úbytky. Vhodné ošetřování omezuje počáteční smršťování a rozvoj mikrotrhlin

mezi vrstvami 3DPC, a tím se omezuje vnikání vlhkosti a poškození mrazovými cykly. I přesto zůstávají spáry slabými místy, kde může docházet k rozvoji trhlin a delaminaci.

Obr. 2-20 ukazuje lineární vztah mezi úbytkem hmotnosti při zkoušce mrazuvzdornosti a nasákavostí. V případě ověření platnosti vztahu na větším počtu vzorků by bylo možné odhadovat mrazuvzdornost na základě jednodušší zkoušky nasákavosti.



Obr. 2-20: Vztah mezi úbytkem hmotnosti při zkoušce mrazuvzdornosti (metoda A) a nasákavostí.

Urychlené zkoušky karbonatace (Hurtig a kol., 2025) naznačují nízkou odolnost 3DPC proti pronikání CO₂. Ekvivalentní hloubka karbonatace v přirozených podmínkách po jednom roce byla přibližně 7 mm – v důsledku vrstevnaté skruktury pozorujeme hodnotu několikanásobně převyšující roční hloubky karbonatace pro běžné betony a řádově vyšší oproti UHPC. Obr. 2-21 řezy vytištěného prvku a hloubku karbonatace.



Obr. 2-21: Řezy vytištěného prvku a hloubku karbonatace.

Pokud se požadavky minimální tloušťku krycí vrstvy nestanoví přesněji pro konkrétní materiál, technologii, geometrii a expozici prvku, je možné uvažovat požadavky podle tab. 2-2 pro výztuž chráněnou pouze krycí vrstvou 3DPC.

Tab. 2-2. Minimální tloušťky krycí vrstvy výztuže v souladu s ICC 1150 (2025).

Podmínky	Typ výztuže	Minimální krycí vrstva v mm
Nepříznivé podmínky (např. vliv karbonatace, chloridy nebo v kontaktu se zemí)	Profil menší než 20 mm	25
Příznivé podmínky*		20

*Prvky v interiéru vystavené průměrné relativní vlhkosti $\geq 75\%$ se považují za vystavené nepříznivým podmínkám.

Vnější povrch 3DPC je obvykle bez dodatečných úprav nerovný – tvořený „bochánky“ a strukturou, na které se snadno zachycují nečistoty a koncentruje vlhkost. Tím se vytváří vhodné podmínky pro biologické napadení řasami, mechy a lišejníky (obr. 2-22), které dále přispívají ke zvyšování vlhkosti s možnými negativními dopady na rozvoj fyzikálních (mrazové cykly) nebo chemických (průnik chloridů, karbonatace) degradačních procesů. Organické kyseliny produkované těmito organismy mohou chemicky reagovat s cementovým kompozitem, což vede k povrchové erozi a snížení pevnosti. Navíc kořenové systémy mechtů a lišejníků mohou pronikat do mikrotrhlin a pórů, což dále oslabuje strukturu materiálu. Biologické napadení tedy může snižovat životnost 3DPC vystaveného působení vnějšího prostředí.



Obr. 2-22: Zasažení svislého povrchu biologickými činiteli (vlevo), detail horního povrchu dvojité stěny (vpravo).

3 POŽADAVKY NA VÝROBU

3.1 Obecně

Kvalita prvků vyrobených aditivní fabrikací silně závisí na interakci mezi vlastnostmi materiálu, návrhem, výrobním procesem, kontrolou provádění a ošetřováním. Z hlediska spolehlivosti konstrukce jsou v případě aditivní fabrikace zásadní požadavky na kvalitu výroby, mezi které lze zařadit zejména geometrické imperfekce, skutečnou tloušťku tiskové stopy, provázání jednotlivých tiskových vrstev a další odchylky výroby vzhledem k návrhu. Klíčové je definovat kontrolní procesy během výroby a výrobní tolerance s ohledem na předpoklady učiněné v návrhu a odpovídající působení nosných prvků v konstrukci.

V současnosti existuje velké množství různorodých tiskových systémů. Proto se předpokládá, že každé pracoviště může mít odlišné možnosti nastavení a podmínky při tisku. Zásadními parametry při tisku jsou výška a šířka tiskové stopy, rychlost tisku, minimální poloměry zaoblení tiskové stopy v oblouku, geometrické limity tiskárny (maximální možné rozměry ve směrech X, Y, Z) a vlastní cementová směs, u níž je zásadním parametrem stavitelnost, resp. její schopnost unést zatížení navazujících vrstev v požadovaném čase.

Dále se uvažuje 3D tisk bez úpravy geometrického tvaru (např. bez použití posuvných lišt nebo následného frézování). Stabilita a kvalita prvku během procesu výroby je ovlivněna zejména tvarem a velikostí tištěného prvku. Menší půdorysné rozměry a vyšší rychlost tisku znamenají rychlejší kladení jednotlivých tiskových vrstev na sebe, což může mít výhodu v lepším provázání vrstev mezi sebou, ale může to být naopak příčinou deformací a ztráty stability tištěného prvku při tisku.

Z hlediska tisknutelnosti je zásadní orientace tištěného dílu, kterou primárně ovlivňuje jeho celkový tvar a částečně také estetické požadavky na výslednou kresbu vrstvení na povrchu dílu. Tisknutelnost i mechanické parametry prvku jsou dány jeho orientací při tisku, kdy vlastnosti a možnosti tvarování jsou v rovině XY odlišné od vlastností v ose Z.

Orientace tiskových vrstev může ovlivnit i přesnost a velikost plochy styčných povrchů, ať už mezi jednotlivými tištěnými prvky nebo mezi tištěným prvkem a navazující konstrukcí. Je vhodné volit orientaci prvku takovou, aby zatěžované styčné plochy byly co nejpřesnější a s největší styčnou plochou pro maximálně rovnoměrný přenos sil. Cílem je zamezit koncentracím lokálních napětí, které mohou vést k poruše dílu.

Pro zajištění kvality výroby je podle ICC 1150 (2025) potřebné specifikovat a zdokumentovat:

- (1) informace o složení materiálů (technický list) a doklad o shodě s příslušnými normami,
- (2) pokyny pro dávkování, dobu míchání a technologické přestávky,
- (3) vlastnosti popisující zpracovatelnost čerstvé směsi jako sedání a obsahu vzduchu při extruzi,
- (4) vlastnosti čerstvého, ztvrdlého a trvanlivého materiálu stanovené na základě zkoušek,
- (5) vlastnosti čerstvého a ztvrdlého materiálu včetně trvanlivostních charakteristik,
- (6) záznamy o přestávkách při tisku a
- (7) způsob ošetřování.

Z hlediska návrhových přístupů je vhodné navrhované prvky rozdělit dle působení v konstrukci a vyztužení, viz dále.

3.1.1 Nevytužené prvky

Nevytužené prvky jsou nejsnadnější na automatizovanou výrobu, vyžadují nejméně náročné výrobní technologické zařízení, nicméně jsou křehké a náchylné ke vzniku smršťovacích trhlin, jejich využití se předpokládá pro nenosné či tlačené prvky vhodných průřezů.

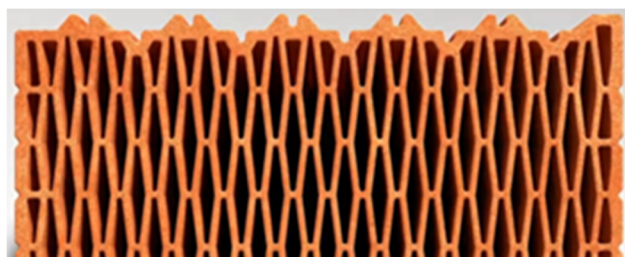
Do kategorie nevyztužených prvků lze zahrnout prvky s nízkým množstvím rozptýlené výztuže (řádově do 0,5 %). Takovéto použití rozptýlené výztuže, v případě tiskové směsi KÚ konkrétně PVA vláken, je možné považovat spíše za vylepšení vlastností tiskového materiálu. Adice vláken zvyšuje houževnatost materiálu a zmenšuje jeho náchylnost na vznik smršťovacích trhlin. Nicméně v případě použití nízkého množství rozptýlené výztuže nelze výztuž zahrnout do výpočtu.

Nenosný prvek:

- ztracené bednění, estetické aplikace
- namáhání vlastní tíhou, smršťováním, teplotou a povětrností
- v případě aplikace jako ztracené bednění namáhání tlakem čerstvého betonu během betonáže nosného prvku, nutno provést výpočet, případně navrhnout speciální opatření, aby nedošlo ke kolapsu během výstavby
- předpokládá se, že ostatní typy zatížení budou přeneseny ve finálním stavu primární nosnou konstrukcí

Nosný tlačný prvek:

- sloupy, tlačené klenbové konstrukce, stěny vhodných průřezů
- připouští se tlak kolmo na tištěné vrstvy, případně tlak za ohybu při zanedbání tahové pevnosti (posudek jako zdivo – ověření polohy výslednice sil v jádře průřezu)
- namáhání vlastní tíhou, smršťováním, teplotou a povětrností, vneseným tlakovým stálým či proměnným zatížením
- z hlediska zamezení vzniku trhlin od smršťování zcela bez výztuže vhodné pro sloupové prvky do určitého poměru stran, stěnové prvky by měly být konstrukčně vyztužené v podélném směru, aby nevznikaly (nadměrné) smršťovací trhliny a byl zajištěn přenos vnitřních sil mezi jednotlivými částmi průřezu v případě vzniku smršťovacích trhlin
- robustnost – nevyztužené prvky či konstrukce musí být navrženy tak, aby při lokálním porušení nedošlo k selhání celého prvku či konstrukce, zejména v případě stěnových prvků by mělo být využíváno ztužujících segmentů, viz například „princip vylehčené keramické tvarovky“



Obr. 3-1: Vylehčená keramická tvarovka - ztužená skořepina

3.1.2 Vyztužené prvky

Tištěné prvky lze obecně vyztužovat buď orientovanou prutovou nebo ohebnou výztuží, nebo rozptýlenou výztuží krátkými vlákny různého typu, zamíchanými přímo do betonové směsi, které ovšem musí dosahovat zastoupení minimálně v řádech jednotek procent. Všechny výše zmíněné způsoby ovšem představují výrazné zvýšení nároků na výrobu jak z hlediska technologie tisku po hardwarové i softwarové stránce, tak i způsobu návrhu a analýzy vyráběného prvku.

Otázky vyztužování tištěných konstrukcí nejsou dosud uspokojivě vyřešeny. Vkládání prutové výztuže při tisku je z hlediska technologie výroby cizí proces. Prutovou výztuž lze vkládat buď ručně do ložných spár mezi jednotlivé tiskové vrstvy nebo automaticky strojově mezi nebo napříč vrstvami.

Další možností je automatické ukládání ohebné výztuže (výztužné lanko, vlákna nekovové výztuže) upravenou tiskovou hlavou přímo při tisku. Aplikaci ohebné výztuže se věnovalo již několik výzkumů, zatím bez výrazného nasazení takovéto technologie v praxi. Je nutné prakticky a použitelně vyřešit především spolehlivou soudržnost lanka s cementovým materiálem, jeho přesné umístění a v případě kovových materiálů i ochranu proti korozi, která je z principu v úzkých tiskových stopách problematická.

Nejelegantnějším postupem z hlediska technologie tisku je vyztužování tiskové směsi rozptýlenou výztuží krátkými (kolem 10 mm) a tenkými vlákny na způsob drátkobetonu. Používání tiskové směsi s ocelovými drátky je ale náročné na dopravu tiskové směsi hadicemi i na mechanické součásti a materiál tiskové hlavy, které musí být pro směs s ocelovými drátky speciálně upraveny tak, aby nedocházelo k jejich rychlému opotřebení a k ucpávání ježky ze shluků výztužných drátků. Jednotlivé způsoby vyztužování působí často ortotropně a vyztužení je nejčastěji orientováno pouze ve směru podélném = rovnoběžném k tiskovým stopám (mimo nastřelované výztuže).

Nosný tlačенý prvek:

- Viz výše obdobně jako nevyztužené.
- Pro tento případ lze vhodně aplikovat kontinuální výztuž, která je orientována v rovině tiskových vrstev, případně betonářskou výztuž vkládaná během tisku ručně.

Nosný ohýbaný či tažený prvek:

- Vzhledem k dosavadním možnostem vyztužování při tisku se předpokládá ohyb či tah ve směru podélném s tiskovou stopou.
- Využití jako nosníky, jednosměrně pnuté desky.
- Betonářská výztuž vkládaná během tisku ručně, kontinuální výztuž (odvíjené lanko) nebo drátky v takovém obsahu a provedení, aby došlo po vzniku trhliny k tahovému zpevnění (zatím je problematický tisk s větším množstvím drátků).
- Nastřelovaná výztuž ve směru kolmém na tiskové vrstvy (zatím nebylo dostatečně odzkoušeno).
- V případě velmi namáhaných prvků je možné použít kontinuální výztuž jako třmínky a vložit druhotně zalitou výztuž ve směru kolmo na tiskové vrstvy. Jedná se o další samostatný výrobní krok, nicméně výsledkem je obousměrně vyztužený objekt. Tento způsob vyztužení bude zkoumán v navazujícím projektu.

