

POZVÁNKA NA KONFERENCI A WORKSHOP



Česká betonářská společnost ČBSI
www.cbsbeton.eu

Partneři konference



Heidelberg Materials CZ
www.heidelbergmaterials.cz



So Concrete a.s.
www.so-concrete.com

19. KONFERENCE

TECHNOLOGIE A PROVÁDĚNÍ

2024

HLAVNÍ TÉMA

3D tisk a využití
recyklovaného
kameniva

DATUM A MÍSTO

21. března 2024
– GRANDIOR HOTEL
PRAGUE, Praha

22. března 2024
– Exkurze



EXKURZE – SO CONCRETE, A.S.

KONFERENCE BUDE ZAŘAZENA
DO AKREDITOVANÝCH
VZDĚLÁVACÍCH PROGRAMŮ
V PROJEKTECH
CELOŽIVOTNÍHO VZDĚLÁVÁNÍ
ČKAIT



PROGRAM KONFERENCE

1. DEN - ČTVRTEK 21. BŘEZNA 2024

GRANDIOR HOTEL PRAGUE

09:00

Zahájení

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.,
předseda vědeckého výboru;
doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.,
předseda ČBS

09:00 - 10:55 SEKCE ČT 1 RECYKLOVANÉ KAMENIVO

Závěry rozborového úkolu RU-0001/22/Z1
(analýza zdrojů druhotných surovin a jejich
využití pro výrobu recyklovaného kameniva
dle ČSN EN 12620+A1)

Ing. Adam Hubáček, Ph.D.;
prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.;
Ing. Lubomír Keim, CSc.

Recyklované kamenivo do betonu -
certifikace a požadavky pro uvedení na trh
Ing. Lubomír Keim, CSc.

10 year of experiences of the use milled
limestone - allowed as partial cement
replacement - worked out by a national
certification system in an Equivalent
Concrete Performance Concept according
EN 206, today used in Belgium
and The Netherlands

Ing. Christophe Denayer

Vlastnosti RAC pro konstrukce bytových
staveb

Ing. Zdeněk Hlavsa

Praktické zkušenosti z betonáže
monolitických konstrukcí s využitím
hrubého kameniva z cihelného recyklátu
prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Diskuze

11:00 - 11:10

Přestávka - občerstvení

11:10 - 13:00 SEKCE ČT 2 RECYKLOVANÉ KAMENIVO

Principy cirkulární ekonomiky v betonových
konstrukcích

doc. Ing. Tereza Pavlů, Ph.D.

Dvě možnosti použití recyklátu z cihelného
zdiva v betonu

doc. Ing. Vlastimil Bílek, CSc.;
Ing. Kateřina Matýsková;
Bc. Bohdan Sousedík;
Ing. Lukáš Procházka, Ph.D.;
Ing. Michal Pešata

Možnost využití RAC ve skořepině z HPC
s kompozitní výztuží

Ing. Eliška Kafková; Ing. Jan Macháček;
Ing. Tomáš Vlach, Ph.D.;
Ing. Věra Kabičková

Využití recyklovaných materiálů při výrobě
betonových konstrukcí

Ing. Miroslav Procházka

Kvalita recyklovaného kameniva
ze selektivní demolice

Ing. Jiří Fiala; Zdeněk Starý

Diskuze

PROGRAM KONFERENCE

1. DEN - ČTVRTEK 21. BŘEZNA

GRANDIOR HOTEL PRAGUE

13:00 – 13:50 Přestávka – oběd

13:50 – 15:50 SEKCE ČT 3 3D TISK

1K malty pro 3D tisk z tuzemských zdrojů,
příklady tisku a vlastnosti ve ztvrdlém stavu

Ing. Denisa Jančaříková, Ph.D.;
prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Příprava metodiky navrhování konstrukcí
z digitálního betonu

doc. Ing. Miroslav Sýkora, Ph.D.;
Ing. Vladislav Bureš, Ph.D.;

Ing. Milan Holý, Ph.D.;
prof. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.;
Ing. David Čítek, Ph.D.

Zkušenosti s vývojem a aplikací 3D tisku
cementových kompozitů

Ing. arch. Oto Melter; Ing. Karel Hurtig;
Ing. arch. Michael Gabriel;
MgA. Aleš Hvizdal; Ing. David Čítek, Ph.D.

Historie a současnost komerčního využití
3DCP v ČR

Ing. Michal Zámečník

Autonomní robotický stavební systém
DEKMATIC

Ing. Pavel Šafrata; Ing. Jan Matička;
Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.;
Ing. Vjačeslav Usmanov, Ph.D.

Diskuze

15:50 – 16:10 Přestávka – občerstvení

16:10 – 18:30 SEKCE ČT 4 3D TISK

Digitální beton – technologie a estetika

Ing. arch. MgA. Dmitrij Nikitin

Technologie a inovace ve stavebnictví
u nás i ve světě

prof. Ing. Radoslav Sovják, Ph.D.

Robotické sochaření – 3D zpracování
cementového kompozitu

doc. Ing. Jiří Litoš, Ph.D.

Požadavky při uvedení na trh výrobků
zhotovených z betonu metodou 3D tisku

Ing. Miroslav Procházka

Mechanické vlastnosti 3D tištěného UHPC
s ocelovými mikrovlákný

Ing. Jan Vesecký; Ing. Jan Kubát;
doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.

3D tisk technologií 2K z autodomíchávačů

Ing. Jiří Vambera;
prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Diskuze



KLOKNERŮV
ÚSTAV
ČVUT V PRAZE

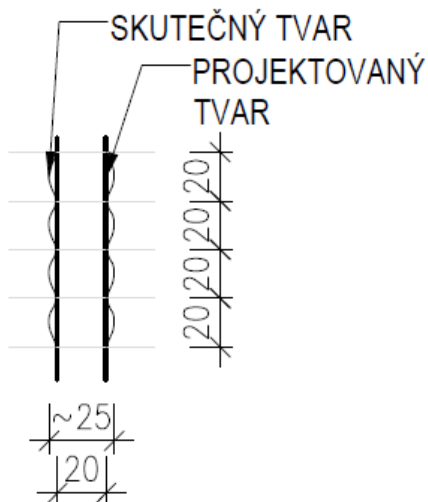
Příprava metodiky pro navrhování konstrukcí z digitálního betonu

