



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

## VLIV VLHKOSTI LEHKÉHO KAMENIVA NA VLASTNOSTI BETONU

THE INFLUENCE OF MOISTURE OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE ON THE CONCRETE  
PROPERTIES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Pešek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB, Ph.D.

BRNO 2020



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav stavebního zkušebnictví

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Lukáš Pešek
<b>Název</b>	Vliv vlhkosti lehkého kameniva na vlastnosti betonu
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2019
<b>Datum odevzdání</b>	5. 6. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

---

doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

Neville, A. M.: Properties of concrete.

Newman, J.; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Processes.

Newman, J.; Choo, B. S.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.

Neville, A. M.; Brooks, J. J.: Concrete technology.

Colleparidi, M.: Moderní beton.

Schmidt, P. a kol.: Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2001.

Odborné tuzemské i zahraniční články pojednávající o zadané problematice.

Všechny toho času platné normy (včetně změn a doplňků), zejména s přihlédnutím k ČSN EN 206+A1, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, ČSN ISO 1920-10, k řadě ČSN EN 12350 a ČSN EN 12390.

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Teoretická část: rešerše pramenů – ve zkratce základní informace o betonu a kamenivu, podrobněji rozebrat problematiku lehkých betonů a lehkých kameniv. Dále popsat vlastnosti betonu a způsoby jejich stanovení s důrazem na metody v bakalářské práci využití.

Praktická část: zpracování plánu experimentu – sledování vlivu vlhkosti lehkého kameniva na vybrané parametry betonu z něho vyrobeného. V práci budou použity dva vstupní vlhkostní stavy kameniva. Provedení zkoušek za účelem stanovení základních charakteristik lehkého betonu, dále zpracování výsledků zkoušek, jejich vyhodnocení včetně statistických údajů a formulace vyplývajících závěrů.

Práci se zkušebními lisy a zařízeními provede osoba k tomu oprávněná.

## **STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá sledováním vlivu vlhkosti lehkého kameniva na vlastnosti ztvrdlého betonu. V rámci experimentu byla odzkoušena zkušební tělesa ze dvou různých lehkých betonů, a dvou různých vstupních vlhkostních stavů lehkého kameniva. Zkoušky byly provedeny za účelem stanovení základních charakteristik lehkého betonu po 7, 28 a 90 dnech zrání. Na zkušebních tělesech tvaru krychle se prováděly zkoušky pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu a hloubky průsaku tlakovou vodou. Na zkušebních tělesech tvaru hranolu se prováděly zkoušky dynamického modulu pružnosti a pevnosti v tahu ohybem. Výsledky zkoušek jsou zpracovány a vyhodnoceny do tabelární a grafické podoby pro stanovení statistických údajů a zformulování závěru.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Lehký beton, lehké kamenivo, vlhkost kameniva, pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem, pevnost v příčném tahu, nedestruktivní zkoušení, dynamický modul pružnosti, samozhutnitelný beton

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the influence of moisture of lightweight aggregate on the concrete properties. In the experiment, test specimens from two different lightweight aggregate, and two different input moisture states of lightweight aggregate were tested. The tests were performed to determine the basic properties of lightweight concrete after 7, 28 and 90 days of maturing. Compressive strength, tensile splitting strength and depth of penetration of water under pressure were determined on cubic specimens. On the test prisms were performed tests to determine the flexural strength and dynamic modulus of elasticity. The results were processed and evaluated in tabular and graphical form to determine statistical data and formulate a conclusion.

## **KEYWORDS**

Lightweight concrete, lightweight aggregate, moisture of aggregate, compressive strength, flexural strength, tensile splitting strength, non-destructive testing, dynamic modulus of elasticity, self-compacting concrete

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Lukáš Pešek *Vliv vlhkosti lehkého kameniva na vlastnosti betonu*. Brno, 2020. 66 s., 15 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vliv vlhkosti lehkého kameniva na vlastnosti betonu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 5. 6. 2020

---

Lukáš Pešek  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vliv vlhkosti lehkého kameniva na vlastnosti betonu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 6. 2020

---

Lukáš Pešek  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Daliboru Kocábovi, Ph.D. za jeho hodnotné rady, připomínky a trpělivost při zpracovávání mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Svoboda a syn, s.r.o. a zejména pak Ing. Martinu Lišovskému a Ing. Věře Sikorové za spolupráci při výrobě zkušebních těles.

Poděkovat bych chtěl i svým přátelům a rodině, kteří mi umožnili zde studovat a byli mi po celou dobu oporou.

*Tato bakalářská práce byla zpracována v rámci řešení projektu č. FV30247 „Vývoj a ověření technologie urychleného předmáčení lehkého umělého kameniva v praktických podmínkách při výrobě lehkého konstrukčního transportbetonu“, podporovaného Ministerstvem průmyslu a obchodu.*

# OBSAH

## ÚVOD

## CÍL PRÁCE

<b>A. TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	13
<b>A.1 BETON</b> .....	13
<b>A.1.1</b> Rozdělení betonů.....	13
<b>A.1.2</b> Hlavní složky betonu .....	17
<b>A.1.3</b> Lehký beton .....	20
<b>A.1.4</b> Lehké kamenivo.....	23
<b>A.1.5</b> Problematika lehkých betonů a kameniv .....	27
<b>A.2 VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ BETONU</b> .....	28
<b>A.2.1</b> Objemová hmotnost .....	28
<b>A.2.2</b> Konzistence čerstvého betonu .....	29
<b>A.2.1</b> Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou.....	30
<b>A.2.2</b> Pevnost.....	30
<b>A.2.3</b> Dynamický modul pružnosti.....	32
<b>B. PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	36
<b>B.1 POPIS EXPERIMENTU</b> .....	36
<b>B.2 ZKUŠEBNÍ TĚLESA</b> .....	36
<b>B.2.1</b> Výroba zkušebních těles .....	36
<b>B.2.2</b> Vlastnosti čerstvého betonu .....	38
<b>B.2.3</b> Ošetřování a skladování zkušebních těles .....	39
<b>B.3 MĚŘENÍ A ZKOUŠENÍ TĚLES</b> .....	40
<b>B.3.1</b> Objemová hmotnost .....	41
<b>B.3.2</b> Hloubka průsaku tlakovou vodou.....	41
<b>B.3.3</b> Pevnost v příčném tahu .....	42
<b>B.3.4</b> Pevnost v tlaku.....	43
<b>B.3.5</b> Pevnost v tahu ohybem .....	44
<b>B.3.6</b> Dynamický modul pružnosti.....	45
<b>B.4 VADY ZKUŠEBNÍCH TĚLES</b> .....	47
<b>B.5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH DISKUZE</b> .....	48
<b>B.6 ZÁVĚR</b> .....	58
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	59
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK</b> .....	61

<b>SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ</b> .....	63
<b>SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK</b> .....	65
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	66

## ÚVOD

Lehký beton se ve stavebnictví začíná používat čím dál častěji, a to nejen z důvodů nízké objemové hmotnosti, výhodnějších některých fyzikálně-mechanických vlastností oproti obyčejnému betonu a dobrých tepelně izolačních vlastností, ale i kvůli použití kameniva z recyklovaných materiálů namísto přírodního kameniva, kterého se ve stavebnictví využívá neustále velmi vysoké množství.

Vliv vody u lehkých kameniv je jedním z nejdůležitějších faktorů při výrobě lehkých betonů. Lehká kameniva mají na rozdíl od hutných kameniv vyšší pórovitost a nasákavost. Nejsou-li ale ve stavu plného nasycení, mají tendenci odebírat vodu z čerstvého betonu. To může podstatně zhoršit konzistenci a zpracovatelnost čerstvého betonu, ba dokonce i snížit pevnost ztvrdlého cementového tmelu, z důvodů jeho zvyšující se porozity. Nasákavost lehkého kameniva lze redukovat jeho předvlhčením. Plně nasytit vysoce nasákové kamenivo za normálního tlaku však může trvat i několik měsíců, proto má velký význam vývoj technologie urychleného předmáčení lehkého kameniva pod tlakem.