3.2 Konstrukční pravidla pro navrhování prvků

3.2.1 Nevyztužené prvky

Stabilita při tisku. Zásadním parametrem při aditivní výrobě je stabilita během tisku, což do značné míry určuje tisknutelné tvary a jejich orientaci v tiskovém prostoru. V zásadě se jedná o tři možné způsoby poruchy:

- lokální zhroucení jednotlivých tištěných vrstev vlivem jejich nedostatečné únosnosti převážně z hlediska rychlosti tuhnutí, velkého převisu nebo obojí,

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

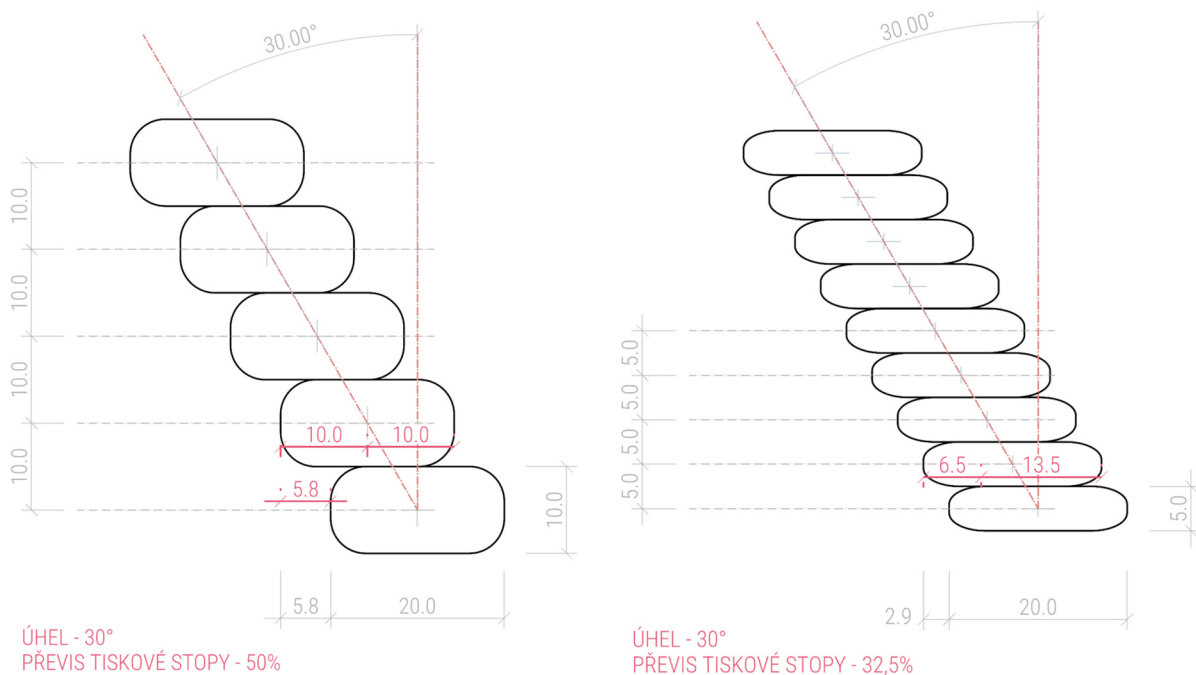
- rozlomení objektu v „tuhé“ části vlivem vzniku tahových napětí v konstrukci – například při tisku převislé nebo šikmé části, jejíž hmotnost nejsou schopny okolní vrstvy s teprve nabíhající pevností přenést do zbytku objektu,
- převážení objektu vlivem nevhodné orientace, kdy se během tisku dostane těžiště postupně mimo půdorysnou stopu objektu.

Vertikální extruze. Základním typem jsou prvky složené z vertikálních stěn obecného tvaru. Jedná se o případ, který je při výrobě ovlivněn v zásadě pouze rychlostí tuhnutí tiskového materiálu a rychlostí nárůstu dalších vrstev, tzv. času vrstvy.

Převislé tvary. V případě převislých prvků nejsou jednotlivé tiskové vrstvy pokládány přímo na sebe, což při jejich zaobleném tvaru vyvoluje na každé další vrstvě deformaci tekutého naneseného materiálu po povrchu předchozí vrstvy. Zároveň na předchozí vrstvy v začátku jejich tuhnutí působí asymetrická síla, která se je snaží vybočit. V rámci tvarování prvku pak obdobné síly působí na napojení mezi převislou částí a zbytkem objektu.

Pro úspěšný tisk převisu je nutné zajistit, aby těžiště převislé části bylo stále udržené nad částí, která již mechanicky dokáže udržet jeho hmotnost. Zlepšení schopnosti tisknout převisy je možné ovlivnit několika faktory:

- snížením výšky vrstvy při zachování šířky extruze
- snížením rychlosti tisku – zvýšením času vrstvy
- zvýšením dávky urychlující složky na úkor výsledných mechanických vlastností materiálu
- je výhodné použít dvě obvodové extruze (dvojitou stěnu) – dojde tak efektivně ke snížení poměru výšky vrstvy k její celkové šířce, tím pádem posunutí těžiště měkčích částí nad tuhé, zvýšení podepírající plochy a prodloužení času na vrstvu, což zahrnuje všechny faktory pozitivně ovlivňující schopnost tisknutí převisu



Obr. 3-2: Převisy

Konstrukční zásady pro omezení vlivu smršťování. Zásadní pro omezení vlivu smršťování je kompaktní tvar průřezu a správné provázání vrstev.

Provázání jednotlivých vrstev nad sebou. Nesmí dojít k překročení času vrstvy, kdy je již předchozí vrstva tuhá a nedojde k dostatečnému propojení navazujících vrstev.

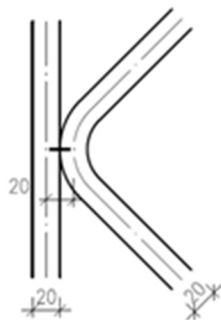
Provázání jednotlivých vrstev vedle sebe (soutisk). Při použití kruhové trysky dochází k zakulacení vnější viditelné stěny extruze. Toto příčné tvarování má několik dopadů a popsané následujícími parametry:

- nominální šířka - maximální vnější rozměr použitý pro návrh a koordinaci s ostatními konstrukcemi
- efektivní šířka - minimální vnější rozměr – uvažovaný pro statické výpočty
- průměrná šířka – rozměr pro výpočet vlastní tíhy tištěného objektu

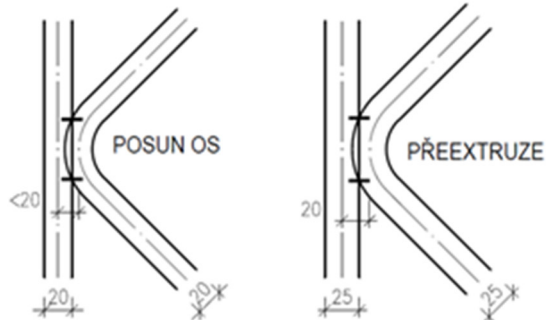
Pro soutisk několika rovnoběžných extruzí obvodové stěny nebo napojení výplně a obvodové stěny musíme uvažovat přesah extruzí tak, aby došlo k jejich dostatečnému a spolehlivému propojení.

DETAIL NAPOJENÍ

ŠPATNĚ PROVÁZANÉ VRSTVY



SPRÁVNĚ PROVÁZANÉ VRSTVY



Obr. 3-3: Soutisk a napojení extruzí



Obr. 3-4: Nedostatečné provázání při soutisku vrstev po zatěžovací zkoušce

3.2.2 Vyztužené prvky

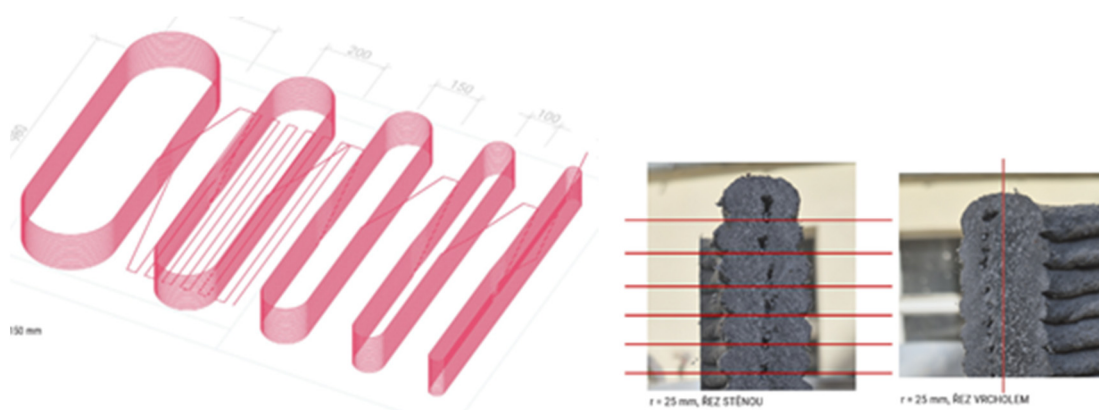
Protikorozní ochrana výztuže. Pro zajištění dostatečné ochrany výztuže proti korozi by měla být krycí vrstva výztuže vyšší než v případě monolitických konstrukcí, a to z důvodu rychlejšího postupu karbonatice na styku vrstev. Vzhledem k subtilním částem průřezu není ve většině případů reálné takové krycí vrstvy dosáhnout a doporučuje se proto aplikace nekorodující výztuže nebo vhodná PKO úprava výztuže (např. Helifix, kompozitní prutová výztuž, nerezové nebo kompozitní lanko).

Prutová výztuž:

- Při použití prutové výztuže je nutné dbát především na proveditelnost během samotného tisku. Pro vyztužení prutovou výztuží jsou preferovány rovné, případně jednoduše lomené úseky.
- Vyztužování organicky tvarovaných prvků je omezeně proveditelné, velmi ale záleží na přesnosti přípravy (tvarování) prutové výztuže do shodného tvaru s tenkou tištěnou stěnou a také plánovaném využití výztuže. Toto je však pracné a časově náročné řešení.
- V případě zakřiveného tvaru průřezu a zakřivené výztuže obalené pouze krycí vrstvou se výztuž při vyšším tahovém využití bude snažit narovnat a odštěpit tak krycí vrstvu, lze ji tedy využít pouze jako konstrukční a nikoliv nosnou.
- Je nutné umožnit, aby bylo možné výztuž při tisku fyzicky umístit do tištěné stopy – u komplikovaných nebo velmi malých tvarů může nastat kolize s pohybující se tryskou tiskové hlavy. Nabízí se tisk během vkládání výztuže pozastavit, což se ukázalo jako možné, avšak krajně nepraktické řešení. Pozastavení tisku způsobuje jak estetické, tak mechanické odchylky a poruchy v místě přerušování a opětovného začátku extruze.

Ohebná výztuž:

- Vhodná pro vyztužení organicky tvarovaných prvků. Velkou výhodou je automatické vkládání přímo do extrudované tiskové stopy, které eliminuje pohyb osob kolem tištěného prvku a riziko chyb během ukládání výztuže.
- V případě zakřiveného tvaru průřezu a zakřivené výztuže obalené pouze krycí vrstvou se výztuž při vyšším tahovém využití bude snažit narovnat a odštěpit tak krycí vrstvu, lze ji tedy využít pouze jako konstrukční a nikoliv nosnou.
- Obecně je při kontinuální extruzi ohebné výztuže nutné dbát na minimální poloměr jejího ohybu. Při jeho překročení pak dochází k vybočení výztuže mimo navrženou polohu, což může mít za důsledek výrazné snížení krycí vrstvy nebo úplné vybočení mimo průřez stěny. Omezené zkušenosti naznačují, že minimální poloměr ohybu 25 mm pro nerezové ocelové lanko o průměru 1 mm se zdá být hraniční použitelná hodnota.



Obr. 3-5: Tisková dráha pro test nového modulu zatiskávání kontinuální výztuže a problémy se soudržností a dutinami při tisku v obloucích

Soudržnost výztuže:

- Soudržnost klasické prutové výztuže testované během výzkumu KÚ se jeví jako dostatečná a při zatížení vyztužených nosníků až do porušení došlo k přetržení výztuže bez jejího vytažení z tištěného objektu což znamená její dobré využití a funkčnost.
- Ohebná výztuž je z hlediska soudržnosti mnohem problematictější. Do hry vstupuje v první řadě způsob jejího ukládání a tok materiálu kolem výztuže. Tiskový materiál je z principu v porovnání s klasickým betonem velmi tixotropní, což má za následek vznik dutin kolem výztužného lanka. Během výzkumu KÚ proběhlo několik měření objektů se zatištěnou ohebnou nerezovou výztuží, kde se prokázal pozitivní vliv takto provedené výztuže, nicméně byl z velké části eliminován již zmíněnými dutinami a také malým styčným povrchem. Obojí výrazně snižuje soudržnost a vyřešení tohoto problému je prvním krokem nutným ke spolehlivému nasazení v praktických aplikacích.