M. Holý, M. Sýkora, V. Bureš, D. Čítek, J. Kolísko

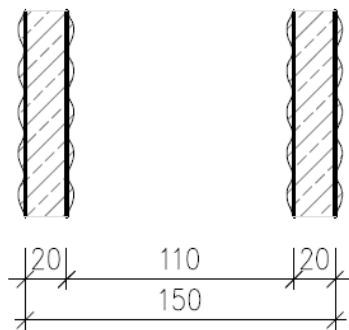


Rozdíly - aditivní fabrikace vs. monolitické

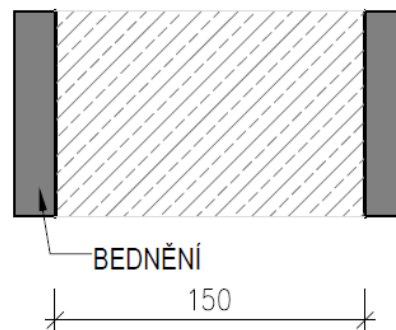
- Často **subtilní** prvky, výsledný tvar „**nepřesný**“ (bochánky)
 - výroba zařízením portálového typu nebo angulární roboty
- Návrh:
 - v raných fázích **okamžité zatížení vlastní tíhou**
 - konzistence - extruze, tixotropie, čerpatelnost
 - vyšší **objemové změny, nízká duktilita**
 - odlišné způsoby **porušení**



"DIGI" BETON



BĚŽNÁ BET. KONSTRUKCE



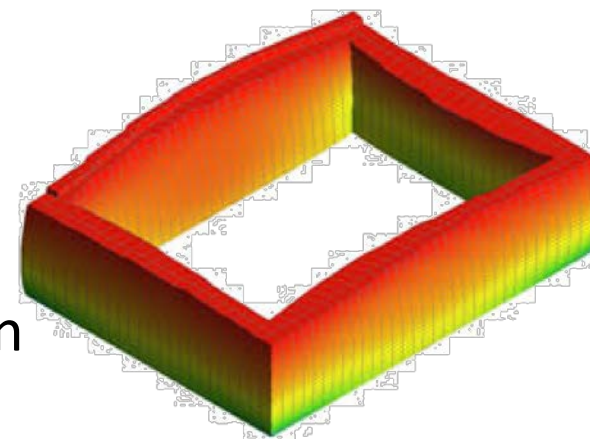


Rozdíly (2)



- **Klasická konstrukce** odlévaná do bednění je **typicky masivní**
- **Tištěná konstrukce** umožňuje **optimalizaci** spotřeby materiálu – tenkostěnná:
 - potřeba modifikovat návrhové postupy pro železobeton – **nutná nová metodika**
 - častěji rozhoduje **ztráta stability štíhlých stěn** (vybočení, boulení)
 - omezené možnosti vyztužení – **nízká duktilita**
 - zásadním problémem – **křehké porušení** nevyztužených tlačných prvků (skořepin)
 - **podstatná anizotropie** - ortotropie materiálu
 - vlastnosti materiálu a malá tloušťka prvku - jiný přístup ke stanovení **tloušťky krycí vrstvy**
 - důležité jsou **imperfekce** (nedokonalý tisk, deformace čerstvé směsi)
 - významnější **smrštění** jemnozrnné, chemicky modifikované směsi – **nutná opatření**

- **Rozsah platnosti** a předpoklady
 - na počátku zaměření na laboratorní podmínky
- Zohlednění různých způsobů **výroby** a možností **vyztužování**
 - rychlost tisku, tvary, typy vláken atd.
 - materiálové vlastnosti, geometrická přesnost, zkoušky prvků
- Posouzení ve fázi **výroby i provozu**
 - požadavky na výrobu, kontrolní procesy, konstrukční zásady...
- **Chybí normy**
 - ISO/ ASTM 52939:2023 Additive manufacturing for construction – obecné zásady
 - mimo rozsah *fib* MC 2020 i prEN 1992