Tato práce se zabývá zkoušením lehkého betonu, k jehož výrobě bylo použito v prvním případě podtlakově nasycené a ve druhém případě suché lehké kamenivo (agloporit), a sledováním vybraných parametrů betonu.

## CÍL PRÁCE

Cílem teoretické části práce je rešerše pramenů o betonu, zejména lehkém betonu, lehkém kamenivu a jejich problematice. Dále bylo cílem popsat vlastnosti betonu a způsoby jejich stanovení s důrazem na metody v bakalářské práci použité.

Cílem praktické části je sledování vlivu vlhkosti lehkého kameniva na vybrané parametry betonu z něho vyrobeného. V rámci práce byl proveden experiment, který sledoval vývoj dynamických, trvanlivostních a pevnostních vlastností dvou betonů (transportbeton a samozhutnitelný beton), při jejichž výrobě byly použity dva vstupní vlhkostní stavy lehkého kameniva. Sledované parametry betonu byly stanoveny po 7, 28 a 90 dnech jeho zrání. První část experimentu proběhla na krychlích o hraně 150 mm, na kterých byly stanoveny hloubky průsaku tlakovou vodou, objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku a pevnosti v příčném tahu. Ve druhé části experimentu se provádělo zkoušení na hranolech 100x100x400 mm ultrazvukovou a rezonanční metodou za účelem stanovení dynamického modulu pružnosti, a stanovení pevnosti v tahu ohybem. Výsledky zkoušek byly zpracovány a vyhodnoceny do tabelární a grafické podoby pro stanovení statistických údajů a zformulování závěru.

# A. TEORETICKÁ ČÁST

## A.1 BETON

Beton je dnes jedním z nejdůležitějších stavebních materiálů. Prosadil se v nejrůznějších oborech stavebnictví a do značné míry je dnes využíván více než materiály jako např. kámen, cihlu a v určitých ohledech i dřevo a ocel [1].

Beton je uměle vytvořený kompozitní materiál vznikající tuhnutím a tvrdnutím směsi pojiva (převážně cementu), plniva (písky, šterky, drtě), vody, případně přísad a příměsí pro zlepšení jeho vlastností.

Spojením cementu a vody vzniká cementová matrice, která obaluje a spojuje jednotlivá zrna kameniva, a zároveň aktivuje hydrataci. Hydratace cementu je souhrn chemických reakcí cementu a vody, díky nimž beton přechází z plastické hmoty (tuhnutí), která je snadno zpracovatelná, do materiálu podobnému hornině a následně nabývá na pevnosti a odolnosti (tvrdnutí) [2].

### A.1.1 Rozdělení betonů

- **Podle druhu použitého pojiva:** Betony se vyrábí s cementy různých druhů a vlastností. Při vyslovení pojmu beton bez přesnějšího určení pojiva se předpokládá beton cementový. Dalšími pojivy mohou být: sádra, vápno, živice, polymery, hlinitanový cement, případně jemně mletá vysokopevnostní struska a elektrárenský popílek jsou-li alkalicky aktivovány [3].
- **Podle způsobu vyztužení:**
  - *Prostý beton* – bez výztuže,
  - *Vláknobeton* – obsahuje rozptýlená vlákna (omezení vzniku trhlin),
  - *Drátkobeton* – obsahuje rozptýlené drátky (omezení vzniku trhlin, v určitých případech nahrazuje klasickou betonářskou výztuž),
  - *Železobeton* – vyztužený betonářskou ocelí,
  - *Předpjatý beton* – obsahuje předepjatou výztuž [4].

- **Podle způsobu výroby:**
  - *Monolitický* – vyrobený a ošetřovaný na staveništi přímo do bednění,
  - *Prefabrikovaný* – vyrobený a ošetřovaný na jiném místě, než je jeho konečné použití [3].
  
- **Podle zpracování čerstvého betonu:**
  - *Betony vibrované,*
  - *Betony dusané,*
  - *Betony lité,*
  - *Betony stříkané,*
  - *Betony válcovité,*
  - *Betony vibrolisované,*
  - *Betony odsávané (vakuované),*
  - *Betony čerpané* [3].
  
- **Podle funkce v konstrukci:**
  - *Konstrukční* – nosný beton,
  - *Výplňový* – nenosný beton,
  - *Tepelně izolační* – nízký součinitel tepelné vodivosti (lehké betony) [4].
  
- **Podle speciálních vlastností:**
  - *Vodostavební beton* – maximální průsak menší než 50 mm,
  - *Mrazuvzdorný beton* – odolává účinkům střídavého zmrazování a rozmrazování,
  - *Samozhutnitelný beton (SCC)* – odolný proti segregaci, takže je ukládán bez zhutňování (zhutňuje se vlastní tíhou),
  - *Vysokopevnostní beton (HSC)* – pevnostní třída vyšší než C 50/60 pro obyčejný a těžký beton a LC 50/55 pro lehký beton,
  - *Vysokohodnotný beton (HPC)* – vyšší pevnostní třída než C 105/115,
  - *Ultravysokohodnotný beton (UHPC)* – válcová pevnost vyšší než 150 MPa s uvažovanou životností přes 200 let,

- *Reaktivní práškový beton (RPC)* – velmi jemnozrnný beton s vysokým obsahem ocelových nebo organických vláken s pevností v tlaku pohybující se okolo až 200 MPa,
  - *Ohnivzdorný beton* – odolává teplotám do 600 °C díky přidání vodního skla nebo fluorokřemičitanu sodného,
  - *Žárovzdorný beton* – odolává teplotám i vyšším než 1500 °C. K výrobě se používá hruběji mletý vysokopeční cement [3].
- **Podle objemové hmotnosti po vysušení (ČSN EN 206+A1 [5]):**
    - *Lehké betony* –  $800 \leq D \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ ,
    - *Obyčejné betony* –  $2000 \leq D \leq 2600 \text{ kg/m}^3$ ,
    - *Těžký beton* –  $D > 2600 \text{ kg/m}^3$  [5].
- **Podle stupně vlivu prostředí (ČSN EN 206+A1 [5], tab.1):**
    - *X0* – bez nebezpečí koroze nebo narušení,
    - *XC1-XC4* – Koroze vlivem karbonatace,
    - *XD1-XD3* – Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody,
    - *XS1-XS3* – Koroze vlivem chloridů z mořské vody,
    - *XF1-XF4* – Střídavé působení mrazu a rozmrazování,
    - *XA1-XA3* – Chemické působení [5].
- **Podle konzistence čerstvého betonu (ČSN EN 206+A1 [5], tab. 3-6):**
    - *S1-S5* – Klasifikace konzistence podle sednutí kužele – tab. 3,
    - *C0-C4* – Klasifikace konzistence podle zhutnitelnosti – tab. 4,
    - *F1-F6* – Klasifikace konzistence podle rozlití – tab. 5,
    - *SF1-SF3* – Klasifikace konzistence podle sednutí-rozlitím (klasifikace je určena pro SCC) – tab. 6 [5].

- **Podle třídy ztvrdlého betonu (ČSN EN 206+A [5], tab. 12 a 13):** Pokud se beton klasifikuje podle pevnosti v tlaku, platí pro obyčejný a těžký beton tabulka 12, viz Tab. 1, pro lehký beton tabulka 13, viz Tab. 2. Pro klasifikaci se použije charakteristická pevnost v tlaku zjištěná na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm ve stáří 28 dnů nebo charakteristická pevnost v tlaku zjištěná na krychlích o hraně 150 mm ve stáří 28 dnů a zkoušena podle ČSN EN 12390 3 [5].