3.3 Zajištění kvality výroby

Při tisku objektů je vhodné provádět záznam základních parametrů do tiskového protokolu. Tiskový protokol je důležitý pro zpětnou analýzu tištěných prvků a může pomoci odhalit příčiny v případě vzniku poruch či jiných problémů. Tiskový protokol zahrnuje základní parametry geometrické, materiálové i záznam případných nestandardních událostí během tisku.

Doporučený obsah tiskového protokolu:

Průvodní informace

- Projekt
- Datum
- Objekt
- Zpracovatel gcodu
- Operátoři výroby

Data - příloha

- Zadání
- Zdrojový soubor
- Gcode
- Miniatura tiskové dráhy
- Výkresová dokumentace
- Záznam tisku (foto, video)

Parametry prostředí

- Teplota prostředí (°C)
- Teplota materiálu na výstupu (°C)
- Vlhkost (% rel. vlhk.)

Parametry systému

- Tiskárna
- Tiskový systém

Parametry objektu

- Rozměry objektu (mm)
- Váha objektu
- Tiskový materiál
- Objem tiskového materiálu
- Urychlující složka
- Objem urychlující složky
- Dávkování urychlující složky
 - % objemově k tiskovému materiálu
- Vyztužení
 - typ rozptýlené výztuže
 - dávkování
 - popis vložené výztuže, výkresová dokumentace vyztužení

Parametry tisku

- Čas tisku (h, min)
- Délka dráhy (m)
- Rychlost (mm/s)
- Výška vrstvy (mm)

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

- Nominální šířka extruze (mm)
- Efektivní šířka extruze (mm)
- Nominální průřez extruze (a:b)
 - poměr stran průřezu extruze (šířka : výška)
- Tryska (mm)
 - průměr trysky
- Čas vrstvy (s)

Popis tisku

- “Podle očekávání “
- Popis závad - “Zhroucení na vrstvě X v oblasti Y”

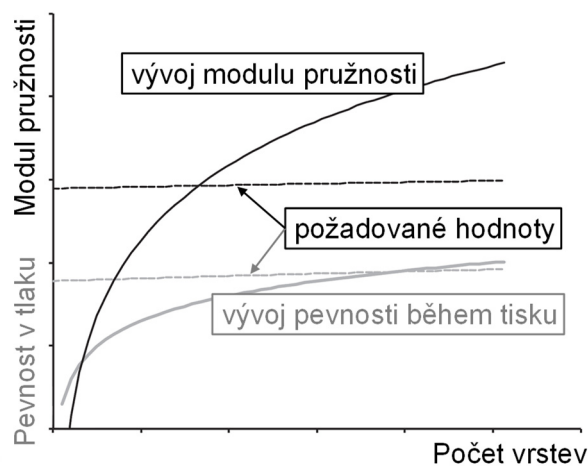
Příloha D uvádí příklad tiskového protokolu.

4 NAVRHOVÁNÍ A SPOLEHLIVOST

4.1 Zásady navrhování

Chování konstrukcí vyráběných aditivní fabrikací cementových kompozitů je v některých ohledech specifické a při návrhu je nutno tyto odlišnosti zohlednit. Z hlediska zásad navrhování se postupuje v souladu s platnými ČSN EN a ČSN (především pak ČSN EN 1990, ČSN EN 1991 a ČSN EN 1992), přičemž se uváží následující doporučení pro navrhování prvků z 3DPC.

Návrh s ohledem na spolehlivost při tisku. S ohledem na vývoj materiálových vlastností v čase (oddíl 2.5) je potřebné navrhnout materiál i technologii tak, aby nedošlo k porušení konstrukce během tisku a po něm, kdy materiál má nízké pevnosti a modul pružnosti. Obr. 4-1 (Roussel, 2018) naznačuje princip stanovení požadavků na materiálové vlastnosti při tisku v závislosti na počtu tiskových vrstev. V závislosti na materiálu, technologii a času vrstvy může o maximálním přípustném počtu vrstev rozhodnout limit z hlediska pevnosti nebo deformace.



Obr. 4-1: Požadavky na pevnost v tlaku a modul pružnosti při tisku v závislosti na počtu tiskových vrstev.

V běžných případech tisku pro malá tělesa v laboratorních podmínkách se předpokládá, že spolehlivost při tisku není třeba výpočetně ověřovat, budou-li dodržována konstrukční doporučení uvedená v kapitole 3. Pro analýzu spolehlivosti během výroby tělesa je nutno znát vývoj pevností a modulu pružnosti v prvních sekundách až minutách po tisku. Je nutno aplikovat výpočetní model s náběhem raných mechanických vlastností v čase, tzn. model s nehomogenními materiálovými vlastnostmi jednotlivých vrstev s fázemi výstavby.

Návrh s ohledem na únosnost a použitelnost během návrhové životnosti. Při navrhování se vychází z postupů uvedených v ČSN EN 1990 a ČSN EN 1992-1-1, přičemž je třeba zohlednit specifika 3DPC konstrukcí; viz další ustanovení v této kapitole.

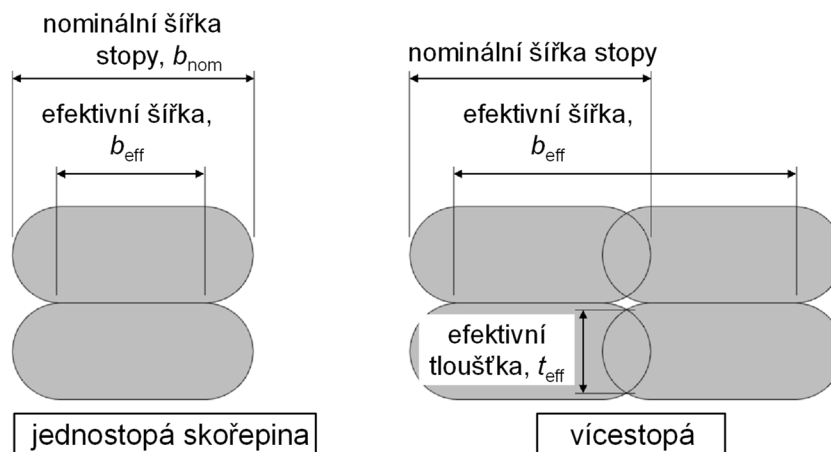
Rozměry pro výpočet

Pro posouzení je třeba uvažovat efektivní geometrické rozměry průřezů, efektivní šířka a tloušťka na kontaktu vrstev, b_{eff} a t_{eff} . Pokud se efektivní šířka a tloušťka na kontaktu vrstev, b_{eff} a t_{eff} , nestanoví z měření, podle ICC 1150 (2025) lze uvažovat (viz také obr. 4-2):

- efektivní tloušťku jako 70 % nominální tloušťky, $t_{\text{eff}} \approx 0,7t_{\text{nom}}$,
- efektivní šířku jako:
 - 70 % nominální šířky pro jednostopou skořepinu, $b_{\text{eff}} \approx 0,7b_{\text{nom}}$,
 - hodnotu b_{eff} stanovenou podle následujícího vztahu pro vícestopé skořepiny:

$$b_{\text{eff}} \approx 0,7[0,7 + 0,85(n - 1)]b_{\text{nom}} \quad (4-1)$$

kde n je počet stop ve vrstvě skořepiny. Při návrhu se uvažují efektivní průřezové charakteristiky (např. plocha nebo průřezový modul) určené z efektivních hodnot b_{eff} a t_{eff} .



Obr. 4-2: Efektivní šířka b_{eff} a tloušťka t_{eff} na kontaktu vrstev (ICC 1150, 2025).

4.2 Zatížení a kombinace

Při stanovení účinků zatížení včetně kombinací zatížení se postupuje podle ČSN EN 1990 a ČSN EN 1991.

Při stanovení zatížení od vlastní tíhy se vychází ze skutečné hmotnosti 3DPC prvku/konstrukce. Vychází se z průměrných geometrických rozměrů a přihlídně se ke skutečně použitému množství materiálu.

4.3 Stanovení charakteristické hodnoty materiálových vlastností

Při absenci dlouhodobých zkušeností se charakteristická hodnota pevností materiálu stanoví jako odhad 5% dolního kvantilu na základě zkoušek podle ČSN EN 1990, přílohy D. Na základě výsledků zkoušek se zvolí vhodné pravděpodobnostní rozdělení.

Poznámka: předpokládá se, že normální nebo lognormální rozdělení jsou vhodnými modely pro pevnosti 3D tištěného betonu.

Pokud je to relevantní, zohlední se v souladu s ČSN EN 1992-1-1 dlouhodobé účinky na pevnost v tlaku a nepříznivé účinky vyplývající ze způsobu zatěžování. Pro hodnotu součinitele α_{cc} pro 3DPC nejsou k dispozici ověřená data. V porovnání s UHPC se předpokládá pro 3DPC:

- $\alpha_{\text{cc}} < 0,85$ pro dlouhodobé nebo opakované zatížení,
- $\alpha_{\text{cc}} < 0,95$ pro krátkodobé zatížení.

U modulu pružnosti se uvažuje průměrná hodnota.

4.4 Stanovení návrhové hodnoty materiálových vlastností

Odolnost 3D tištěného betonového prvku R se získá ze vztahu:

$$R = \theta_R R_{\text{model}}(f_{c,i}, geo_j) \quad (4-2)$$

kde R_{model} značí model odolnosti, θ_R je nejistota modelu odolnosti a $f_{c,i}$ a geo_j jsou hodnoty materiálových a geometrických vlastností (a případně dalších veličin).

Charakteristická hodnota odolnosti se stanoví z modelu odolnosti na základě charakteristických hodnot materiálových a geometrických vlastností, $R_k = R_{\text{model}}(f_{ck,i}, geo_{k,j})$.

V souladu se zásadami ČSN EN 1990, FprEN 1992-1-1:2022, ČSN 73 0038 a *fib* Model Code 2020 lze dílčí součinitel odolnosti γ_C (dílčí součinitel materiálu zahrnující modelovou nejistotu, variabilitu geometrických veličin a případně další vlivy) stanovit ze vztahu:

$$\gamma_C = R_k / R_d \quad (4-3)$$

R_d je návrhová hodnota odolnosti stanovená jako dolní kvantil pravděpodobnostního rozdělení odolnosti podle vztahu (4-2), s uvážením náhodných vlastností modelové nejistoty a materiálových a geometrických veličin. Pravděpodobnost definující dolní kvantil je podle ČSN EN 1990, přílohy C:

$$P(R \leq R_d) = p_d = \Phi(-\alpha_R \beta) \quad (4-4)$$

kde Φ značí kumulativní distribuční funkci normovaného normálního rozdělení, α_R je součinitel citlivosti pro hlavní veličinu odolnosti (doporučená hodnota 0,8 pro obvyklé případy) a β je směrný index spolehlivosti (3,8 pro střední třídu následků a 50letou referenční dobu), viz ČSN EN 1990. S uvážením doporučených hodnot získáme:

$$p_d = \Phi(-0,8 \times 3,8) = 0,0012 \quad (4-5)$$

Lognormální rozdělení je obvykle vhodné pro popis odolnosti prvků. Průměrná hodnota se odhadne na základě průměrných hodnot modelové nejistoty, materiálových a geometrických vlastností, $R_m = \mu_{\theta R} \times R_{\text{model}}(f_{cm,i}, geo_{m,j})$. Variační koeficient odolnosti se za předpokladu lineárního vztahu mezi materiálovými a geometrickými vlastnosti stanoví jako (příklad pro jednu pevnost f_c a jednu geometrickou veličinu geo):

$$V_R = \sqrt{(V_{f_c}^2 + V_{geo}^2 + V_{\theta R}^2)} \quad (4-6)$$

kde V_X značí variační koeficient základní veličiny X .

Návrhová hodnota se stanoví ze vztahu:

$$R_d = R_m \times \exp(-\alpha_R \beta V_R) \quad (4-7)$$

Při absenci dlouhodobých zkušeností se průměrné hodnoty základních veličin X_m a variační koeficienty V_X pro 3D tištěné betonové prvky stanoví na základě zkoušek.

Při omezeném počtu statistických dat je především u základních veličin s vyšším variačním koeficientem potřebné přihlídnout ke statistické nejistotě. Pro normálně a lognormálně rozdělené veličiny lze využít Studentovo t -rozdělení, viz Holický (2015).

Poznámka: zjednodušený postup a příklady aplikací jsou uvedeny v příloze A.