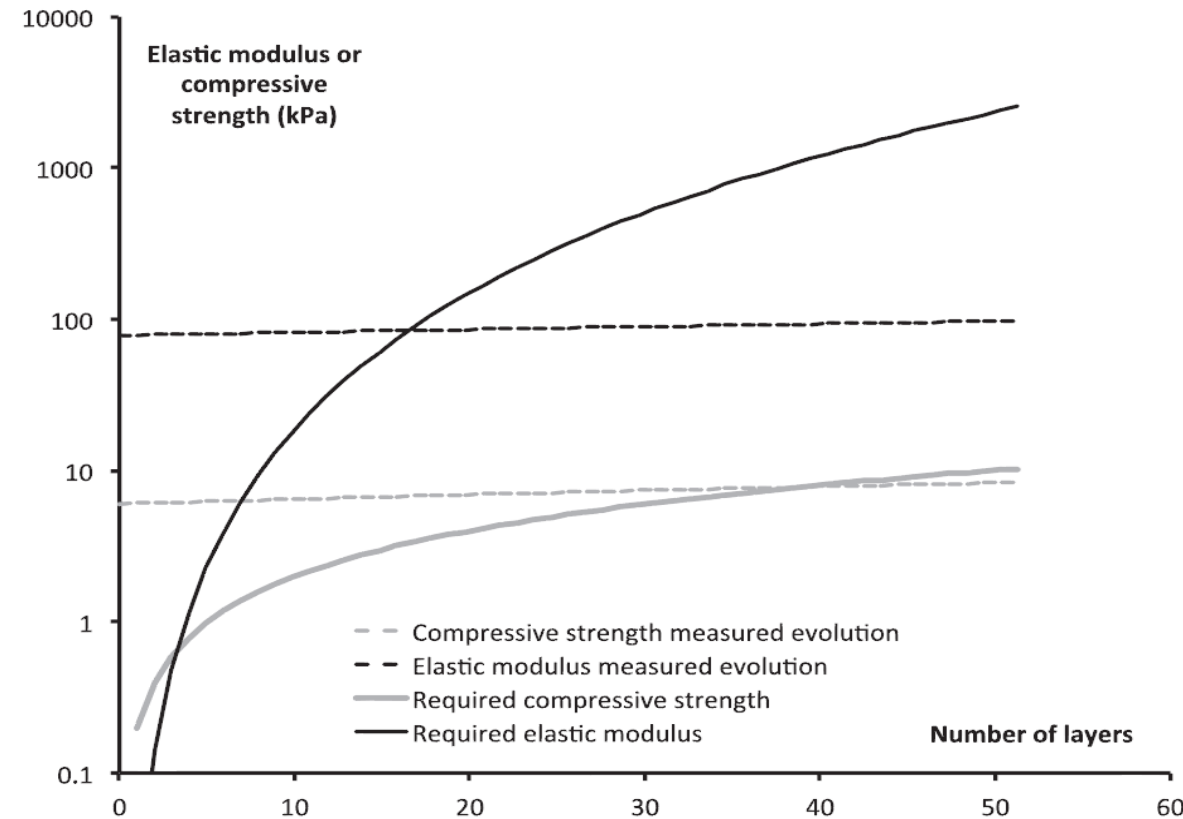
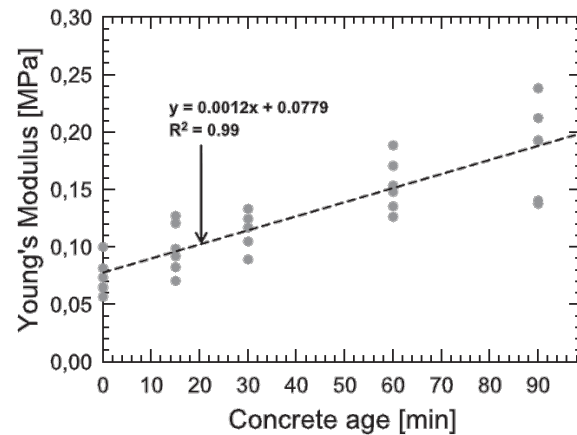
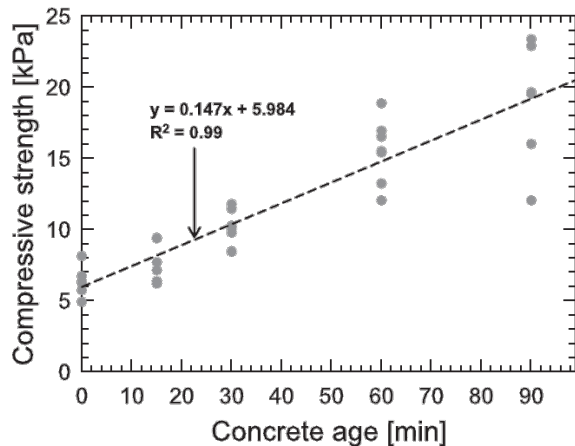


Spolehlivost ve fázi výroby ($t = 0$)



- Fáze výroby - fáze tuhnutí - pevnost vrstvy $f_c(t)$ versus tíha horních vrstev
- Rychlost nanášení vrstev x klimatické podmínky a tvar prvku
- Stabilita stěny

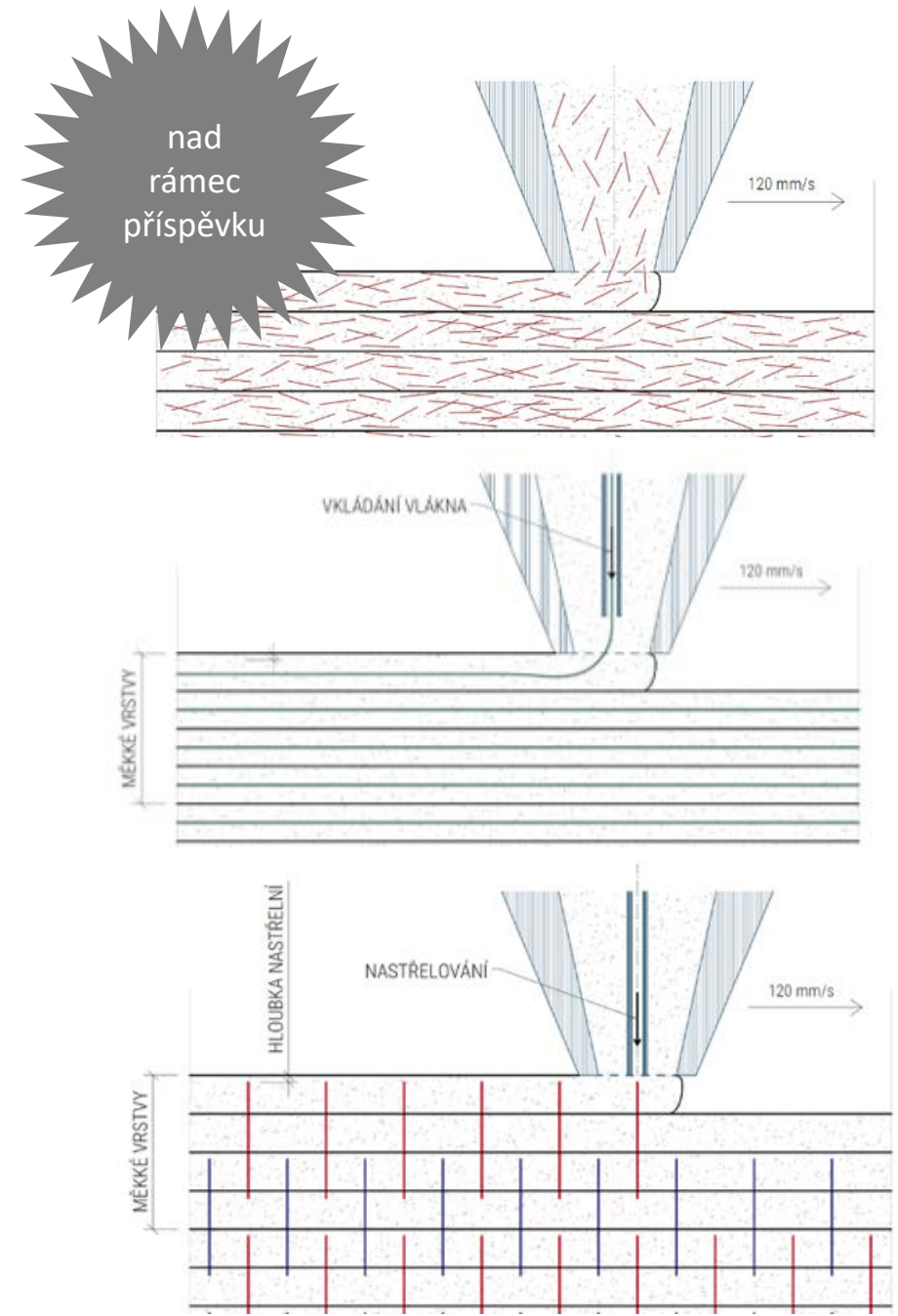
obtížné stanovit materiálové vlastnosti v raných fázích, jednotlivé vrstvy značně rozdílné mechanické vlastnosti - rozhoduje E_c