Tab. 1: Třídy pevnosti v tlaku obyčejného a těžkého betonu [5]

Třída pevnosti v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimální charakteristická krychelná pevnost $f_{ck,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Tab. 2: Třídy pevnosti v tlaku lehkého betonu [5]

Třída pevnosti v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimální charakteristická krychelná pevnost $f_{ck,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

## A.1.2 Hlavní složky betonu

**CEMENT** - plní v betonu funkci pojiva. Smícháním s vodou vzniká cementový tmel, který postupně tuhne, tvrdne a mění se v cementový kámen. Tento proces může probíhat na vzduchu i pod vodou. Po zatvrdnutí si cement zachovává svoji pevnost a stálost, a to nejen ve vyschlém stavu, ale i při dlouhodobé expozici ve vodě (cement je výrazně hydraulickým pojivem) [4].

Kvalita cementové matrice závisí zejména na poměru vody a cementu, které jsou použity pro přípravu pasty: použití menšího množství vody vzhledem k cementu, tedy nízkého vodního součinitele, je nezbytným předpokladem pro získání matrice s vysokými hodnotami fyzikálně mechanických vlastností [2].

Protože cementy nejsou stejné, je třeba je klasifikovat na základě jejich vlastností a jejich složení [2]. Proto byla přijata nová norma pro cementy ČSN EN 197-1 [6] pro jednotnou klasifikaci pro všechny země EU.

- **Druhy cementů:**

- CEM I – Portlandský (I)
- CEM II – Portlandský směsný (II)
  - Portlandský struskový (II/A-S, II/B-S)
  - Portlandský s křemičitým úletem (II-A/D)
  - Portlandský pucolánový (II-A/P, II-B/P, II-A/Q, II-B/Q)
  - Portlandský popílkový (II-A/V, II-B/V, II-A/W, II-B/W)
  - Portlandský s kalcinovanou břidlicí (II-A/T, II-B/T)
  - Portlandský s vápencem (II-A/L, II-B/L)
- CEM III – Vysokopeční (III-A, III-B, III-C)
- CEM IV – Pucolánový (IV-A, IV-B)
- CEM V – Směsný (V-A, V-B) [5].

**Třídy pevnosti cementů:** Jsou dány nejnižší pevností v tlaku zjištěné na zlomcích trámečků 40x40x160 mm po zkoušce tahu ohybem po 28 dnech [3]. Pevnostní třídy tedy máme: 32,5N; 32,5R; 42,5N; 42,5R; 52,5N; 52,5R, kde čísla určují minimální tlakovou pevnost malty vyjádřenou v MPa a písmeno R (Rapid = rychlý) označuje pouze vyšší předepsané pevnosti ve stáří 2 dnů. Naproti tomu požadavky na 28denní pevnost jsou pro obě třídy (R i N) stejné [2].

**KAMENIVO** - plní funkci pevné kostry v betonu, na kterou je obecně kladen požadavek minimální mezerovitosti (zaujímá 75 až 80 % objemu betonu), tedy požadavek na ideální křivku zrnitosti. Vlastnosti kameniva mají také velký vliv na trvanlivost betonu a ostatní mechanicko-fyzikální vlastnosti betonu [4].

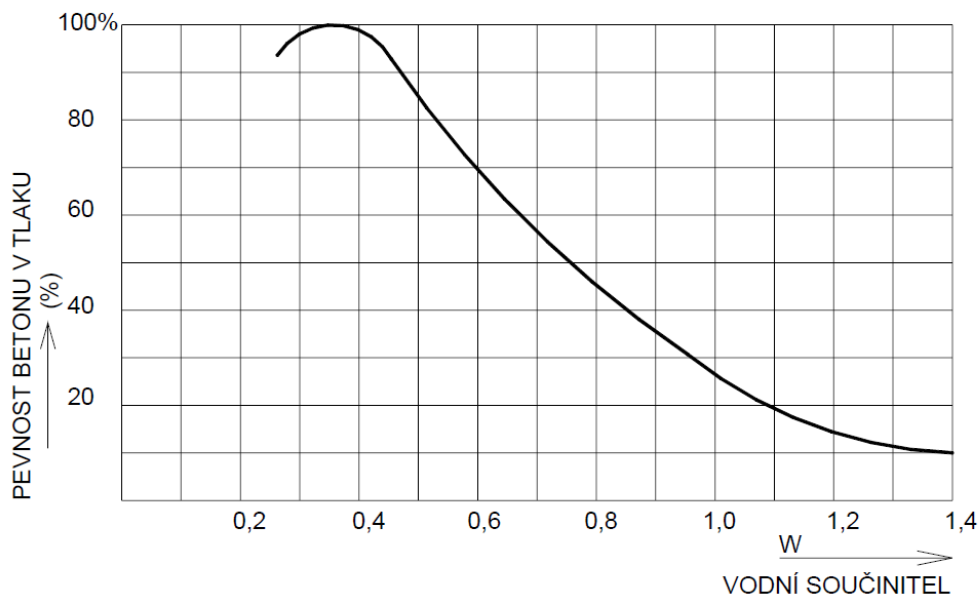
Kamenivo, které použijeme k výrobě čerstvého betonu, musí být pevné, musí vzdorovat účinkům povětrnosti, změnám teplot, vlhkosti, a nesmí obsahovat žádné látky (chloridy, sírany, jíly, organické látky), které by narušovaly tvrdnutí, omezovaly jeho pevnost nebo narušovaly vloženou výztuž. Jinak musí být kamenivo tvořeno zrnem vhodného tvaru a velikosti, aby bylo možno ze směsí připravit snadno zpracovatelný čerstvý beton [1].

Vhodnost kameniva pro výrobu betonu podle ČSN EN 206+A1 [5] se obecně prokazuje pro hutné a těžké kamenivo podle ČSN EN 12620+A1 [7] a pro pórovité kamenivo podle ČSN EN 13055-1 [4].

**VODA** - pro vlastní hydratační proces je třeba cca 20-25 % vody z hmotnosti cementu, kdy je tato voda spotřebována na úplnou hydrataci cementu, dalších zhruba 15 % je fyzikálně vázána ve ztvrdlém betonu [3].

Bez vody by nebylo betonu, protože cement by nehydratoval, a tedy ani netvrdnul, ovšem přebytek by způsobil snížení kvality betonu, jak co se týká pevností, tak trvanlivosti. Ve skutečnosti nesnižuje pevnost a trvanlivost betonu přídavek vody sám o sobě, ale narůstající vodní součinitel, viz Obr. 1 [2]. Vodní součinitel je poměr účinného obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu [5].

Voda musí odpovídat požadavkům ČSN 73 2028 [8], musí být čistá a musí mít vlastnosti, které nenaruší hydratační proces [1]. Nesmí obsahovat organické látky, jako huminové kyseliny, rašelinu, tuky, oleje a fenolické látky [3].



Obr. 1: Závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli w/c [3]

### A.1.3 Lehký beton

Jednou z nevýhod betonu je velká objemová hmotnost, s níž souvisí špatná tepelná a zvuková izolační schopnost. Tyto nepříznivé vlastnosti jsou u lehkých betonů podstatně lepší; jejich nevýhodou je však podstatně menší pevnost v tlaku [1].