4.5 Navrhování na základě zkoušek prvků

Pokud nejsou dostatečné informace pro postup podle oddílu 4.3 nebo existují pochybnosti, může se návrh opírat o vyhodnocení zkoušek prvků podle ČSN EN 1990, oddíl 5.2 a příloha D.

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

Poznámka: tato situace může nastat například, pokud nejsou k dispozici odpovídající výpočetní modely, pokud se má použít velké množství podobných prvků a je účelné zpřesnit informace pro návrh, nebo je potřebné potvrdit návrhové předpoklady.

Uváží se vliv testové nejistoty zahrnující nejistotu metody a nejistotu při provádění zkušebních vzorků.

V souladu s ČSN ISO 2394, příloha C se při stanovení návrhové hodnoty na základě zkoušek prvků zohlední rozdíly mezi podmínkami při laboratorním testování a působením prvků v konstrukci. Podle konkrétní situace se zohlední vlivy:

- velikosti,
- časově závislých jevů, jako jsou dotvarování a smršťování,
- okrajových podmínek včetně podepření, přenosu zatížení nebo interakce s dalšími prvky,
- okolního prostředí včetně vlivů vlhkosti, teploty nebo degradačních mechanismů,
- odlišného provádění a ošetřování.

Tyto rozdíly se mohou zohlednit jako dodatečná testová nejistota, jejíž charakteristiky by měly být stanoveny experimentální nebo teoretickou analýzou. V případě chybějících informací je zpravidla nezbytné učinit odhady na základě zkušeností s podobnými situacemi.

Vzhledem k nedostatku informací o variabilitě materiálových vlastností, vlivu technologie, vlivu vyztužení i působení prvků in-situ se u nosných prvků doporučuje vždy experimentální ověření.

4.6 Navrhování na základě numerických metod

4.6.1 Obecné zásady

Pokročilé numerické modely jsou schopny zachytit specifické charakteristiky konstrukcí vyráběných aditivní fabrikací včetně specifik tiskového procesu, a představují proto efektivní nástroj pro odhad únosnosti těchto konstrukcí. Nelineární FEM modely umožňují komplexní hodnocení strukturální integrity prvků z 3D tištěného betonu (3DPC) od raného stáří až po vyzrálý stav. Eurokódy druhé generace obsahují metodiku pro nelineární simulace pro hodnocení spolehlivosti betonových konstrukcí. Uvedený postup lze přiměřeně využít pro simulaci chování konstrukcí vyrobených aditivní fabrikací.

Postupuje se podle obecných zásad uvedených v FprEN 1992-1-1: 2022, a to především podle přílohy F, a podle přílohy X EN 1990: 2023.

Software používaný pro nelineární ověřování mezního stavu únosnosti by měl být validován porovnáním numerických výsledků s výsledky experimentálními nebo referenčními (benchmarkovými); viz čl. X.8 v EN 1990:2023. Obdobně by měly být volby týkající se konkrétního numerického modelu ověřeny pomocí analýzy citlivosti. To zahrnuje obecné validační postupy (základní materiálové zkoušky a zkoušky konstrukcí s charakterizací relevantních poruchových mechanismů) i postupy specifické pro danou konstrukci (testy citlivosti na velikost sítě a testy použité metody řešení).

Obecné zásady pro navrhování na základě numerických metod poskytuje článek X.6 v EN 1990:2023, který se zaměřuje na:

- volbu numerického modelu,
- modely pro různé materiály,
- modely geometrických veličin včetně diskretizace modelu,
- modely zatížení a jejich kombinací a postup zatěžování modelu konstrukce,

- okrajové podmínky,
- modely kontaktů.

4.6.2 Zásady pro modelování 3D-tištěných betonových konstrukcí

Návrh založený na nelineární FEM analýze by měl adekvátně postihovat chování konstrukce z 3D tištěného betonu (3DCP) jak v raném, tak i ve vyztuženém stádiu. Podle (Rymeš a kol., 2024) by analýza měla vycházet z časově závislého materiálového modelu, který umožňuje simulovat změnu charakteru materiálu od čerstvé pasty až po ztvrdlý beton.

Proces tisku betonu je zpočátku simulován postupnou aktivací konečných prvků podél trajektorie tisku a je ověřována stabilita konstrukce během výstavby. Oslabené vazby mezi jednotlivými tištěnými vrstvami lze v modelu zachytit pomocí "interface" prvků na rozhraní vrstev. V případě směsí z vláknobetonu jsou mikrovlákná přítomna pouze v rámci jednotlivé tištěné vrstvy a nepřemostují rozhraní mezi dvěma vrstvami. Spojení jednotlivých tištěných vrstev tak představuje potenciální slabé místo tištěného prvku a tento efekt by měl být modelem odpovídajícím způsobem zachycen.

Model by měl zohledňovat deformace vznikající v raném stádiu, které často ovlivňují chování konstrukce ve vyztuženém stavu. Geometrické imperfekce mohou vznikat buď nepřesným ukládáním tiskové pasty, nebo deformací konstrukce. Během tisku je nutné brát v úvahu, že vlastní tíha horních vrstev zatěžuje neztvrdlé spodní vrstvy, jejichž mechanické vlastnosti jsou řízeny viskózním a tixotropním chováním čerstvé pasty. Nadměrné deformace během výroby mohou později významně ovlivnit mechanické chování konstrukce ve vyztuženém stádiu.

Pro tyto analýzy by měl časově závislý materiálový model umožňovat úpravu materiálových parametrů v průběhu výpočtu, a tím simulovat tuhnutí čerstvé pasty. Tvrdnutí materiálu lze popsat vazbou na probíhající hydratační proces a pevnost betonu v tlaku, z níž lze dále odvodit zbývající materiálové parametry potřebné pro FEM analýzu (Rymeš a kol., 2023).

Při simulacích aditivní výroby může každý zatěžovací krok reprezentovat konkrétní časový okamžik během výstavby. Doba výstavby může odpovídat skutečnému času, kdy je daná část konstrukce vytištěna, a lze ji určit z trajektorie a rychlosti tiskové trysky.

Během tisku je třeba zohlednit, že aplikované vnější napětí narušuje vazby mezi částicemi v pastě, což umožňuje její ukládání. Po vytištění se tyto vazby znovu vytvářejí, čímž dochází ke zvýšení meze kluzu. Na tuto fázi navazuje fáze strukturace, kdy materiál začíná tuhnout. Následné tvrdnutí pasty je pak řízeno hydratačním procesem, jehož modelování je obdobné zrání konvenčního betonu. Pokud použitý materiálový model zachycuje proměnlivý charakter materiálu od čerstvé pasty až po ztvrdlý beton, může jediná analýza pokrýt celý životní cyklus 3DCP prvku.

Deformace vzniklé během tisku vstupují do simulace zatěžovací zkoušky jako počáteční imperfekce a jsou tak ve výpočtu zohledněny. Prokázání schopnosti FEM modelu reprodukovat skutečné mechanické chování se doporučuje doložit porovnáním křivek zatížení–posun a poruchových mechanismů získaných z analýzy a experimentu.

Při odhadu únosnosti vyztužené konstrukce může být nutné kriticky analyzovat citlivost výsledků modelu na předpoklady týkající se vazeb mezi tištěnými vrstvami a imperfekcí a může být vyžadována validace pomocí zkoušek v reálném měřítku.

Obecně lze požadavky a postup dle FprEN 1992-1-1: 2022 upravit a doplnit pro modelování 3DCP konstrukcí do následujících kroků:

1. **Validace numerického modelu.** Tato fáze představuje obecnou validaci numerického modelu, respektive softwaru – prokazuje se, zda je schopen postihnout hlavní mechanické

a fyzikální chování analyzované konstrukce. V případě modelování aditivní výroby betonových konstrukcí se jedná především o následující jevy:

- vliv zrání materiálu na vývoj mechanických vlastností zejména: modul pružnosti, tlaková a tahová pevnost, smršťování a vývoj plastických přetvoření;
- vliv teploty a vlhkosti během výrobního procesu na vývoj mechanických vlastností materiálu;
- chování modelu při tlakovém, tahovém a smykovém namáhání a porušení;
- vliv rozdílných mechanických vlastností materiálu při zatížení ve směru tisku, kolmo na směr tisku v rovině tištěné konstrukce a na kolmo na tuto rovinu;
- zohlednění vlivu postupné výroby konstrukce na její stabilitu během tisku i ve výsledném stavu;
- vliv aditivní výroby a zrání materiálu na vývoj celkových deformací konstrukce během výstavby během následných účinků stálých a nahodilých zatížení.

Validace je obecně nezávislá na konkrétním projektu a je možné i provést pouze jednou a získané zkušenosti využít při více projektech, kdy lze očekávat obdobné mechanické chování, okrajové podmínky, způsoby zatížení, porušení a typ použitého materiálu.

2. **Verifikace výpočtového modelu.** Jedná se o studii senzitivity zvoleného výpočtového modelu pro spolehlivou simulaci posuzované konstrukce nebo konstrukčního prvku. Tyto studie by měly zahrnovat:

- citlivostní analýzu vlivu velikosti sítě konečných prvků při použití metody konečných prvků;
- studii vlivu materiálových parametrů, zejména těch, u kterých lze předpokládat vysokou míru nejistoty;
- studii vlivu dalších výpočtových parametrů v použité numerické metodě např. vliv velikosti časového kroku, nastavení konvergenčních charakteristik u iteračních metod apod.

3. **Hodnocení spolehlivosti konstrukce** lze rozdělit na dva případy:

- a. posouzení stability během 3D tisku: cílem posouzení je ověřit pravděpodobnost kolapsu konstrukce během aditivní výroby, která může nastat například kvůli velkému sklonu stěn konstrukce, příliš velké rychlosti tisku nebo nedostatečné rychlosti zrání materiálu a pomalému nárůstu pevnosti nebo tuhosti. V tomto případě je možné postupovat analogicky jako v případě 3b) s tím, že se doporučuje využít metodu dílčích součinitelů. Zatížení, které se v této fázi na konstrukci aplikuje, je zejména vlastní tíha, která se při postupném modelování musí aplikovat přenásobením odpovídajícím součinitelem zatížení i modelové nejistoty γ_{Rd} .
- b. posouzení únosnosti konstrukce pro mezní stavy během životnosti konstrukce: v tomto případě se postupuje dle ČSN EN 1990 a obvyklé podmínky spolehlivosti:

$$E_d \leq R_d \quad (4-8)$$

kde E_d představuje návrhovou hodnotu účinků zatížení s využitím odpovídající kombinace zatížení, dílčích součinitelů zatížení a kombinačních součinitelů. R_d je návrhová hodnota odolnosti. Zatímco při standardním návrhu se podmínka spolehlivosti (4-8) ověřuje v kritických řezech konstrukce, při posouzení s využitím nelineární simulace se jedná o globální posouzení odolnosti celé konstrukce, její části nebo posuzovaného konstrukčního prvku. V tomto případě je intuitivnější nerovnici (4-8) upravit vydělením návrhovou hodnotou E_d :

$$1 \leq R_d / E_d = r_d(E_d) \quad (4-9)$$

kde $r_d(E_d)$ je maximální násobek návrhové úrovně zatížení E_d , které je konstrukce schopna přenést bez porušení z hlediska pevnosti nebo ztráty stability.

Při výpočtu odolnosti nelineární simulací je numerický model postupně zatěžován na úroveň zatížení E_d . Poté se úroveň nepříznivě působících zatížení postupně zvyšuje až do porušení. Pro stanovení mezní úrovně zatížení je vhodné zohlednit požadavky kapitol 2 a 3 ČSN EN 1992-1-1 včetně limitních hodnot pracovních diagramů betonu a výztužných prvků.

Pro stanovení odolnosti numerickou simulací doporučuje příloha F (Annex F) FprEN 1992-1-1: 2022 dvě alternativní metody:

- **metodu dílčích součinitelů:**

V souladu s touto metodou se návrhová odolnost stanoví ze vztahu:

$$R_d = R\{X_d, a_d\} / \gamma_{Rd} \quad (4-10)$$

a vztah (4-9) lze v tom případě vyjádřit jako:

$$1 \leq r_d(E_d) / \gamma_{Rd} \quad (4-11)$$

kde:

- X_d představuje návrhové parametry materiálů, které jsou upraveny dílčími součiniteli materiálu před jejich použitím v numerické simulaci,
- a_d jsou návrhové hodnoty geometrických vlastností (rozměry, imperfekce apod.) a
- γ_{Rd} je dílčí součinitel modelové nejistoty, který je určen v souladu s oddílem F.7 FprEN 1992-1-1: 2022.