Možnosti vyztužování

- Vlákna – čedič, sklo, uhlík, PVA, ocelová vlákna
- Rozptýlená výztuž – nejlépe odpovídá technologii
- Odvíjení výztužného lana (kontinuální výztuž)
- Nastřelování výztuže
- Zabudovaná tahová výztuž (při tisku x předem)
- Dodatečné zesílení lepenou výztuží či sepnutím
- Hybridní vyztužení (kombinace metod)



Odvození dílčího součinitele γ_c

1. materiál

2. geometrie

3. modelová nejistota

monolitický beton

f_{c0} na zkušebních tělesech $V_{fc} = 10\%$

konverzní součinitel laboratoř \rightarrow beton v konstrukci ($\mu_\eta = 0.95, V_\eta = 12\%$)

plocha průřezu ($V_{Ac} \approx 5\%$)

Nejistota FEM pro odolnost ($V_{\theta R} = 10-15\%$)

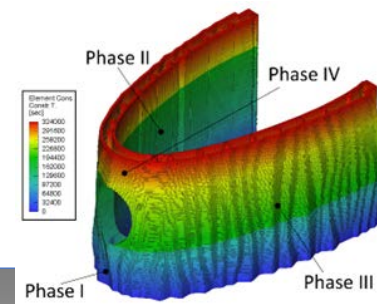
digitální beton

f_{c0} : $V_{fc0} = ???\%$,
potřeba zohlednit $E, f_{ct}, \varepsilon, \dots?$

vývoj v čase, vlivy smršťování a dotvarování na napjatost?

šířka stopy, odchylka od geometrie, kvalita provedení - $V_{Ac} = ???$

Nejistota modelu odolnosti $V_{\theta R} = ???$



Materiálové vlastnosti

Fyzikální vlastnosti

- Hustota
- Geometrie jednotlivých vrstev
- Tvar prvku
- Požární odolnost

Mechanické vlastnosti

- Pevnost v tlaku (i v t_0)
- Modul pružnosti (i v t_0)
- Tahová/ohybová pevnost
- Soudržnost jednotlivých vrstev
- Soudržnost výztuže a betonu

Vlastnosti ovlivňující trvanlivost

- Odolnost proti chloridům
- Karbonatace
- Mrazuvzdornost
- Vodonepropustnost

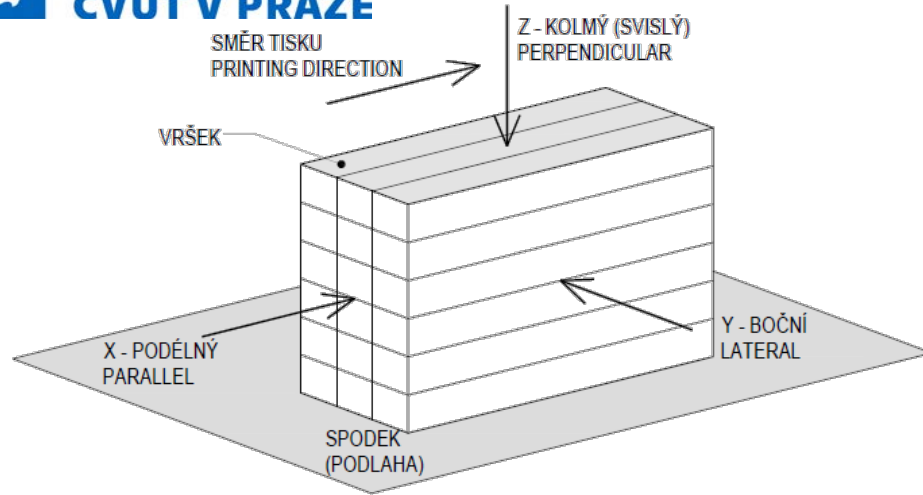
Reologické vlastnosti

- Smršťování
- Dotvarování

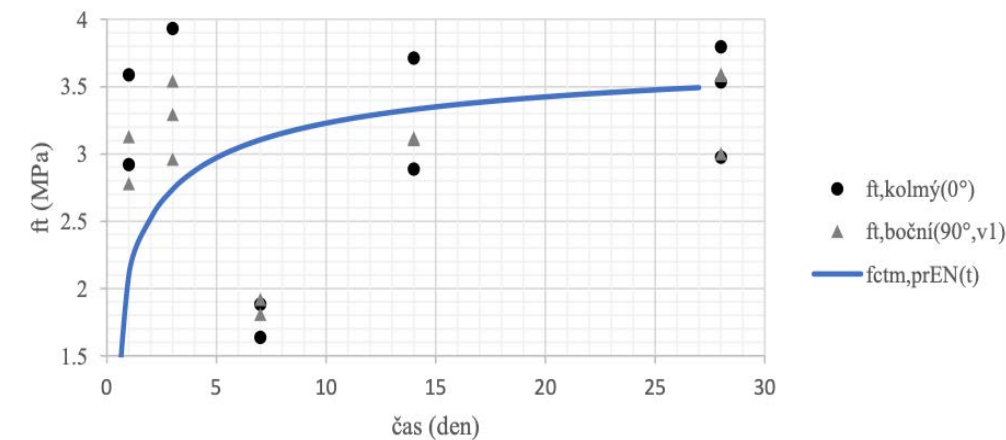
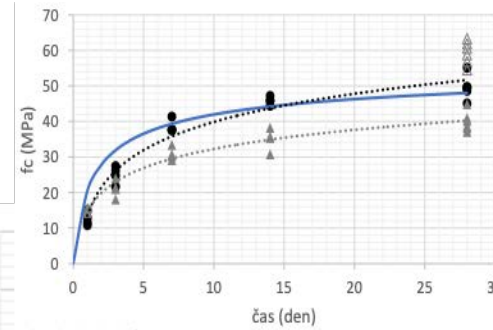
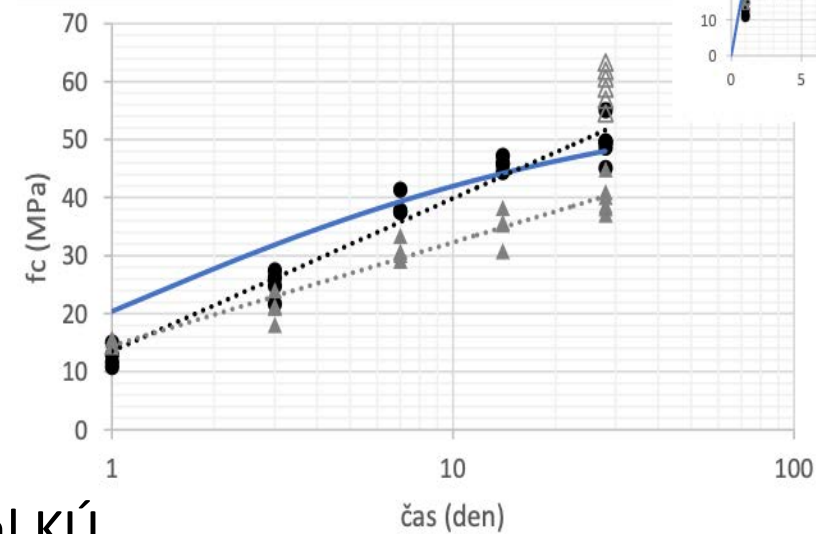
Nutno zjišťovat více vlastností,
snaha o odvození vztahů mezi vlastnostmi