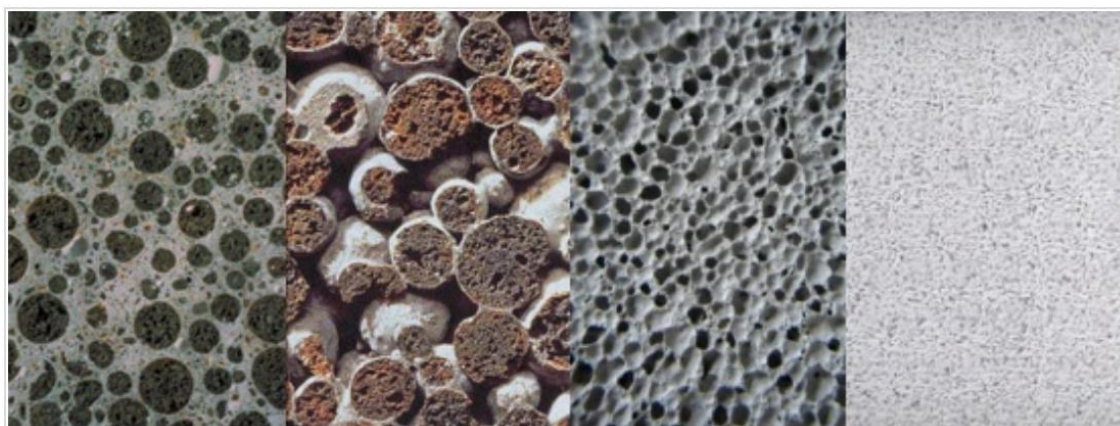
Lehké betony mají své kořeny již v antickém období cca v období 3000 let př. n. l., kdy v éře Harappské civilizace byla vybudována slavná města Mohenjo-Daro a Harappa, při jejichž výstavbě používali kamenivo sopečného původu (pemza). První zmínky v Evropě sahají dva tisíce let zpátky do Říma při stavbě Pantheonu. Kamenivo zde bylo ručně tříděno pro dosažení nižší objemové hmotnosti betonu [9]. Až v roce 1918 Stephen J. Hayde zavedl technologii expandace břidlic a patentoval si kamenivo „Haydite“. Obecně lze ale považovat za průkopníky výroby tohoto typu kameniva Dánsko, kde byla v roce 1939 založena továrna poblíž Kalundborgu [9]. Rozvoj této výroby se do Československa dostal až v 60. letech 20. století kvůli omezené dostupnosti lehkého přírodního kameniva.

Lehký beton je zvláštní beton, jehož objemová hmotnost po vysušení v sušárně se pohybuje podle normy ČSN EN 206+A1 [5] v rozmezí 800 až 2000 kg/m<sup>3</sup> [5].

Vylehčení je možné dosáhnout:

- Využitím mezerovitosti plniva – betony mezerovité
- Zvýšením pórovitosti plniva – nepřímo lehčené betony
- Vytvořením pórů přímo ve vyráběné hmotě – přímo lehčené betony (pórobetony), viz Obr. 2 [1].

Jednotlivé způsoby lze vzájemně kombinovat, takže vlastnosti vyráběných materiálů se mohou v širokém rozmezí měnit [1].



Obr. 2: Druhy lehkých betonů (zleva: hutný, mezerovitý, pěnobeton, pórobeton) [10]

Z hlediska funkce lze lehké betony rozdělit na:

- Konstrukční – hlavní je nosnost při nízké objemové hmotnosti, tlaková pevnost 18-70 MPa, objemová hmotnost 1400-2000 kg/m<sup>3</sup>
- Konstrukčně izolační – využívá se nosné i izolační funkce, tlaková pevnost 7-18 MPa, objemová hmotnost 800-1400 kg/m<sup>3</sup>
- Tepelně izolační – hlavní jsou tepelně izolační vlastnosti, tlaková pevnost 0,5-7 MPa, objemová hmotnost 300-800 kg/m<sup>3</sup> [2].

Lehký beton dále norma ČSN EN 206+A1 [5] klasifikuje podle objemové hmotnosti zkoušené podle ČSN EN 12390-7 [11]:

- D 1,0:  $800 \leq D \leq 1000 \text{ kg/m}^3$
- D 1,2:  $1000 < D \leq 1200 \text{ kg/m}^3$
- D 1,4:  $1200 < D \leq 1400 \text{ kg/m}^3$
- D 1,6:  $1400 < D \leq 1600 \text{ kg/m}^3$
- D 1,8:  $1600 < D \leq 1800 \text{ kg/m}^3$
- D 2,0:  $1800 < D \leq 2000 \text{ kg/m}^3$  [5].

**BETONY MEZEROVITÉ** – vylehčení mezerovitých betonů docílíme použitím kameniva pouze úzkých hrubších frakcí. Vynecháním drobných frakcí se dosáhne toho, že jednotlivá zrna kameniva jsou obalena pouze tenkou vrstvou malty, která je vzájemně spojuje jen v jednotlivých místech dotyku. Vznikne tak kavernovitá struktura betonu a jeho objemová hmotnost se tím sníží. Množství spojovací malty musí být proto takové, aby právě stačilo k obalení zrn kameniva, aniž by došlo k zalití dutin mezi zrny. Použité kamenivo může být přírodní hutné i pórovité [1].

Již zaniklá norma ČSN 73 2402 [12] (Provádění a kontrola konstrukcí z lehkého betonu z umělého pórovitého kameniva) klasifikovala lehké mezerovité betony. Tato norma od roku 2004 neplatí a v současné době neexistuje norma, která by zahrnovala lehké mezerovité betony. Pro tento účel lze použít normu ČSN EN 1520 [13] (Prefabrikované vyztužené dílce z mezerovitého betonu z pórovitého kameniva), která velmi dobře klasifikuje lehký mezerovitý beton a jeho základní vlastnosti, bohužel ale platí pouze pro prefabrikované konstrukce [9].

**PÓROBETONY** – vyrábějí se tak, že se do směsi přidává pěna (pěnový beton), různé plyny (pórobeton) nebo vložením hliníkového prášku (plynový beton), který v ní vytvoří plynové dutinky (kaverny), vylehčující základní směs.

Tyto betony mají malou objemovou hmotnost, jsou přetvárné a některé druhy mají i dostatečnou krychelnou pevnost, takže je lze použít i pro konstrukční účely [1]. Pěnobeton lze dodávat i ve formě transportbetonu a využívá se jako vyrovnávací vrstva podlah nebo tepelně izolační vrstvy střešního pláště [4].

Použití přímo lehčených betonů pro svislé nebo vodorovné nosné konstrukce je omezeno hlavně kvůli objemovým a deformačním změnám materiálu při zatížení v závislosti na čase a prostředí, špatné odolnosti výztuže proti korozi a výrazně nižší únosnosti při namáhání tlakem nebo tahem a smykem [1]. Pevnost v tlaku pěnobetonů zpravidla dosahuje 0,3 MPa až 1,0 MPa při objemové hmotnosti v suchém stavu 250 až 800 kg/m<sup>3</sup> [4].

**HUTNÉ KONSTRUKČNÍ BETONY** – jde o beton nepřímo lehčený pomocí plniva.

Plnivem jsou různé druhy pórovitého kameniva, které mohou být podle původu:

- Přírodní vulkanické (láva, přírodní pemza)
- Přírodní sedimentované (tufy, tufity, spongility)
- Umělé z průmyslových odpadů (škvára, struska, cihelný střep, agloporit)
- Umělé záměrně vyráběné (expandované břidlice, jíly, perlit) [4].

Norma ČSN EN 206+A1 [5] zahrnuje rovnocenně vedle obyčejných betonů i betony lehké (LC), které mají podobné pevnostní třídy [5]. Navrhují se tedy podle stejných pravidel, liší se pouze rozdílnou objemovou hmotností a zohledňují se rozdílné deformačními vlastnostmi [9].