- **metodu globálního součinitele spolehlivosti (GFM – Global factor method)**

V této metodě je návrhová odolnost vypočtena ze vztahu:

$$R_d = R_m\{X_m, a_{rep}\} / (\gamma_R^* \gamma_{Rd}) \quad (4-12)$$

Analogicky k případu metody dílčích součinitelů—vztah (4-11)—lze rovnici (4-9) opět vyjádřit ve tvaru:

$$1 \leq r_m(E_d) / (\gamma_R^* \gamma_{Rd}) \quad (4-13)$$

kde:

- X_m představuje střední (průměrné) hodnoty materiálových parametrů použité numerické simulaci,
- a_{rep} jsou reprezentativní hodnoty geometrických vlastností,
- γ_{Rd} je dílčí součinitel modelové nejistoty podle oddílu F.7 FprEN 1992-1-1: 2022 a
- γ_R^* je globální součinitel odolnosti, který lze odhadnout za předpokladu lognormálního rozdělení odolnosti ze vztahu:

$$\gamma_R^* = \exp(\alpha_R \beta V_R^*) \quad (4-14)$$

kde α_R je součinitel citlivosti pro odolnost (typicky 0,8) a β je směrná hodnota indexu spolehlivosti (typicky 3,8); viz oddíl 4.4.

V_R^* je variační koeficient odolnosti, který lze odhadnout ze vztahu:

$$V_R^* = \sqrt{(V_{R,M}^2 + V_{R,G}^2)} \quad (4-15)$$

kde:

$$V_{R,M} = \ln[R_m(X_m, a_{rep}) / R_k(X_k, a_{rep})] / 1,65 \quad (4-16)$$

$V_{R,G}$ je variační koeficient zahrnující geometrické nepřesnosti – podrobnější postup uvádí příloha A (Annex A) FprEN 1992-1-1: 2022; v obvyklých situacích lze uvažovat $V_{R,G} \approx 0,015$. $R_k(X_k, a_{rep})$ představuje odolnost konstrukce stanovenou nelineárním výpočtem při uvážení charakteristických hodnot materiálových vlastností X_k a reprezentativních rozměrů konstrukce a_{rep} .

4.7 Mezní stavy použitelnosti

Pro běžné typy betonových konstrukcí se ověřují mezní stavy použitelnosti (MSP), které zahrnují omezení vzniku a šířky trhlin, omezení deformací a v některých případech také kmitání. Z hlediska omezení rozvoje trhlin se obvykle ověřují podmínky omezení napětí v tlaku v betonu a omezení tahového napětí ve výztuži. V případě drátkobetonových konstrukcí se využívá podmínka omezení tahového namáhání vzhledem k pevnosti drátkobetonu v tahu za ohybu. Dílčí součinitele pro materiálové vlastnosti a účinky zatížení se při ověřování MSP obvykle uvažují rovny jedné.

Vzhledem k nedostatku se zkoušením a ověřováním MSP u betonových konstrukcí vyrobených aditivní fabrikací (3DPC) není možné v současnosti formulovat požadavky na MSP, které by byly uplatnitelné pro 3DPC konstrukce z různých materiálů, s různými geometriemi, vyrobených odlišnými technologiemi a vystavených různým účinkům zatížení. Předpokládá se, že MSP se budou ověřovat prostřednictvím kontroly napětí v betonu a v betonářské výztuži, pokud bude konstrukce vyztužená prutovou výztuží. Omezení napětí bude zřejmě vycházet z přísnějších kritérií vzhledem k často lokálnímu charakteru porušení u 3DPC konstrukcí.

Dokud nebudou formulovány požadavky na ověřování MSP u 3DPC konstrukcí detailněji, předpokládá se zajištění použitelnosti vhodným zohledněním konstrukčních opatření podle oddílu 3.2 vzhledem k předpokládanému účelu využití konstrukce. Limitní hodnoty deformací se řídí požadavky ČSN EN 1992 a příslušnými ČSN.

5 LITERATURA

5.1 Odborná literatura

Asprone, D. a kol. (2022). Structural design and testing of digitally manufactured concrete structures. Digital Fabrication with Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 276-DFC (str. 187-222). Cham: Springer International Publishing.

Beal, A. N. (1986). The Design of Slender Columns. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 81(3), 397-414.

Červenka, J.; Rymeš, J.; Jendele, L.; Herzfeldt, M. (2024). Time Dependent Modelling and Simulation of Digital Concrete; Delft, p 4.

Červenka, V. (2013). Reliability-based non-linear analysis according to *fib* Model Code 2010. Structural Concrete, 14(1), 19-28.

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

Červenka, V., Červenka, J., & Kadlec, L. (2018). Model uncertainties in numerical simulations of reinforced concrete structures. *Structural Concrete*, 19(6), 2004-2016.

Červenka, V.; Červenka, J.; Rymeš, J. (2024). Numerical simulation of concrete structures—From research to engineering application. *Structural Concrete*, 25(2), 751-772.

fib (2023). *Model Code for Concrete Structures 2020*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (*fib*).

Holický, M. (2015). *Aplikace teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky*. České vysoké učení technické.

Hurtig, K. a kol. (2025). Experimentální stanovení trvanlivostních vlastností 3D tištěného cementového kompozitu. *Betonářské dny 2025*.

Ma, L. et al. (2022). Effect of drying environment on mechanical properties, internal RH and pore structure of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 315, 125731.

Pierre, M. a kol. (2025), Multiphysics Modelling for 3D Concrete Printing: From Printability to Hardened Properties. 12th Int Conf Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-12, 1-9, DOI: 10.21012/FC12.1358.

Roussel, N. (2018). Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*, 112, 76-85.

Rymeš J., Červenka J. & Jendele L. (2023) Material Modelling and Simulation of 3D Concrete Printing Process. *Proceedings of FraMCoS-11*

Rymeš, J., Červenka, J., Jendele, L., Bureš, V., & Čítek, D. (2024) Integrating 3D Modelling and Non-linear Numerical Simulations in Concrete Additive Manufacturing. *fib Symposium*.

Sikora, P. et al. (2025), Demonstration of 3D printed concrete containing fine recycled concrete aggregates (RCA) and recycled concrete powder (RCP): rheology, early-age, shrinkage, mechanical and durability performance (under review). *Buildings*.

Wolfs, R. J., Bos, F. P., & Salet, T. A. (2018). Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete. *Construction and Building Materials*, 181, 447-454.

5.2 Normativní dokumenty

ČSN EN

ČSN EN 206+A2 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, 2021

ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, 2004

ČSN EN 1991 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí (sada norem)

ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2006

ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu, 2020

ČSN EN 12390-12 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 12: Stanovení odolnosti betonu proti karbonataci - Metoda zrychlené karbonatace, 2023

ČSN EN 14651+A1 Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny - Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost), 2008

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

Národní normy

ČSN 73 0038 Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí - doplňující ustanovení, 2019

ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, 2003

ČSN 72 2452 Zkouška mrazuvzdornosti malty, 2005

ČSN P 73 2404 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace, ed. 2, 2024

Normy ISO

ČSN ISO 2394 Obecné zásady spolehlivosti konstrukcí, 2016

ISO/ASTM 52939 Additive manufacturing for construction — Qualification principles — Structural and infrastructure elements, 2023

Další normativní dokumenty

EN 1990:2023 Basis of structural and geotechnical design

FprEN 1992-1-1:2022 Design of concrete structures — Part 1-1: General rules — Rules for buildings, bridges and civil engineering structures

ICC 1150:2025 Standard for Automated Construction Technology for 3D Printing Walls — Public Draft (2nd draft, public comment version). Washington, DC: International Code Council (ICC)

PŘÍLOHA A – Příklady navrhování na základě zkoušek
A.1 Návrhová odolnost malých stěn s vlivem křehkého lokálního porušení

Níže je hodnoceno sedm výsledků zkoušek malých stěn o výšce $h \approx 190$ mm, šířce $b = 145$ mm (zanedbatelná variabilita) a nominální tloušťce stěny $t_{nom} = 25$ mm. Tab. A-1 shrnuje výsledky u měřených veličin (minimální tloušťky stěny a síly při porušení), u kterých se dále uvažuje jejich variabilita, uvádí odolnosti odhadnuté na základě modelu a hodnoty modelové nejistoty.

Tab. A-1. Zkoušky stěn s vlivem křehkého lokálního porušení, modelová odolnost a nejistota.

Číslo prvku	Minimální tloušťka t_{min} [mm]	Pevnost v tlaku f_{cz} [MPa]	Odolnost R_{model} podle (A.1-1) [kN]	Odolnost R podle zkoušky [kN]	Modelová nejistota $\theta_R = R / R_{model}$
13	21,7	56	88,3	89,7	1,13
14	21,7		88,3	79,4	1,00
15	21,8		88,7	57,8	0,73
16	21,8		88,7	72,1	0,90
17	21,7		88,3	107,0	1,35
18	21,8		88,7	102,4	1,28
19	21,5		87,5	64,9	0,83

Model odolnosti pro malé stěny bez vlivu štíhlosti ($\lambda \sim 30-43,5$ podle vztahu (A.3-3) v oddílu A.3) se uvažuje podle následujícího vztahu:

$$R_{model} = b t_{min} \beta_{lokální} f_{cz} \quad (A.1-1)$$

kde t_{min} značí změřenou minimální tloušťku stěny a $\beta_{lokální}$ je redukční faktor zohledňující vliv křehkého lokálního porušení. Na základě předchozích zkušeností se uvažuje $\beta_{lokální} = 0,5$.

Pevnost v tlaku byla změřena v rámci dalších zkoušek (počet $n_{fcz} = 8$) a byly získány následující charakteristiky:

$$\text{průměr: } f_{czm,0} = 56 \text{ MPa; variační koeficient: } V_{fcz} = 5 \% \quad (A.1-2)$$

Podle oddílu 4.3 se v příloze A uvažuje $\alpha_{cc} = 0,8$ pro dlouhodobě zatížený prvek. Průměr pevnosti v tlaku se tedy upraví:

$$f_{czm} = \alpha_{cc} f_{czm,0} = 0,8 \times 56,0 = 44,8 \text{ MPa} \quad (A.1-3)$$

Za předpokladu normálního rozdělení stanovíme charakteristickou hodnotu podle vztahu (D.4) v příloze D, ČSN EN 1990:

$$f_{cz,k} = f_{czm} (1 - k_{5\%,n_{fcz}} V_{fcz}) = 44,8 \times (1 - 2,00 \times 0,05) = 40,3 \text{ MPa} \quad (A.1-4)$$

kde $k_{5\%,8} = 2,00$ se uvažuje podle ČSN EN 1990, tabulky D.1 (řádek „variační koeficient neznámý“).

Podle oddílu 4.3 stanovíme efektivní tloušťku stěny jako:

$$t_{eff} = 0,7 t_{nom} = 0,7 \times 25,0 = 17,5 \text{ mm} \quad (A.1-5)$$

Charakteristická hodnota odolnosti je:

$$R_k = b t_{\text{eff}} \beta_{\text{lokální}} f_{\text{cz,k}} = 0,145 \times 0,0175 \times 0,5 \times 40,3 \times 10^3 = 51,2 \text{ kN} \quad (\text{A.1-6})$$

Z tab. A-1 se stanoví průměrné hodnoty a variační koeficienty minimální tloušťky a modelové nejistoty:

- $t_{\text{min,m}} = 21,7 \text{ mm}$ a $V_{\text{tmin}} = 0,5 \%$ – zanedbatelná variabilita charakterizující dobře kontrolovaný tisk malých prvků, u větších prvků a/ nebo nižší kontrole kvality výroby lze očekávat vyšší variabilitu, statistická nejistota je vzhledem k velmi nízkému variačnímu koeficientu v tomto příkladu je zanedbatelná,
- $\mu_{\theta R} = 0,93$ —model o 7 % systematicky nadhodnocuje odolnost („je na straně nebezpečné“)—a variační koeficient $V_{\theta R} = 21 \%$.

U modelové nejistoty získáváme vyšší hodnotu variačního koeficientu a je potřebné zohlednit vliv statistické nejistoty. Při podrobné analýze by se modelová nejistota popsala Studentovým t -rozdělením pro hodnoty $\ln(\theta_R)$, Holický (2015). V tomto příkladu se aplikuje zjednodušený postup: při rozsahu souboru $n = 7$ a neznámém průměru modelové nejistoty θ má Studentovo t -rozdělení—popisující statistickou nejistotu—nulový průměr a směrodatnou odchylku:

$$\sigma_t = \sqrt{[(n - 1) / (n - 3)]} = 1,22 \quad (\text{A.1-7})$$

Pro rostoucí počet zkoušek, $n \rightarrow \infty$, se směrodatná odchylka σ_t blíží jedné.

Hodnotu variačního koeficientu modelové nejistoty zohledňující statistickou nejistotu získáme jako:

$$V_{\theta R'} \approx \sigma_t V_{\theta R} = 1,22 \times 0,21 = 25,7 \% \quad (\text{A.1-8})$$

V tomto případě vede statistická nejistota ke zvýšení variačního koeficientu o přibližně 20 %.