Anizotropie – ortotropie



- příklad předběžných výsledků $f_c(t)$ a $f_{ct}(t)$ pro materiál KÚ bez vláken s urychlovačem
- pro $t \geq 3$ dny $f_{c,vodorovný} \approx f_{c,kolmý}$
 - vztah pro $f_{cm}(t)$ podle prEN 1992 hrubý odhad
- f_{ct} přibližně časově nezávislá, není významný vliv směru zatěžování
- porovnání výsledků s literaturou – částečná shoda v časových trendech, obdobné poměry f_{ct} / f_c
 - vliv materiálu, provádění i způsobu zkoušení





Parametry ovlivňující vlastnosti

- Směr a rychlost tisku, tvar
- Tloušťka stopy (šířka, výška)
- Planární x neplanární vrstvy
- Tisk in-situ x v laboratoři
- Úprava povrchu (hlazení...)
- Nevztužené x vztužené
- Převisy...



Kontrola kvality
výroby je zásadní!
Nedestruktivní zkoušky
finálních výrobků.

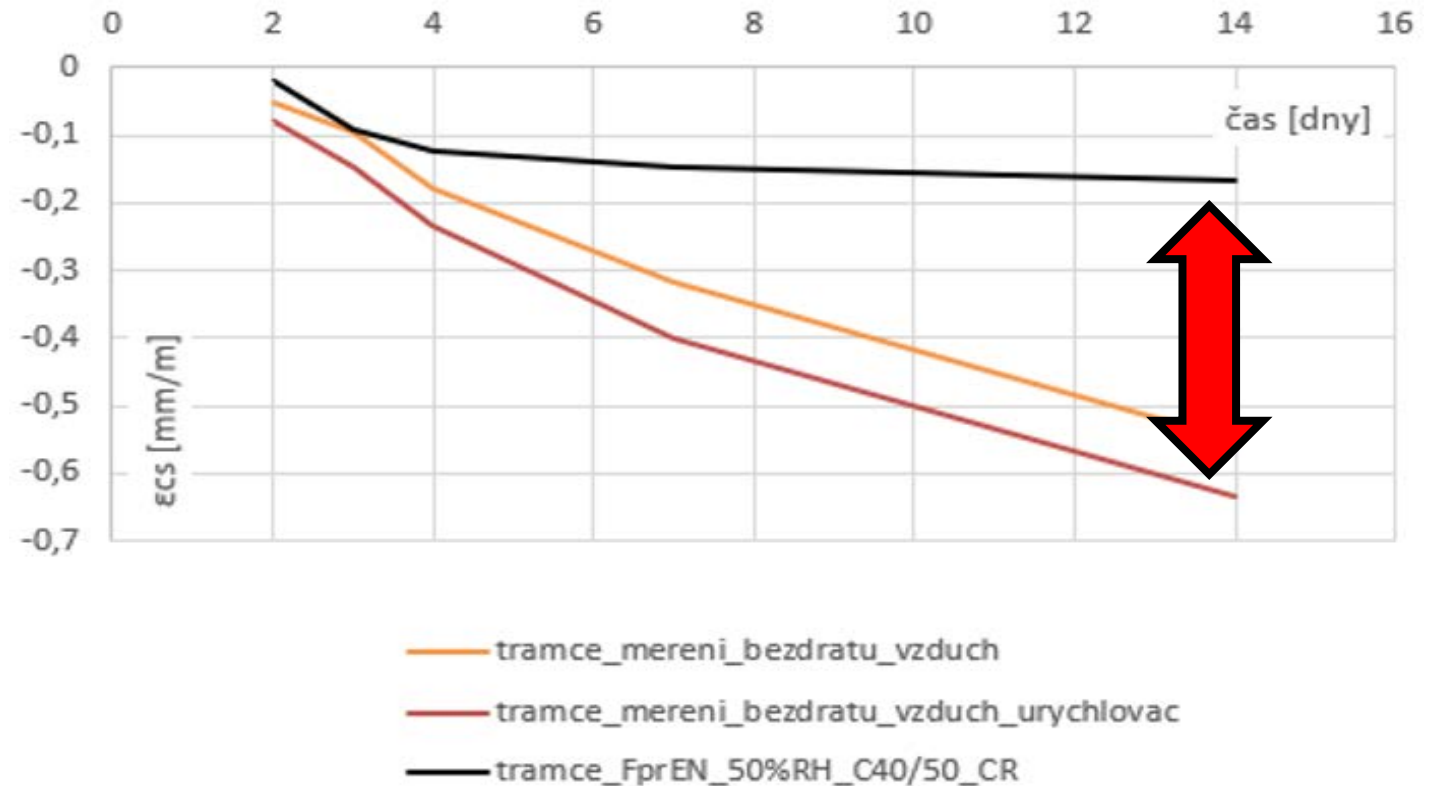


Smršťování

- jemnozrnný materiál
 - urychlovače tuhnutí a tvrdnutí
 - subtilní průřezy
- ⇒ cca 3x vyšší smršťování oproti běžným betonům