Za největší odlišnost od obyčejného betonu lze považovat vysokou nasákavost pórovitého kameniva. U lehkých kameniv obecně je vliv vody na hmotnostní vlhkost podstatně větší než u hutných kameniv. Lehká kameniva mohou mít na rozdíl od hutných kameniv podstatnou vnitřní vlhkost kvůli jejich pórovitosti. Tato vlhkost se při míchání nepodílí na vytváření cementové malty a nemá vliv na vodní součinitel. Má však vliv na celkovou vlhkost betonu, dobu vysychání, další nasákavost kameniva při míchání a dopravě betonu, čerpatelnost lehkého betonu [9].

Lehké betony jsou díky své nižší objemové hmotnosti, dobrým tepelně izolačním a akumulačním vlastnostem využitelné i jako prefabrikované dílce. V této oblasti je dobře známé využití ve sportovních halách, pasivních rodinných domech, prefabrikovaných panelech a tvarovkách, a to jako prostých, vyztužených i předpjatých [14].

#### **A.1.4 Lehké kamenivo**

Vlastnosti pórovitého kameniva, získaného úpravou přírodních, umělých, nebo recyklovaných materiálů pro použití v betonu v pozemních, inženýrských stavbách a silnicích jsou udávány v normě ČSN EN 13055-1 [15]: Pórovité kamenivo. Norma používá označení lehké kamenivo pro kamenivo s pórovitou strukturou, sypnou hmotností do 1200 kg/m<sup>3</sup> a objemovou hmotností zrna do 2000 kg/m<sup>3</sup> [4].

Pórovité kamenivo tak nachází uplatnění hlavně při výrobě lehkých betonů a malt s tepelně izolačními účinky . Používají se pórovitá kameniva jak přírodní, tak uměle vyrobená a recyklovaná [4].

**PŘÍRODNÍ PÓROVITÁ KAMENIVA** – se získávají těžebním, podrcením a roztříděním lehkých hornin s vhodnými vlastnostmi. Převážně se jedná o horniny vulkanického původu nebo pórovité sedimenty: **Vulkanické tufy a tufity** jsou horniny, které vznikly smíšením hornin složených z úlomkovitého sopečného materiálu vyvrhovaného ze sopečných jícnu (pyroklastické horniny) pomocí sedimentace do vodního prostředí. Používají se v přirozeném stavu jako místní stavební materiál na stavbu rodinných domů a hospodářských budov nebo jako drtě na výrobu tufového betonu [16]. **Lehké lávy** vznikly při vulkanických erupcích, kdy se navršovala kopcovitých útvech kuželovitého tvaru poblíž místa erupce. Její pórovitost vznikla prudkým uvolněním plynů v důsledku poklesu tlaku při opuštění sopečného jícnu. Betony z lehkých láv jsou obdobné tufovým betonům, jejich vlastnosti jsou však příznivější proto se dá použít i jako dílce celostěnových panelů [16]. **Přírodní pemza** vznikla vyvržením při vulkanických erupcích, kdy plyny uvolňované z přírodního magmatu způsobily napěnění vyvrhovaných částic. Na rozdíl od tufů pemza vykazuje jen zcela nepatrné objemové změny při vysychání, je tedy jedním z nejlepších přírodních pórovitých kameniv [16]. **Diatomity** jako např. křemelina a trypl jsou rozsivkové horniny, které vznikly z křemičitých schránek rozsivek (jednobuněčných řas). Křemelina je nepatrně zpevněná zemina, která vznikla volnou sedimentací křemičitých skořápek a odumřelými rozsivkami. Jestliže ložiska byla dodatečně vystavena horotvorným tlakům, vzniká zřetelně vrstevnatá hornina zvaná trypl. Ve stavebnictví se používá jako pucolánová přísada do maltovin, izolačních cihel a tvarovek [16].

**UMĚLE VYROBENÁ PÓROVITÁ KAMENIVA** – pro jejich výrobu se používají průmyslové odpady (škvára, zpevněná struska, popílek, recyklované cihelné zdivo) nebo se vyrábějí žíháním granulí jílových nebo písčito-hlinitých hornin, hornin obsahujících šungit, tripolity, popelostruskové směsi nebo popílkou a úlety tepelných

elektráren, které při žíhání současně expandují [4]. **Škvára** je minerální zbytek vznikající při spalování různých druhů kamenného a hnědého uhlí, hořlavých břidlic a jiných pevných paliv v roštových topeništích [16]. Používá se na výrobu škvárového betonu nebo tvárnic [4]. **Elektrárenský popílek** je křemičitou surovinou, která má pucolánové vlastnosti, vznikající spalováním tuhých paliv spalovaných převážně v jemně mletém stavu, usazující se ve velkém množství hlavně na filtrech a záchytných zařízeních v moderních tepelných elektrárnách [16]. Popílek se ve stavebnictví používá pro vytváření násypů silnic, k přípravě popílkových portlandských cementů, pro výrobu speciálních lehkých betonů, hrubozrnného pórovitého kameniva, mikro i makro pórovitých betonů [16]. **Cihelná drť** je vzniká jako odpad z při výrobě cihel a drcením cihelné suti. Nevýhodou však je nákladné třídění sutin a nerovnoměrná jakost [4]. Cihelná drť se používá na výrobu mezerovitého, tepelně izolačního a hutného konstrukčního betonu [16]. **Struska** je pevný nekovový doprovodný výrobek hutní výroby, které vznikly roztavením hlušiny rudy, struskotvorných látek a minerálních podílů z pevných paliv [16]. Prudkým ochlazením žhavé tekuté strusky vodou vzniká zpevněná struska. Jakost zpevněné strusky často kolísá, proto se od jejího použití upouští a používá se struska nezpevněná (chlazená vzduchem ) jako hutné kamenivo [4]. **Agloporit** se vyrábí z létavých popílků sbalkováním (seskupováním jednotlivých částic do větších celků) za přídavku vody, popř. i plastifikátoru na aglomeračním roštu. Po zapálení se syrové sbalky vypalují obsahem vlastní hořlaviny na slinutá, pórovitá a pevná zrna, která se buď třídí, nebo drtí a třídí. Objemová hmotnost v setřeseném stavu sepohybuje okolo 700 až 940 kg/m<sup>3</sup> [1]. Jako suroviny se používají především různé odpadní materiály z energetického, hutního či jiného průmyslu, které mohou být fyzikálním a chemickým složením dosti rozdílné a jejich odstraňování bývá velmi nákladné. Aglomeraci na slinovacích roštech můžeme provádět s nejrůznějšími surovinami, jako jsou škváry, popílký, strusky, uhelnaté a hořlavé břidlice, hlušiny z uhelných dolů [16]. Výhodou agloporitu je nízká objemová hmotnost, objemová a teplotní stálost, rychlá nasákavost a poměrně vysoká pevnost. Agloporit tak nachází vhodné použití při rekonstrukcích historických budov, výrobě lehkého betonu nebo jako volně sypaný materiál pro výplňové a izolační zasypy a podkladní