Variační koeficient odolnosti se stanoví ze vztahu (4-6) s využitím $V_{\theta R'}$:

$$V_R \approx \sqrt{(0,05^2 + 0,005^2 + 0,257^2)} = 26,2 \% \quad (\text{A.1-9})$$

S přihlédnutím k modelové nejistotě vychází průměrná hodnota odolnosti (s uvážením $\alpha_{\text{cc}} = 0,8$):

$$R_m = 0,93 \times 0,145 \times 0,0217 \times 0,5 \times 44,8 \times 10^3 = 65,5 \text{ kN} \quad (\text{A.1-10})$$

Návrhová hodnota se stanoví ze vztahu (4-7):

$$R_d = 65,5 \times \exp(-0,8 \times 3,8 \times 0,262) = 29,5 \text{ kN} \quad (\text{A.1-11})$$

Dílčí součinitel odolnosti se stanoví ze vztahu (4-3):

$$\gamma_c = 51,2 / 29,5 = 1,74 \approx \mathbf{1,75} \quad (\text{A.1-12})$$

Hodnota 1,75 se použije společně s charakteristickou hodnotou odolnosti stanovenou podle vztahu (A.1-6) včetně $\beta_{\text{lokální}} = 0,5$ a efektivní šířky $t_{\text{eff}} = 0,7t_{\text{nom}}$, která je v porovnání s naměřenými minimálními tloušťkami v tab. A-1 konzervativní.

Dílčí součinitel zohledňuje relativně vysokou nejistotu modelu odolnosti ovlivněnou křehkým porušením a významnou statistickou nejistotu – pokud by bylo k dispozici například 20 výsledků zkoušek ($n = 20$) vedoucích ke stejným hodnotám $\mu_{\theta R}$ a $V_{\theta R}$, dílčí součinitel by klesl 1,55.

A.2 Návrhová odolnost malých stěn s vlivem křehkého lokálního porušení a koncování

Oproti vzorkům v oddílu A.1 je koncování vzorků, jejichž odolnost se analyzuje v tomto příkladu, provedeno zabroušením s cílem omezit vliv lokálního porušení a snížit variabilitu odolnosti malých stěn. Dále se v tomto příkladu ukazuje postup v situaci, kdy zkoušené vzorky

zahrnují dvě podskupiny vzorků (zde s různými šířkami), u kterých se však předpokládá stejný mechanismus porušení. Pokud není uvedeno jinak, uvažují se materiálové a geometrické vlastnosti podle oddílu A.1, tj. především stejné charakteristiky pevnosti v tlaku f_{cz} (s uvážením $\alpha_{cc} = 0,8$) a stejná nominální i efektivní tloušťka stěny, $t_{nom} = 25$ mm a $t_{eff} = 17,5$ mm.

K dispozici je pět výsledků zkoušek malých stěn o šířce $b \approx 146$ mm (4x výška $h \approx 290$ mm a $1x h = 176$ mm) a tři zkoušky stěn s poloviční šířkou $b \approx 73$ mm ($h \approx 194$ mm). Tab. A-2 shrnuje výsledky zkoušek, uvádí odolnosti odhadnuté na základě modelu a hodnoty modelové nejistoty.

Tab. A-2. Zkoušky stěn s vlivem křehkého lokálního porušení a koncování, modelová odolnost a nejistota.

Číslo prvku	Šířka b [mm]	Minimální tloušťka t_{min} [mm]	Pevnost v tlaku f_{cz} [MPa]	Odolnost R_{model} podle (A.1-1)* [kN]	Odolnost R podle zkoušky [kN]	Modelová nejistota $\theta_R = R / R_{model}$
9	146	21,7	56	106,3	111,6	1,05
10		21,7		106,3	98,8	0,93
11		21,5		105,3	109,4	1,04
12		21,8		106,8	92,4	0,87
20		21,5		105,3	82,6	0,78
21	73	21,9		53,5	58,0	1,08
22		22,1		53,7	58,4	1,09
23		21,8		53,7	55,5	1,03

* $\beta_{lokální} = 0,6$.

Model odolnosti pro malé stěny bez vlivu štíhlosti ($\lambda \sim 30-47$ podle vztahu (A.3-3) v oddílu A.3) se uvažuje podle vztahu (A.1-1) se zvýšenou hodnotou redukčního součinitele, $\beta_{lokální} = 0,6$.

Charakteristická hodnota odolnosti je:

$$\begin{aligned} R_k(b = 146) &= 0,146 \times 0,0175 \times 0,6 \times 40,3 \times 10^3 = 61,7 \text{ kN} \\ R_k(b = 73) &= 0,073 \times 0,0175 \times 0,6 \times 40,3 \times 10^3 = 31,0 \text{ kN} \end{aligned} \quad (\text{A.2-1})$$

Z tab. A-2 se stanoví charakteristiky minimální tloušťky a modelové nejistoty:

- $t_{min,m} = 21,8$ mm a $V_{tmin} = 0,9$ % – opět zanedbatelná variabilita a statistická nejistota,
- $\mu_{\theta R} = 0,98$ (model v průměru velmi dobře odpovídá výsledkům zkoušek, je nepatrně na straně nebezpečné) a variační koeficient $V_{\theta R} = 10,8$ % (nižší variabilita pro modely odolnosti betonových prvků).

Pro osm zkoušek stěn, $n = 8$, získáme směrodatnou odchylku Studentova t -rozdělení:

$$\sigma_t = \sqrt{[(8 - 1) / (8 - 3)]} = 1,18 \quad (\text{A.2-2})$$

a upravenou hodnotu variačního koeficientu modelové nejistoty:

$$V_{\theta R'} \approx 1,18 \times 0,104 = 12,8 \text{ \%} \quad (\text{A.2-3})$$

Variační koeficient odolnosti a průměrné hodnoty (s vlivem α_{cc}) odolnosti jsou:

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

$$V_R \approx \sqrt{(0,05^2 + 0,009^2 + 0,128^2)} = 13,7 \% \quad (\text{A.2-4})$$

$$R_m(b = 146) = 0,98 \times 0,146 \times 0,0218 \times 0,6 \times 44,8 \times 10^3 = 83,8 \text{ kN}$$

$$R_m(b = 73) = 0,98 \times 0,73 \times 0,0218 \times 0,6 \times 44,8 \times 10^3 = 42,1 \text{ kN} \quad (\text{A.2-5})$$

Návrhové hodnoty se stanoví ze vztahu (4-7):

$$R_d(b = 146) = 83,8 \times \exp(-0,8 \times 3,8 \times 0,137) = 55,2 \text{ kN}$$

$$R_d(b = 73) = 42,1 \times \exp(-0,8 \times 3,8 \times 0,137) = 27,8 \text{ kN} \quad (\text{A.2-6})$$

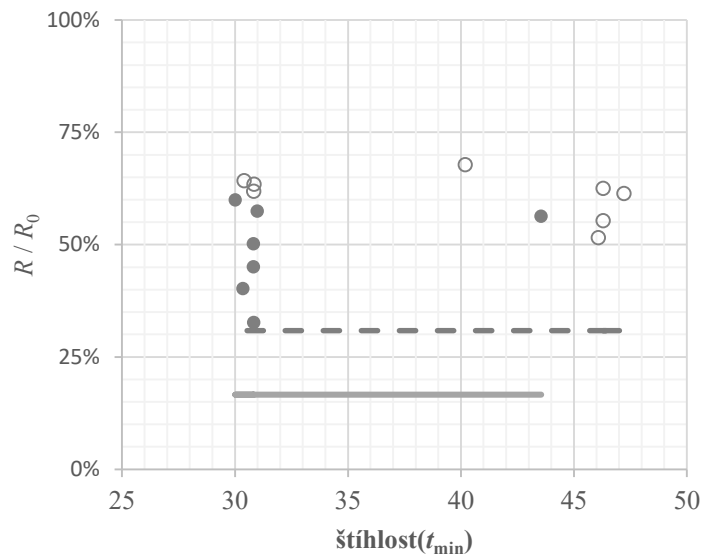
a dílčí součinitel ze vztahu (4-3):

$$\gamma_c(b = 146) = 61,7 / 55,2 = 1,12 \approx \mathbf{1,15}$$

$$\gamma_c(b = 73) = 31,0 / 27,8 = 1,12 \approx \mathbf{1,15} \quad (\text{A.2-7})$$

Hodnota 1,15 se použije společně s charakteristickou hodnotou odolnosti stanovenou podle vztahu (A.1-6) včetně $\beta_{\text{lokální}} = 0,6$. Nižší hodnota variačního koeficientu modelové nejistoty a následně i snížená hodnota dílčího součinitele prokazují pozitivní vliv koncování zabroušením, který omezuje vliv lokálního porušení. Nízkou hodnotu γ_c ovlivňuje především konzervativní předpoklad o efektivní tloušťce stěny – pokud bychom uvažovali při výpočtu charakteristické odolnosti hodnotu $t_{\text{min},m} = 21,8 \text{ mm}$, vzroste hodnota dílčího součinitele na 1,4.

Obr. A-1 ukazuje výsledky zkoušek a návrhové odolnosti stěn s vlivem lokálního porušení pro prvky bez koncování (oddíl A.1) a prvky se zabroušením (oddíl A.2). Zabroušením se výrazně omezí vliv lokálního porušení a sníží variabilita odolnosti – návrhová hodnota je oproti stěnám bez koncování téměř dvojnásobná.



Obr. A-1: Odolnosti stěn s vlivem lokálního porušení a koncování: 100 % - referenční hodnota $R_0 = b t_{\text{min},m} f_{\text{czm}}$; plné body – stěny bez koncování; plná čára – návrhová odolnost stěn bez koncování (oddíl A.1); kroužky – stěny se zabroušenými konci; přerušovaná čára – návrhová odolnost stěn s koncováním (oddíl A.2).

A.3 Návrhová odolnost malých štíhlých stěn s vlivem křehkého lokálního porušení

V tomto příkladu se analyzuje osm stěn, u kterých je únosnost ovlivněna jejich štíhlostí i lokálním porušením (není provedeno koncování zabroušením). Pokud není uvedeno jinak, uvažují se materiálové a geometrické vlastnosti podle oddílu A.1, tj. především stejné

NAVRHOVÁNÍ KONSTRUKCÍ Z DIGITÁLNÍHO BETONU

charakteristiky pevnosti v tlaku f_{cz} (s uvážením $\alpha_{cc} = 0,8$) a stejná nominální i efektivní tloušťka stěny, $t_{nom} = 25$ mm a $t_{eff} = 17,5$ mm.

K dispozici je osm výsledků zkoušek štíhlých stěn o šířce $b = 146$ mm (tab. A-3).

Tab. A-3. Zkoušky štíhlých stěn s vlivem křehkého lokálního porušení.

Číslo prvku	Výška h [mm]	Minimální tloušťka t_{min} [mm]	Štíhlost λ (A.3-3)	Pevnost v tlaku f_{cz} [MPa]	R podle zkoušky [kN]
1	574	21,5	92,5	56	63,1
2	581	21,8	92,3		77,8
3	580	21,3	94,3		54,9
4	580	21,5	93,5		31,3
5	580	21,5	93,5		65,3
6	382	21,7	61,0		75,1
7	383	21,7	61,1		94,2
8	382	21,7	61,0		106,0

Model odolnosti pro štíhlé stěny se uvažuje podle následujícího vztahu:

$$R_{model} = \Phi(\lambda) b t_{min} \beta_{lokální} f_{cz} \quad (A.3-1)$$

kde redukční součinitel se uvažuje zvýšenou hodnotou oproti oddílu A.1, $\beta_{lokální} = 0,8$, vzhledem k tomu, že vliv štíhlosti může převážit nad lokálním porušením. $\Phi(\lambda)$ je redukční součinitel závislý na štíhlosti (Beal, 1986):

$$\Phi(\lambda) = 1,09 - 7,5 \lambda / 1000; \quad \text{pro } 20 \leq \lambda \leq 100 \quad (A.3-2)$$

Štíhlost se stanoví ze vztahu:

$$\lambda = h / (t_{min}/\sqrt{12}) \quad (A.3-3)$$

Tab. A-4 uvádí hodnoty modelové odolnosti podle (A.3-1).

Tab. A-4. Odolnosti štíhlých stěn s vlivem křehkého lokálního porušení – modelové hodnoty a nejistota, dílčí součinitel.