Smršťování trámce 500x100x100



Odvození dílčího součinitele γ_c

1. materiál

monolitický beton

f_{c0} na zkušebních tělesech $V_{fc} = 10\%$

konverzní součinitel laboratoř \rightarrow beton v konstrukci ($\mu_\eta = 0.95, V_\eta = 12\%$)

digitální beton

f_{c0} : $V_{fc0} = ???\%$,
potřeba zohlednit $E, f_{ct}, \varepsilon, \dots?$

vývoj v čase, vlivy smršťování a dotvarování na napjatost?

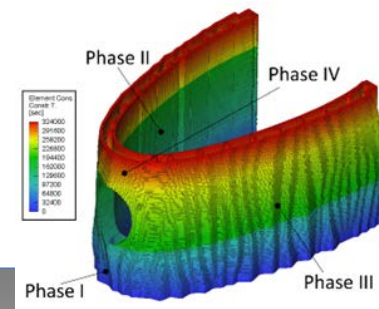
2. geometrie

plocha průřezu ($V_{Ac} \approx 5\%$)

šířka stopy, odchylka od geometrie, kvalita provedení - $V_{Ac} = ???$

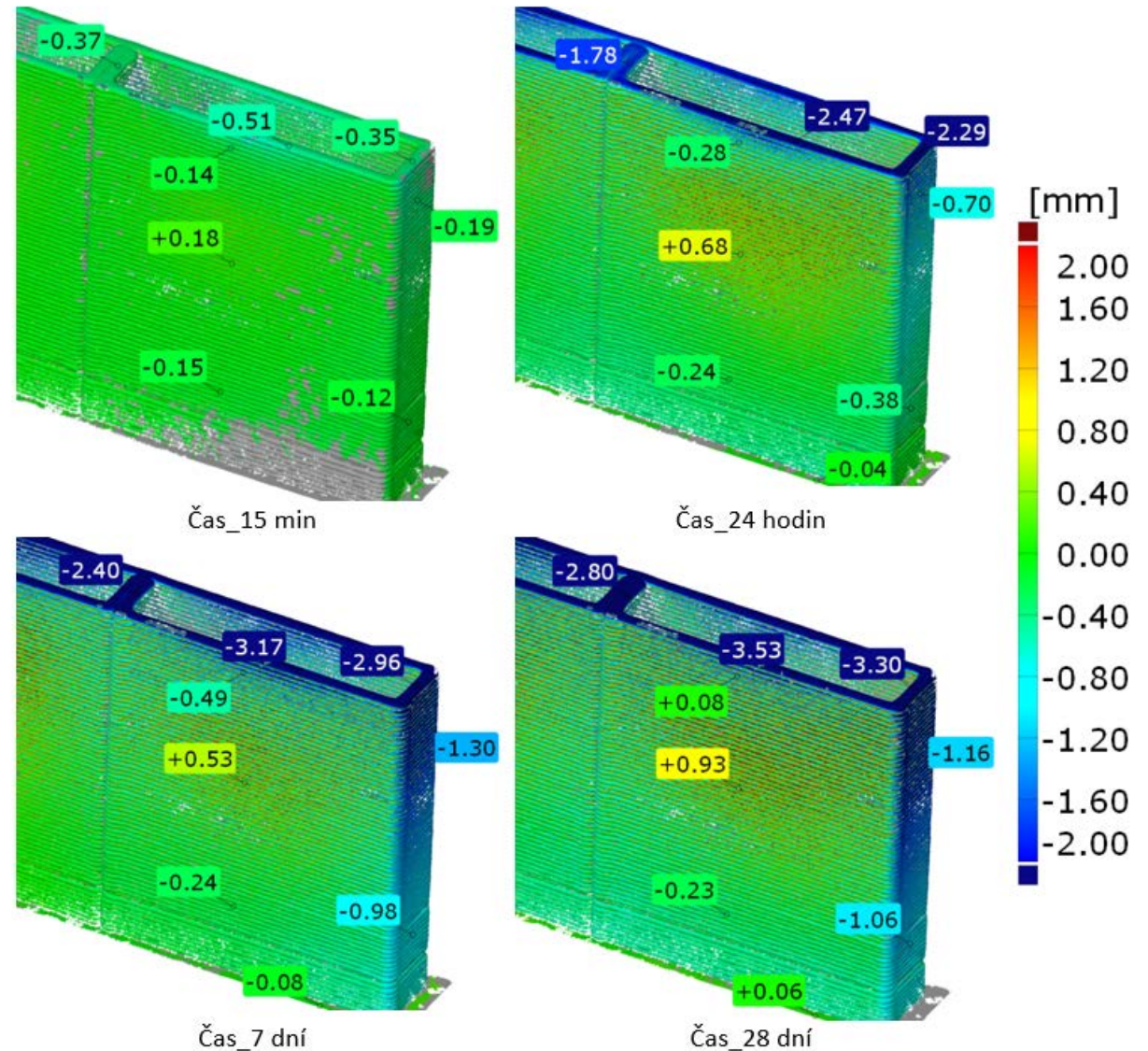
3. modelová nejistota

Nejistota FEM pro odolnost ($V_{\theta R} = 10-15\%$)



Nejistota modelu odolnosti $V_{\theta R} = ???$

- ihned po tisku, dále dle potřeby
- přesnost na desetiny mm
- porovnání vytištěného tvaru s digitální předlohou
- sledování plastických deformací vč. vlivu smrštění a dotvarování





Test štíhlého tištěného vzorku na vzpěrný tlak – vliv imperfekcí



stěna 146 x 580 mm, tloušťka 20 až 30 mm, štíhlost ≈ 80
krychelná $f_c \approx 60$ MPa, porušení při zatížení 65,2 kN ≈ 45 % Eulerova zatížení