vrstvy (podlahy, stropy, klenby, střechy) [4]. Je vhodný jak pro výrobu izolačních i konstrukčních betonů, dokonce z obzvlášť pevného agloporitu můžeme vyrobit železobetonové i předpjaté konstrukční prvky [17]. V České republice vyrábí firma LIAS Vintířov, LSM k.s. prefabrikované betonové dílce s keramzitem s obchodním označením LIAPOR [16]. **Popílkové sbalky zpevňované za studena** jsou pórovité kamenivo připravené semletím odpovídajícího menšího množství cementu s celkovým množstvím popílku (cca 1:8) bez potřeby použití aglomeračních roštů [16]. **Kavitit** je lehké betonářské kamenivo vyrobené vypálením z cihlářských hlín. Kavititový beton se však jevil horší z pohledu tepelně izolačních vlastností než beton z keramzitu o stejné objemové hmotnosti. Měl však celkem dobré pevnosti v tlaku (3-12 MPa), používal se proto i jako nosný beton [16]. **Expandit (Expandovaná břidlice)** je granulovaná drť z některých druhů břidlic, které v žáru expandují [1]. Výroba a vlastnosti jsou obdobné jako u keramzitu. Používá se ke zlepšení izolačních vlastností mezerovitých betonů a jako kamenivo pro konstrukční lehké betony [4]. **Expandovaný perlit** se vyrábí ze surového perlitu (amorfní křemičitan hlinitý sopečného původu) tepelným zpracováním při teplotě 900 až 1200 °C [1]. Expandovaný perlit je zdravotně nezávadný, biologicky i chemicky inertní (netečný), nehořlavý a odolný mrazu, objemově stálý a má velmi nízký koeficient tepelné vodivosti, a proto je jeho použití rozšířeno zejména ve stavebnictví jako tepelná a zvuková izolace, k výrobě lehčených izolačních omítek, zdicích malt, betonu a izolačních násypů [4]. **Expandovaný vermikulit** se získává expandací surového vermikulitu, který se vzhledem podobá slídě. Mezi jeho přední vlastnosti také patří nízká tepelná vodivost a žáruvzdornost [4]. Ve stavebnictví se používá jako tepelně izolační malty, protipožární ochrana konstrukcí, tepelná izolace a betony [16]. **Siopor** je tepelně a zvukově izolační, napěněný keramický materiál, výlučně přírodního původu na bázi křemičitanů. Ve stavebnictví se používá jako zásypový prvek v sendvičových konstrukcích, dutinových tvarovek a jako zateplení stropů nebo podlah, a to i s podlahovým vytápěním [4].

## A.1.5 Problematika lehkých betonů a kameniv

Problematika lehkých betonů se odvíjí od jejich nevýhod oproti obyčejnému betonu, ze kterých jsou nejvýznamnější následující:

- Křehkost v případě hutných konstrukčních betonů s vyššími pevnostmi
- Vyšší teplota během zrání betonu díky hydrataci cementu
- Nižší odolnost vůči lokálnímu koncentrovanému břemenu
- Nasákavost lehkého kameniva způsobuje komplikace při míchání a ukládání betonu čerpáním [14].

Důležité jsou i fyzikálně-mechanické vlastnosti lehkého kameniva, zejména objemová hmotnost, pevnost, nasákavost, které se u jednotlivých druhů lehkých pórovitých kameniv mohou lišit. Distribuce zrn a maximální zrno lehkého kameniva jsou při výrobě lehkého betonu rozhodující. Doporučená maximální velikost zrna je limitována požadavky na pevnost betonu, větší zrna lehkého kameniva mají sklon snižovat pevnost a inklinují k segregaci způsobené rozdílnou objemovou hmotností jednotlivých složek. Stejně jako u přírodního kameniva, měrný povrch lehkého kameniva ovlivní zpracovatelnost v čase, a to zejména v případě, kdy tvar povrchu představuje otevřenou pórovou strukturu. Měrný povrch kameniv ovlivní nejen zpracovatelnost betonu ale také spojení s cementovým tmelem. Pevnost lehkého kameniva je spíše nízká a je potvrzeno, že jako primární faktor omezuje možnosti dosažení horní meze pevnosti lehkého betonu [9].

Nasákavost lehkého kameniva je však jeden z nejdůležitějších parametrů, a to nejen pro ukládání a čerpatelnost čerstvého betonu, ale i pro vodní součinitel čerstvého betonu, a proto je potřeba zohlednit množství záměsové vody již při návrhu. Vodní součinitel je jeden z nejdůležitějších faktorů, který rozhoduje o pevnosti a trvanlivosti betonu. [5]. Za předpokladu úplného zhutnění cementového tmelu, je obecně platné, že se zvyšující se hodnotou vodního součinitele klesá pevnost ztvrdlého cementového tmelu, z důvodů jeho zvyšující se porozity (celkového obsahu pórů) [5]. Účinným obsahem vody tedy rozumíme množství vody, které je potřeba k hydrataci cementu. Při použití suchého kameniva

se musí dodat přídatná voda potřebná pro jeho nasáknutí. Záměsová voda se tedy skládá z účinné vody a vody přídatné. Je nutné si tedy uvědomit, že díky nasákavosti lehkého kameniva lehký beton vyžaduje větší množství vody. Tendenci ke vstřebávání vody z čerstvého betonu kvůli nasákavosti lehkého kameniva, a hlavně u lehkého kameniva pod tlakem je možné omezit nebo eliminovat předvlhčením kameniva. Předvlhčení je možné provést postříkem na skládce, zkrápěním na dopravním páse nebo v míchačce před začátkem míchání čerstvého betonu [9].

## **A.2 VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ BETONU**

Nehledě na to, jak byl beton vyroben, je ztvrdlý beton konstrukčním materiálem, z něhož jsou tvořeny konstrukční prvky, které jsou během své životnosti vystaveny mechanickému napětí, statickému nebo dynamickému a různým vlivům okolního prostředí [2]. Nejdůležitější vlastnosti konstrukčních betonů jsou jeho mechanické a přetvárné vlastnosti a jeho trvanlivost v daném prostředí [3]. Obecně se jedná zejména o objemovou hmotnost, jakost, zpracovatelnost, pevnost, přetvoření, pružnost, tepelná vodivost, nasákavost, vzlínavost, objemové změny (dotvarování, roztažnost a smršťování), trvanlivost, vliv na životní prostředí a odolnost (proti korozi, vodě, chemickým látkám, mrazu, žáru). Tato práce se však zabývá hlavně následujícími vlastnostmi betonu (těmi, které byly využity v praktické části práce):

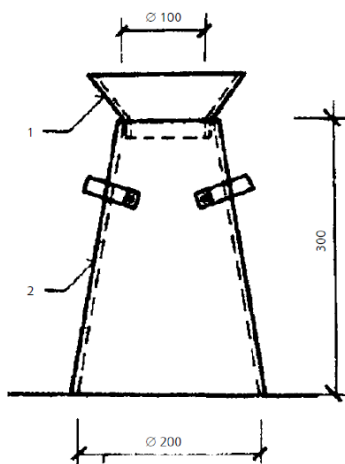
### **A.2.1 Objemová hmotnost**

Objemová hmotnost je definována jako hmotnost objemové jednotky určité látky včetně dutin a pórů [1]. Objemová hmotnost se dá stanovit podle normy ČSN EN 12390-7 [18]: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Stanovuje se zpravidla výpočtem ze změřených skutečných rozměrů (pravidelné geometrické těleso) nebo ponořením do vody a vážením na hydrostatických vahách (nepravidelné těleso) [4]. Připouští se tolerance  $\pm 100 \text{ kg/m}^3$ . Podle objemové hmotnosti ve vysušeném stavu nám norma ČSN EN 206+A1 [5] definuje beton jako obyčejný, lehký a těžký [3].

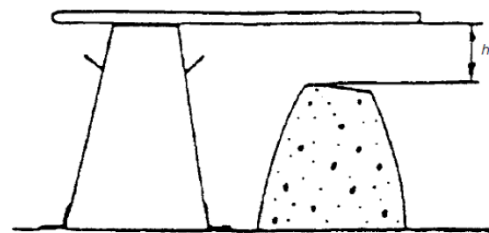
## A.2.2 Konzistence čerstvého betonu

Konzistence charakterizuje zpracovatelnost čerstvého betonu, ovlivňuje způsob přepravy betonu i hutnění. Pro zkoušení konzistence je k dispozici několik základních zkušebních metod dle ČSN EN 12350-2 [19], tabulka 1-6, žádná z nich však není zcela univerzální a vhodná pro všechny druhy betonů. Výsledky zkoušky konzistence se klasifikují vždy názvem použité metody a naměřenou hodnotou, viz kap. A.1.1 [4].