Číslo prvku	$\Phi(\lambda)$ podle (A.3-2)	R_{model} podle (A.3-1) [kN]	$\theta_R = R / R_{\text{model}}$	R_m podle (A.3-7) [kN]	R_k podle (A.3-4) [kN]	R_d podle (A.3-7) [kN]	$\gamma_c = R_k / R_d$
1	0,40	55,6	1,14	46,6	32,6	20,8	1,56
2	0,40	56,5	1,38	47,4	32,7	21,2	1,54
3	0,38	53,1	1,03	44,6	31,4	19,9	1,58
4	0,39	54,5	0,57	45,8	32,0	20,5	1,56
5	0,39	54,5	1,20	45,8	32,0	20,5	1,56
6	0,63	89,5	0,84	75,1	52,0	33,6	1,55
7	0,63	89,3	1,05	75,0	51,9	33,5	1,55
8	0,63	89,5	1,18	75,1	52,0	33,6	1,55

Charakteristické hodnoty odolnosti (tab. A-4) se stanoví s uvážením $\alpha_{cc} = 0,8$:

$$R_k = \Phi(\lambda) b t_{\text{eff}} \beta_{\text{lokální}} f_{cz,k} \quad (\text{A.3-4})$$

Z tab. A-3 a tab. A-4 se stanoví průměrné hodnoty a variační koeficienty minimální tloušťky a modelové nejistoty:

- $t_{\text{min},m} = 21,6$ mm a $V_{t_{\text{min}}} = 0,8$ %,
- $\mu_{\theta R} = 1,05$ (model je v průměru nepatrně konzervativní) a variační koeficient $V_{\theta R} = 22,0$ %, který se pro $n = 8$ a $\sigma_t = 1,18$ (oddíl A.2) upraví:

$$V_{\theta R}' \approx 1,18 \times 0,22 = 26,0 \quad (\text{A.3-5})$$

Variační koeficient odolnosti získáme jako:

$$V_R \approx \sqrt{(0,05^2 + 0,008^2 + 0,260^2)} = 26,5 \quad (\text{A.3-6})$$

Průměrné a návrhové hodnoty odolnosti (tab. A-4) získáme s uvážením $\alpha_{cc} = 0,8$:

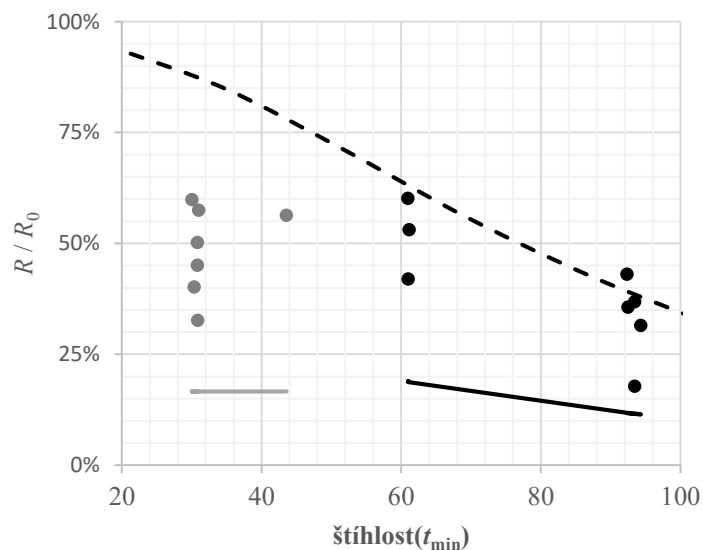
$$\begin{aligned} R_m &= \mu_{\theta R} \Phi(\lambda) b t_{\text{min},m} \beta_{\text{lokální}} f_{czm} \\ R_d &= R_m \times \exp(-0,8 \times 3,8 \times 0,265) \end{aligned} \quad (\text{A.3-7})$$

Dílčí součinitel odolnosti se stanoví ze vztahu (4-3) – viz také tab. A-4:

$$\gamma_c = R_k / R_d \approx 1,55 \quad (\text{A.3-8})$$

Hodnota 1,55 se použije společně s charakteristickou hodnotou odolnosti stanovenou podle vztahu (A.3-4) včetně $\beta_{\text{lokální}} = 0,8$ a redukčního součinitele $\Phi(\lambda)$ podle vztahu (A.3-2). Nízkou hodnotu γ_c ovlivňuje opět především konzervativní předpoklad o efektivní tloušťce stěny – pokud bychom uvažovali při výpočtu charakteristické odolnosti hodnotu $t_{\text{min},m} = 21,6$ mm, vzroste hodnota dílčího součinitele na 1,95.

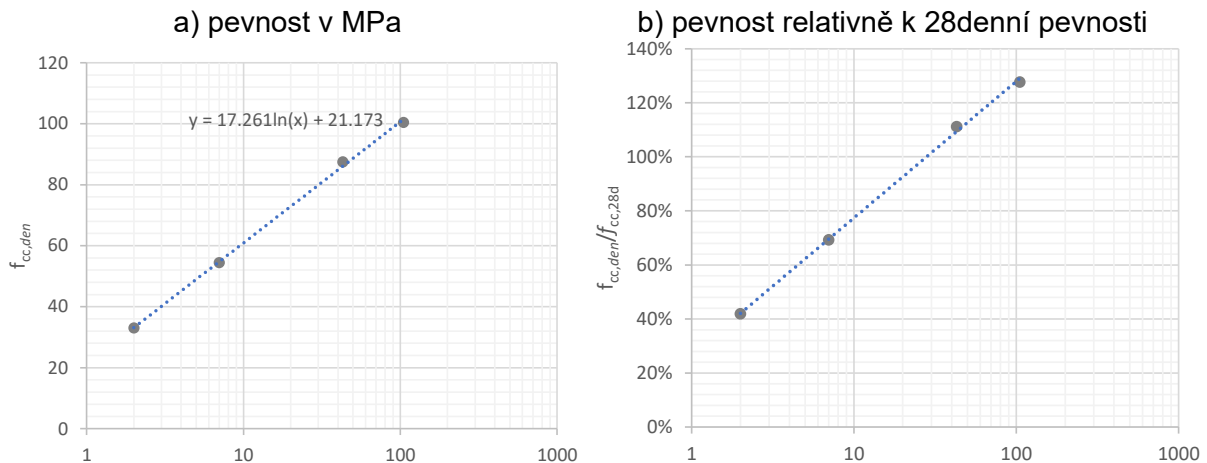
Obr. A-2 ukazuje výsledky zkoušek a návrhové odolnosti stěn s vlivem lokálního porušení (prvky z oddílu A.1) a štíhlé prvky (oddíl A.3). Návrhové odolnosti jsou pro oba typy malých stěn pod 20 % referenční hodnoty uvažované bez vlivu štíhlosti a lokálního porušení; štíhlost začíná ovlivňovat návrhovou hodnotu přibližně pro $\lambda > 60$.



Obr. A-2: Odolnosti stěn s vlivem lokálního porušení a štíhlosti: 100 % - referenční hodnota $R_0 = b t_{min,m} f_{czm}$; šedivé body – stěny bez koncování; šedivá plná čára – návrhová odolnost stěn bez koncování (oddíl A.1); černé body – štíhlé stěny bez koncování; černá plná čára – návrhová odolnost štíhlých stěn bez koncování (oddíl A.3); černá přerušovaná čára – redukční součinitel pro vliv štíhlosti podle (A.3-2).

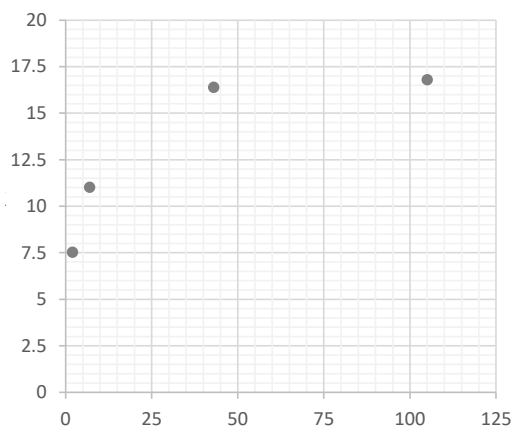
PŘÍLOHA B – Pevnost litého materiálu

V této příloze jsou vyhodnoceny pevnosti materiálu litého do formy po přípravě čerstvého materiálu v míchacím zařízení, který byl do zkoušky ošetřován uložením ve vodě o teplotě $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Na obr. B-1 je zobrazena pevnost tohoto materiálu v tlaku v závislosti na stáří. Vývoj pevnosti v čase dobře vystihuje logaritmický vztah. Poznamenejme, že platí $f_{cc,7d} \approx 0,25f_{cc,28d}$.

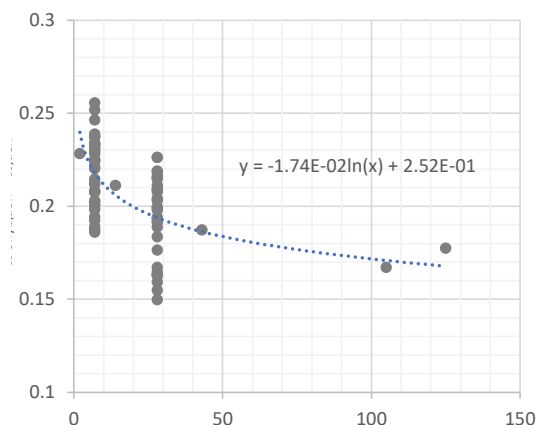


Obr. B-1: Pevnost litého materiálu v tlaku v závislosti na stáří (vodorovná osa – stáří ve dnech).

U pevnosti v tahu za ohybu je závislost na stáří komplikovanější a je potřeba provést další zkoušky, aby bylo možné popsat dobře vztah $f_{ct-oHyb}$ (stáří); viz obr. B-2. Obr. B-3 ukazuje poměr pevnosti v tahu za ohybu ku pevnosti v tlaku v závislosti na stáří. Ukazuje se, že lze opět přibližně použít logaritmický vztah, nejistota v odhadu $f_{ct-oHyb}$ na základě f_{cc} je však vyšší.

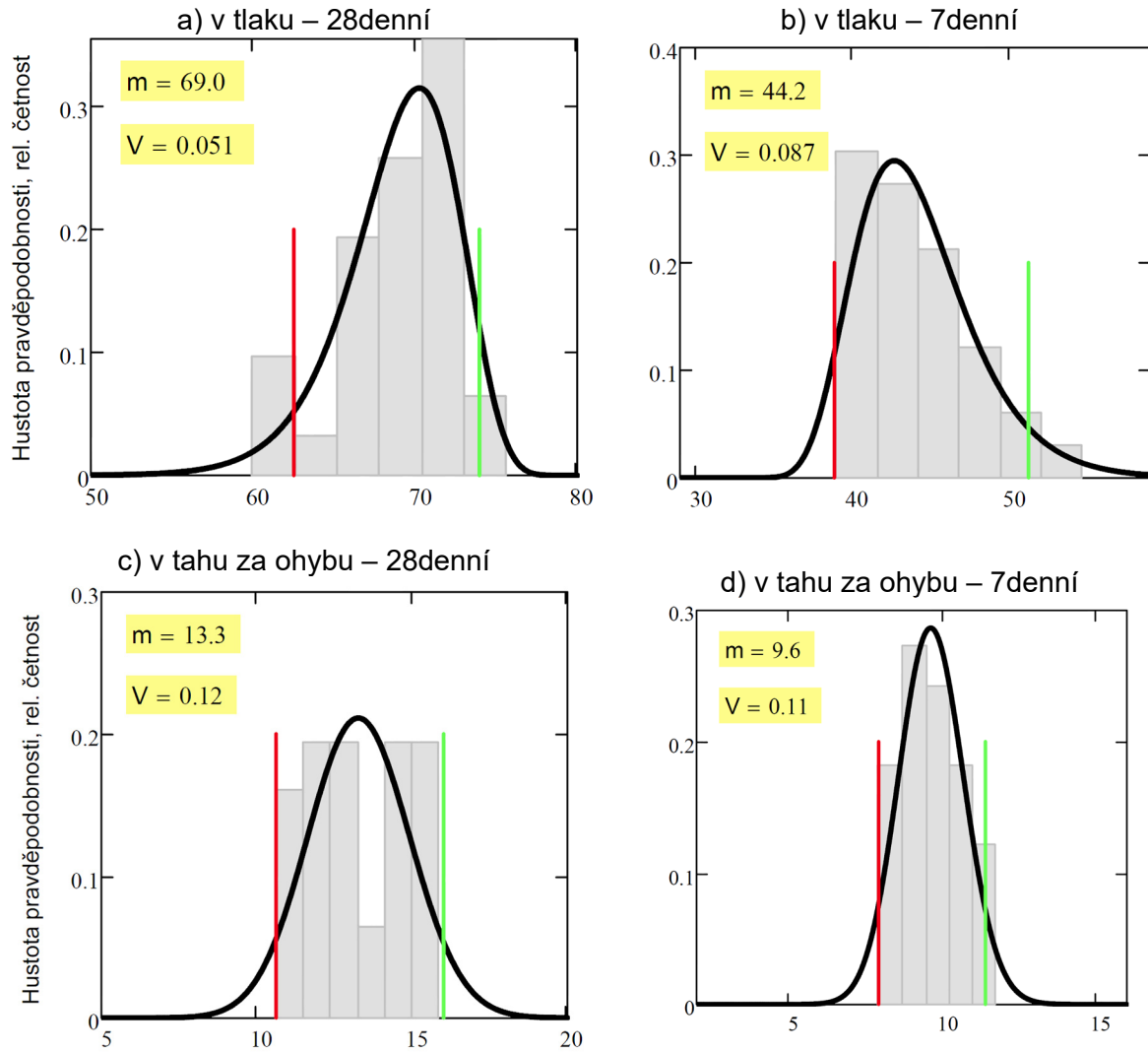


Obr. B-2: Pevnost litého materiálu v tahu za ohybu v MPa v závislosti na stáří (vodorovná osa – stáří ve dnech).