Odvození dílčího součinitele γ_c

1. materiál

2. geometrie

3. modelová nejistota

monolitický beton

f_{c0} na zkušebních tělesech $V_{fc} = 10\%$

konverzní součinitel laboratoř → beton v konstrukci ($\mu_\eta = 0.95$, $V_\eta = 12\%$)

plocha průřezu ($V_{Ac} \approx 5\%$)

Nejistota FEM pro odolnost ($V_{\theta R} = 10-15\%$)

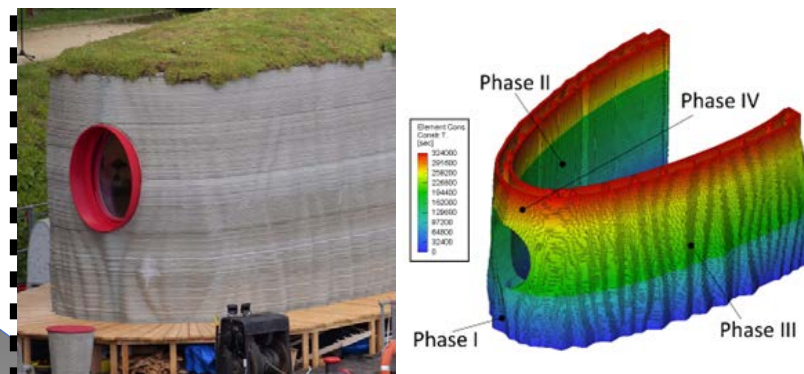
digitální beton

f_{c0} : $V_{fc0} = ???\%$,
potřeba zohlednit $E, f_{ct}, \varepsilon, \dots?$

vývoj v čase, vlivy smršťování a dotvarování na napjatost?

šířka stopy, odchylka od geometrie, kvalita provedení - $V_{Ac} = ???$

Nejistota modelu odolnosti $V_{\theta R} = ???$



Křehké porušení prvku v tlaku

- materiál s vysokou pevností je bez vyztužení **křehký**
 - z míst **koncentrace napětí** se šíří trhliny → křehké porušení
 - smrštění způsobuje tahová napětí
- nutno zohlednit při modelování zkoušky do porušení
- nepříznivý způsob porušení – požadavek na vyšší spolehlivost?





Speciální zkušební tělesa



- Jednoduchá zkušební tělesa menších rozměrů vhodná k provedení zkoušek s proměnnými parametry a sledování odezvy pro různé vstupní hodnoty (okrajové podmínky výroby, vyztužení, ...)
 - „Trámce“ - tah za ohybu, smršťování
 - „Sloup (dutý válec)“ - tlak
- Složitější tělesa pro ověření výpočtů a simulací, objemových změn, výrobních odchylek, atd.
 - „Hokejka (L)“

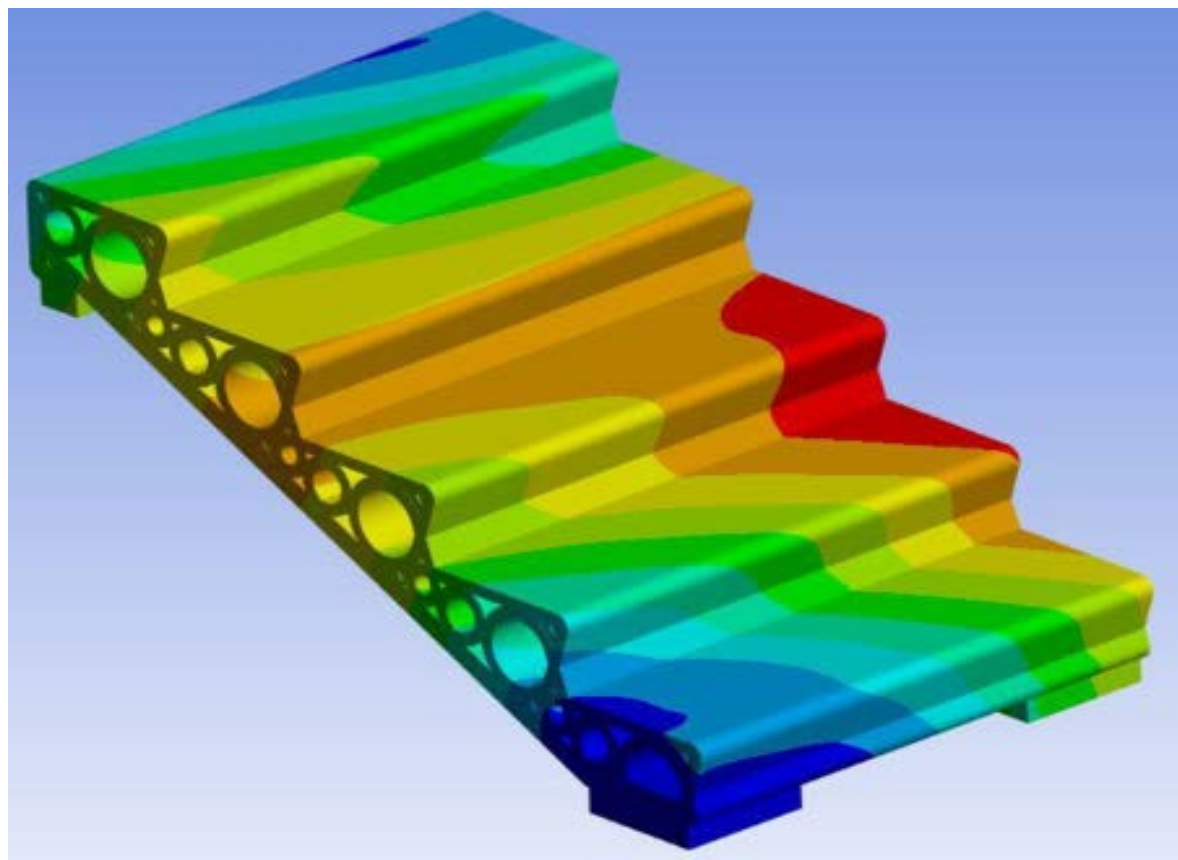


- Průkazní zkoušky destruktivní x nedestruktivní
- Ve světě zkušební tělesa: odlitá ve formě x tištěná x vyřezávaná z tištěného tělesa