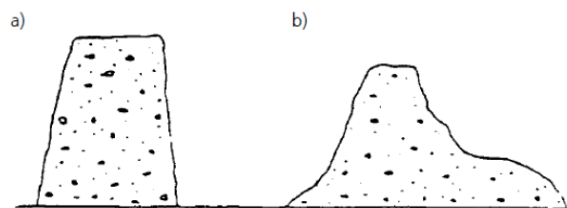
Nejvíce se používá **zkouška sednutím**, při které se používá Abramsova forma ve tvaru komolého kužele, viz Obr. 5. Při stanovení konzistence se forma plní ve třech vrstvách (přibližně na třetiny) a každá se zhutňuje 25 vpichy propichovací tyčí. Forma se následně opatrně zvedá svislým pohybem nahoru a ihned po zvednutí formy se změří a zaznamená sednutí ( $h$ ), viz Obr. 4 [19]. Výsledek je platný, je-li sednutí tělesa symetrické, dojde-li k usmyknutí tělesa, musí se zkouška opakovat na jiném vzorku, viz Obr. 3. Zkouška je obecně vhodná pro řidší a tekutější betony (kontroly dodávek transportbetonu) [4].



Obr. 5: Abramsova forma [27]



Obr. 4: Měření sednutí [27]



Obr. 3: Tvary usmyknutí: a) Správné,  
b) Usmyknuté [27]

### A.2.3 Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou

Odolnost betonu vůči průsaku tlakovou vodou má velký význam nejen pro vodohospodářské stavby, ale má vliv i na trvanlivost betonových a železobetonových konstrukcí, vystavených vlivům povětrnosti a agresivnímu prostředí [3]. Zkouška se provádí dle ČSN EN 12390-8 [20]: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou, na zkušebních tělesech ve tvaru krychle, válce nebo hranolu s minimální délkou hrany nebo průměrem 150 mm ve stáří betonu minimálně 28 dnů [4]. Zkušební vzorek je vystaven působení tlakové vody ( $500\pm 50$ ) kPa po dobu ( $72\pm 2$ ) hodin [20]. Výsledek je hloubka průsaku po stanovené době, která se změří po rozdrcení krychle příčným tahem [3].

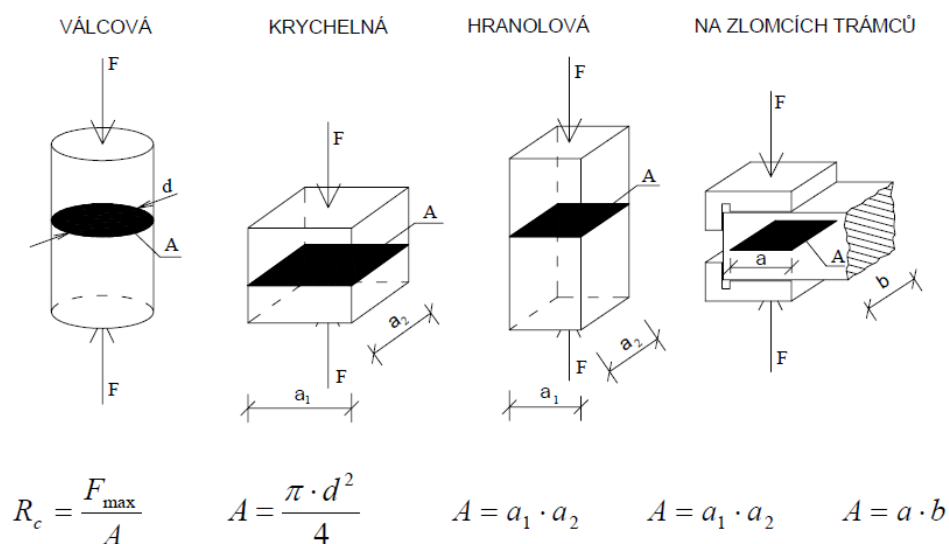
Dále se u čerstvého betonu stanovuje **objemová hmotnost**, metodou zhutnění v nádobě se známým objemem a hmotností. Zkouška se provádí dle normy ČSN EN 12350-6 [21] a používá se kovová, vodotěsná a dostatečně tuhá nádoba, jejíž nejmenší rozměr musí být nejméně čtyřnásobkem největší jmenovité velikosti zrna hrubého kameniva a její objem nesmí být menší než 5 litrů [4]. Forma se plní minimálně ve dvou vrstvách postupně zhutněných. Přesahující beton se odstraní, horní hrana uhladí a nádoba se zváží. Objemovou hmotnost čerstvého betonu pak získáme podílem hmotnosti vzorku bez nádoby a objemem nádoby [21].

### A.2.4 Pevnost

Pevností materiálu se rozumí mezní schopnost materiálu vzdorovat silovým účinkům zatížení [4]. Udává nám maximální napětí, které je materiál schopen přenést do okamžiku porušení. V závislosti druhu napětí tedy označujeme pevnost jako tlakovou, tahovou nebo ohybovou [2].

- **PEVNOST V TLAKU** je pro beton nejzávažnější. Zkouší se podle normy ČSN EN 12390-3 [22] a dělí se podle zkoušených těles na krychelnou, válcovou a hranolovou, viz Obr. 6 [4]. Poměr výšky k šířce základny u hranolů bývá 3:1 nebo 4:1, válců 1:1 nebo 2:1. Pevnost krychlená však není shodná

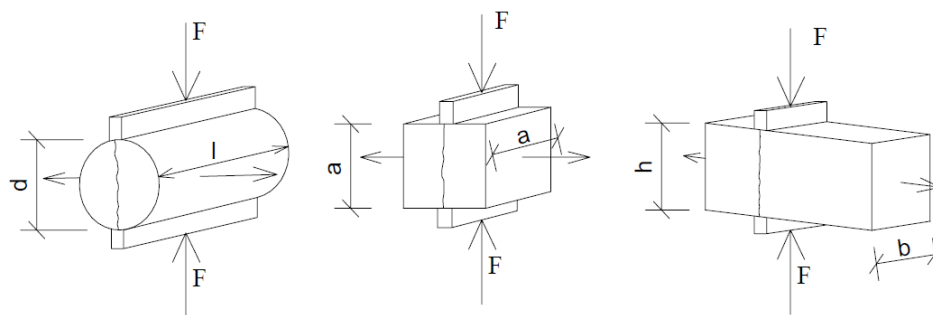
s pevností hranolovou nebo válcovou. U vyšších štíhlostních poměrů u hranolů a válců bývá únosnost částečně vyčerpána ztrátou stability prvku, a nikoliv dosažením pevnosti materiálu. Při zatěžování působí mezi tlačnými deskami stroje a tlačnými plochami zkušebního tělesa značné tření, které zabraňuje příčnému roztahování tlačného tělesa [3]. Vztah mezi pevností krychelnou, hranolovou a válcovou je 1:0,75-0,8:0,7-0,83. Pokud je charakteristická pevnost v tlaku zjištěná na krychlích o hraně 150 mm nebo na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm, dá se podle pevnosti v tlaku beton klasifikovat do pevnostních tříd podle ČSN EN 206+A1 [5], viz Tab. 1 [5].