Obr. B-3: Poměr pevnosti v tahu za ohybu ku pevnosti v tlaku pro litý materiál v závislosti na stáří (vodorovná osa – stáří ve dnech).

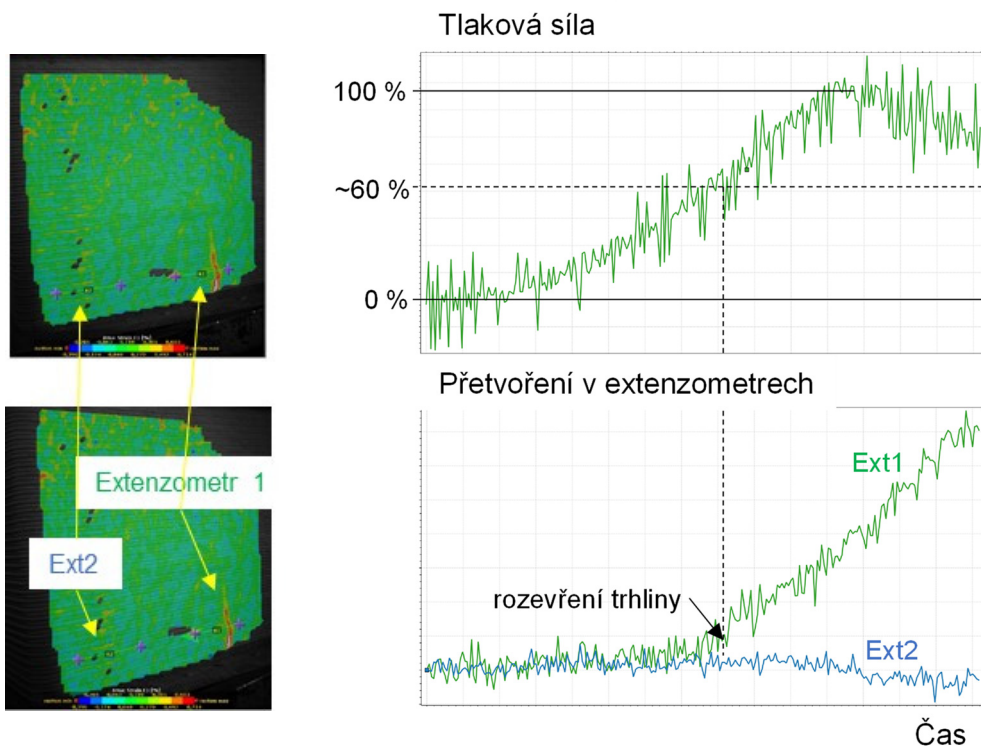
Obr. B-4 ukazuje histogramy a základní statistické charakteristiky 7denních a 28denních pevností v tlaku a v tahu za ohybu. Variabilita u materiálu se stejnou recepturou, způsobem ošetřování zkušebních těles a způsobem stanovení materiálových parametrů je způsobená použitím různých výrobních šarží suché složky (odlišné stáří pojivových složek, především cementu) i vlivem sezónnosti.



Obr. B-4: Pevnosti litého materiálu (vodorovná osa – pevnosti v MPa; m – průměrná hodnota, V – variační koeficient; svislé čáry: 90% konfidenční interval).

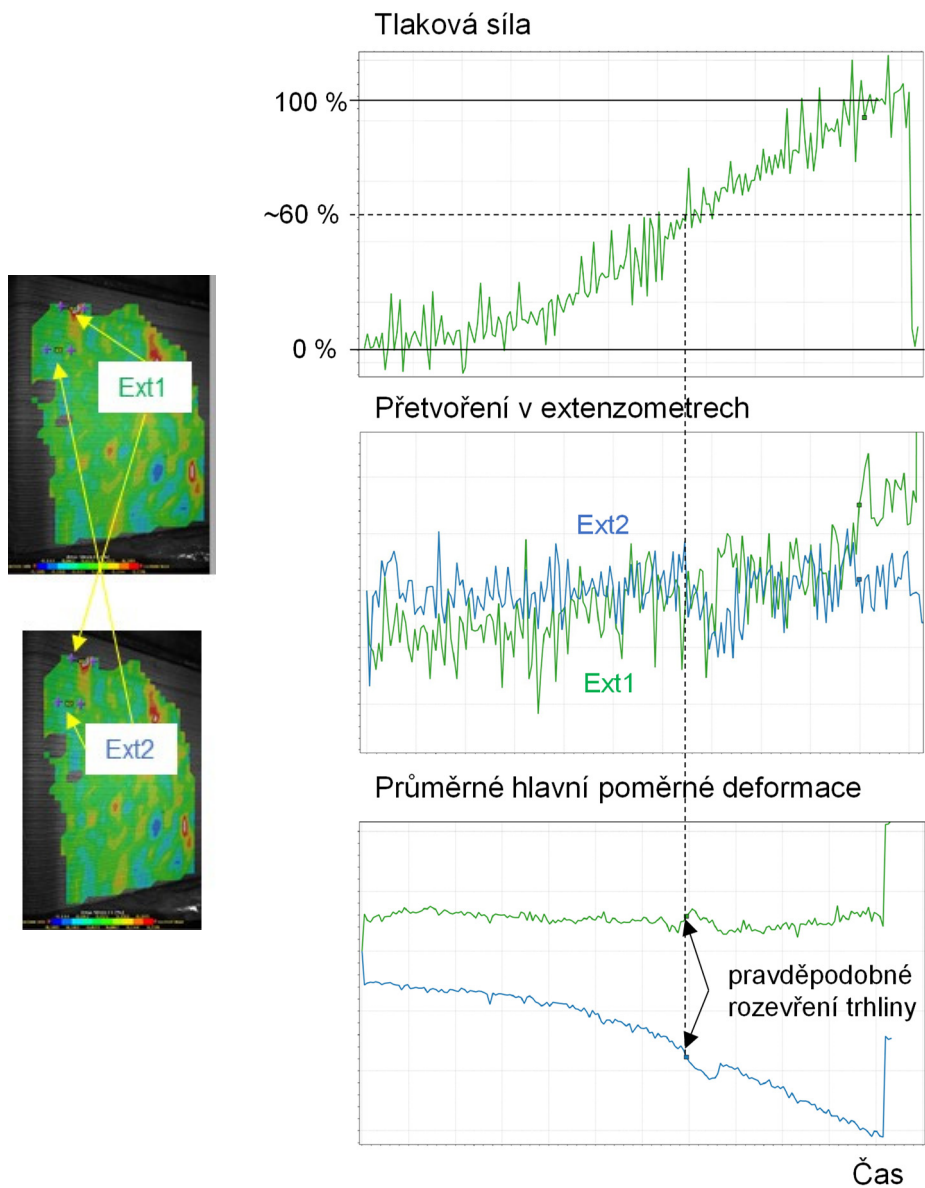
PŘÍLOHA C – Monitorování průběhu zatěžovací zkoušky s využitím DIC

Digitální korelace obrazu (Digital Image Correlation – DIC) umožňuje monitorovat průběh zatěžovací zkoušky na základě pozorování posunů a deformací celého nebo části zkoušeného tělesa. Obr. C-1 a obr. C-2 ukazují výstupy z monitoringu zatěžovacích zkoušek dvou „L“ prvků – vzhledem k uspořádání zkoušky byla snímána pouze část povrchu zatěžovaného prvku. Obr. C-1 ukazuje tlakovou sílu a přetvoření ve virtuálních extenzometrech Ext1 a Ext2 zaznamenané DIC při zkoušce tělesa 1. Ke vzniku první trhliny došlo v monitorované oblasti. Její rozevření v oblasti Ext1 je signalizováno náhlým protažením virtuálního extenzometru. Síla při zaznamenaném vzniku trhliny odpovídá přibližně 60 % maximální síly.



Obr. C-1: Tlaková síla a přetvoření v extenzometrech zaznamenané DIC při zkoušce tělesa 1.

Obr. C-2 ukazuje tlakovou sílu, přetvoření v E1 a E2 a pole poměrných deformací zaznamenané DIC při zkoušce tělesa 2. V tomto případě k rozevření první trhliny došlo mimo snímanou oblast – z přetvoření virtuálních extenzometrů nelze proto okamžik rozevření trhliny detekovat. Lze však využít zobrazení pole poměrných deformací – průměrné hlavní poměrné deformace na obr. C-2 dole naznačují, že k rozevření trhliny opět došlo při přibližně 60 % maximální síly.



Obr. C-2: Tlaková síla, přetvoření v extenzometrech a průměrné hlavní poměrné deformace zaznamenané DIC při zkoušce tělesa 2.

PŘÍLOHA D – Příklad tiskového protokolu

1 PRŮVODNÍ INFORMACE

OBJEKT:	VÁLCE d = 300mm, h = 400 + 800 mm
Projekt - tisk:	Digibeton - Válce
Zpracovatel gcodu soubor:	Oto Melter – 231030_valce_400_800
Operátoři výroby:	Oto Melter, Aleš Hvízdal, Karel Hurtig
Datum:	9. 11. 2023

2 TISKOVÝ SYSTÉM

Tiskárna, pracoviště:	Testbed, pracoviště KÚ
Tiskový systém:	tisková hlava V5
Slicer:	GH Slicer standard (KÚ)

3 PROSTŘEDÍ

Teplota prostředí (°C):	19 °C
Teplota materiálu na výstupu(°C):	19 °C
Vlhkost (% rel. vlhk.):	50 %

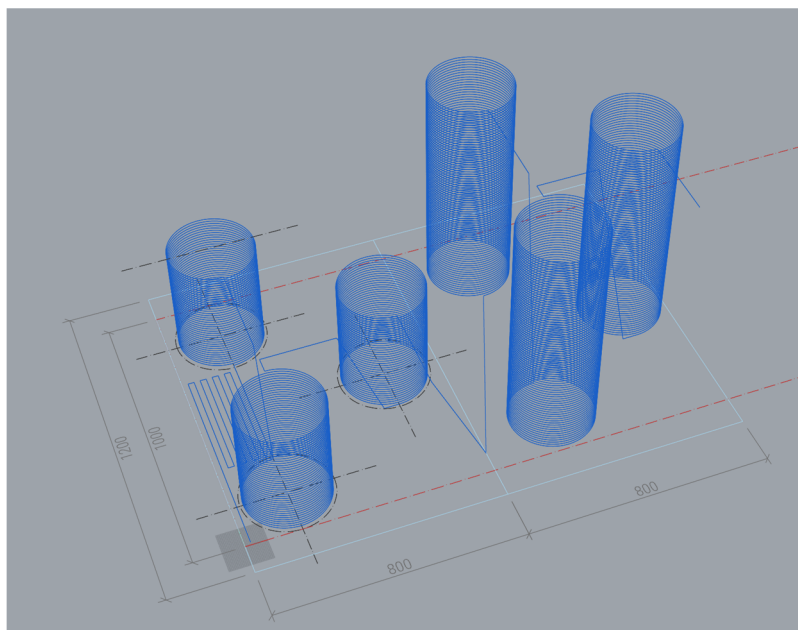
4 ZÁKLADNÍ PARAMETRY TISKU

Čas tisku (h, min):	45 min (celkem 6 těles)
Tiskový materiál - objem (l):	98 l (celkem 6 těles)
Hmotnost objektu (kg):	válec 400 mm – 24 kg, válec 800 mm – 48 kg
Rozměry tiskové dráhy x,y,z (mm):	1572 x 980 x 800 mm
Urychlující složka - dávk. (objemově %):	acc 3D STAR – 5 %
Vyztužení - dávk. (hmot. % k suché směsi)	PVA 12x0,6 mm - 0,25 %
Pigment, přísady (hmot. % k suché směsi):	-
Tryska (mm):	prodloužená - 20 mm
Rychlost (mm/s):	120 mm/s
Délka dráhy (m):	326,5 m (celkem)
Čas vrstvy (s):	7,3 s
Výška vrstvy (mm):	10 mm
Nominální šířka extruze (mm):	25 mm
Efektivní šířka extruze (mm):	20 mm

5 POPIS

Tištěny celkem 3 válce o výšce 400 mm a 3 válce o výšce 800 mm, jednostopá stěna = 1x25 mm. Tisk proběhl bez problémů, výsledek dle předpokladů zadání.

6 MINIATURA TISKOVÉ DRÁHY



7 FOTOGRAFIE





8 DATA - PŘÍLOHA

- Zdrojový soubor 3D
- Gcode
- Ostatní dokumentace (výkresy, zadání, ...)