Diskuze a závěrečné poznámky – hlediska spolehlivosti

- postihnout fázi výroby i provozu
- ohyb, smyk, kroucení, tlak / tah, stabilita, protlačení, lokální zatížení
- MSÚ
 - křehké porušení!
 - únavové namáhání
- MSP omezení šířky trhlin a průhybů
- smrštění a dotvarování
- pružná x nelineární analýza

Potřebné definovat
tolerance výroby a materiálu
→ uvážit ve výpočtu





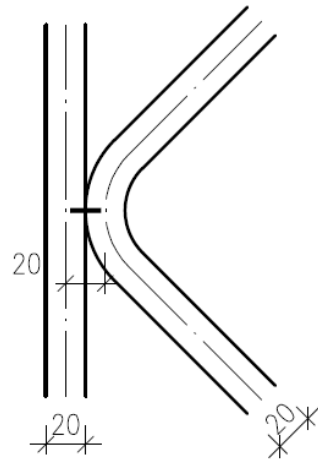
Požadavky na výrobu



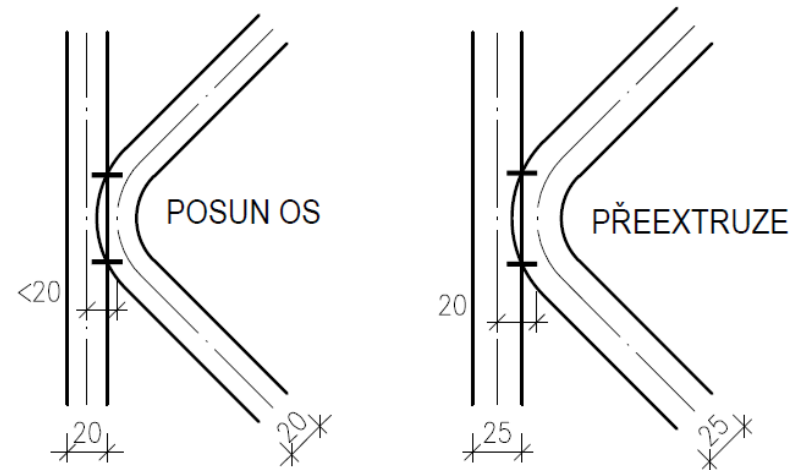
- Kontrolní procesy během výroby (výrobní odchylky)
- Zajištění provázání vrstev a projektovaného tvaru
- Konstrukční zásady vyztužování, krytí výztuže
- Opatření k omezení vlivu smršťování a k omezení křehkosti

DETAIL NAPOJENÍ

ŠPATNĚ PROVÁZANÉ VRSTVY

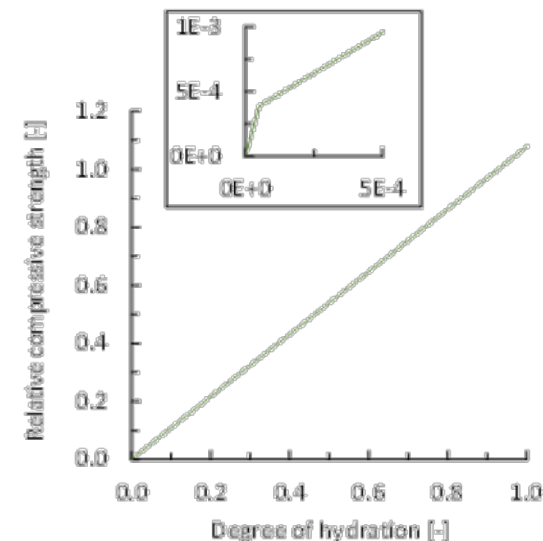
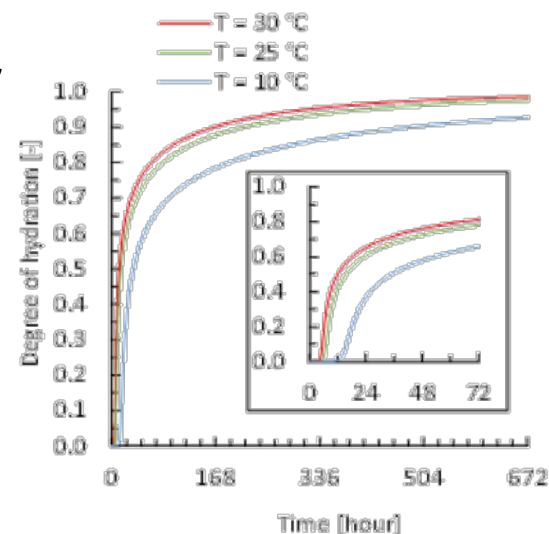


SPRÁVNĚ PROVÁZANÉ VRSTVY



Závěry

- **Kvalita** prvků vyrobených aditivní fabrikací silně závisí na interakci mezi vlastnostmi materiálu, návrhu, výrobního procesu a kontroly provádění
 - způsob tisku, rychlost tisku, tvar a vyztužování, objemové změny, klima atd.
 - tyto aspekty se mohou významně lišit v různých výrobních
- **Zásadní fáze výroby**
 - plastický materiál zatěžován tíhou vyšších vrstev
- **Spolehlivost při výrobě** – obtížné stanovit materiálové vlastnosti v raných fázích
 - jednotlivé vrstvy rozdílné mechanické vlastnosti
 - odhady s využitím stupně hydratace (?)



Závěry (2)

- ***Spolehlivost v provozu*** – velký vliv štíhlosti, tvaru odlišného od projektovaného, lokálních odchylek i křehkého tlakového porušení
- Nutnost vývoje ***pravidel pro:***
 - testování a kontroly materiálových a geometrických vlastností vzorků k zajištění požadované kvality
 - navrhování (charakteristické hodnoty, dílčí součinitele, konstrukční opatření atd.)
- ***Další výzkum:***
 - odhad pevnosti na základě složení a způsobu tisku (?)
 - vztahy mezi f_{ct} a f_c , lomovou energií a dalšími materiálovými vlastnostmi

DĚKUJEME ZA POZORNOST!

Příspěvek byl vypracován za
podpory TA ČR, grant FW06010422
*Simulace a navrhování konstrukcí z
digitálního betonu* (Červenka
Consulting, TU Liberec, ČVUT).



**KLOKNERŮV
ÚSTAV
ČVUT V PRAZE**

TUL 70