Obr. 6: Druhy pevností v tlaku [3]

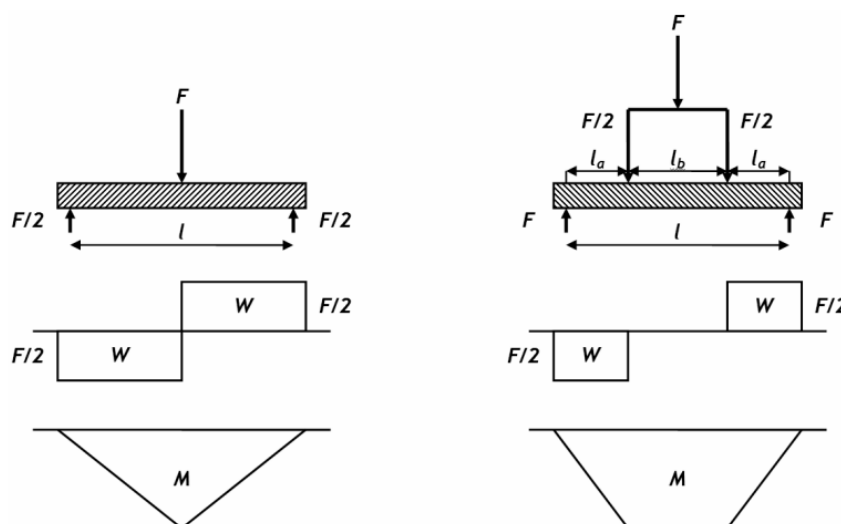
- **PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU** se zjišťuje tlakovým namáháním válců nebo krychlí případně hranolů nejčastěji přes roznášecí proužky, zhotovené z dřevovláknité desky od šířky  $15 \pm 1$  mm, tloušťky  $4 \pm 1$  mm a délky větší než dotyková přímka se zkušebním tělesem podle normy ČSN EN 12390-6 [11]. Jde v podstatě o vyvození soustředěného namáhání, které uvnitř tělesa vyvodí příčné napětí v tahu, které následně rozštípně zkušební vzorek ve svislé ploše spojující obě tlačené příložky, viz Obr. 7.

Pevnosti v příčném tahu jsou podstatně nižší než pevnosti tlakové a dosahují hodnot od 1,5 do 4,0 MPa v závislosti na kvalitě betonu [3].



Obr. 7: způsoby vyvození příčného tahu [3]

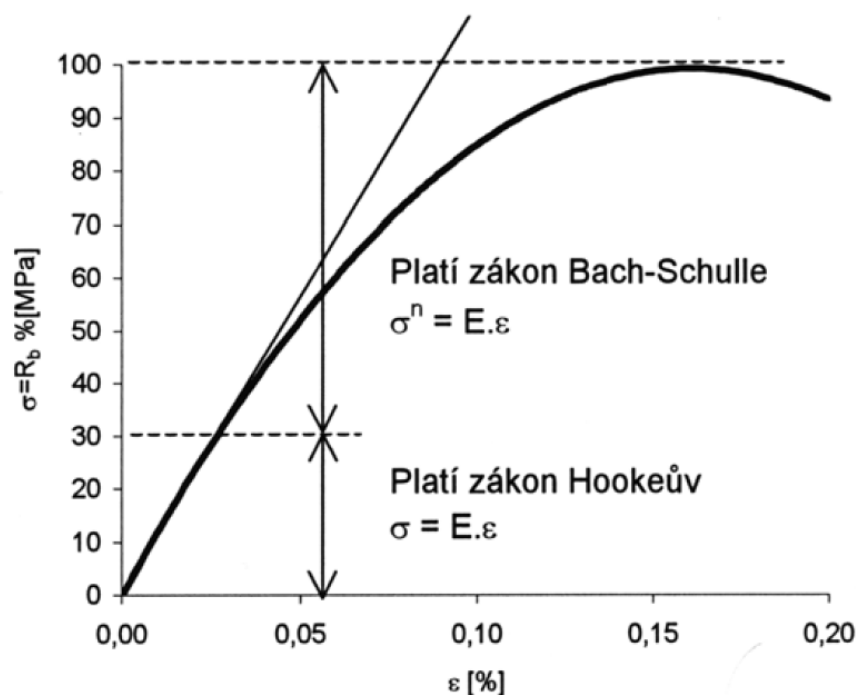
- **PEVNOST V TAHU OHYBEM** se zjišťuje ohybem na trámcích zatížením ohybovým momentem podle normy ČSN EN 12390-5 [23]. Ohybový moment se vyvozuje zatížením trámce, uloženého na dvou podporách, jednou (tříbodový) nebo dvěma silami (čtyřbodový), viz Obr. 8. Ohybem trámce vzniknou největší napětí na spodním a na horním líci. Při působení shora kolmo k podélné ose trámce je dolní povrch tažený a horní tlačný. Jakmile toto napětí dosáhne meze pevnosti materiálu, dojde k vyčerpání únosnosti a k porušení vláken. Porušení trámců nastane v případě korektní zkoušky vždy v místě největšího ohybového momentu [3].



Obr. 8: Vlevo tříbodový ohyb, vpravo čtyřbodový ohyb [23]

## A.2.5 Dynamický modul pružnosti

Modul pružnosti betonu  $E$  je základní přetvárnostní charakteristikou betonu. Je definovaný jako poměr napětí  $\sigma$  k poměrné deformaci  $\varepsilon$ . Pro případ smykového namáhání je modul pružnosti ve smyku  $G$  definován jako poměr tečného napětí  $\tau$  a zkosu  $\gamma$ . Modul pružnosti závisí na sklonu křivky deformačního diagramu, viz Obr. 9. Zatímco v pružné oblasti platí Hookův zákon, v oblasti nepružné platí mocninový zákon Bach-Schülleův, pro který se stanovuje modul přetvárnosti. Součinitel  $n$  v mocnině napětí je číslo větší než 1, do 20-30 % pevnosti betonu jej uvažujeme hodnotou  $n=1$  [3]. Modul pružnosti rozdělujeme na statický a dynamický. Statický modul se dá stanovit destruktivními metodami se zatěžováním v cyklech a měřením deformací pomocí tenzometrů. Pro stanovení dynamických modulů pružnosti jsou využívány metody ultrazvuková a rezonanční, popsané v ČSN 73 1371 [24], ČSN 12504-4 [25] a ČSN 73 1372 [26]. Modul pružnosti betonu je dále ovlivněn řadou činitelů, např. složením, zejména druhem hrubého kameniva [27].

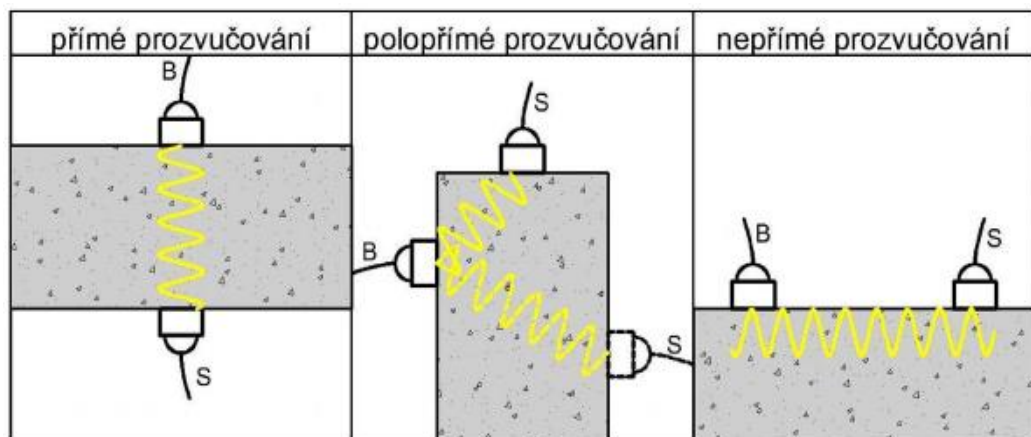


Obr. 9: Pracovní diagram betonu [3]

- **Ultrazvuková impulzová metoda** je založena na měření doby průchodu impulsů ultrazvukového vlnění materiálem. Při známé délce základny

Ize velmi jednoduše vypočítat rychlost šíření ultrazvukového vlnění, která je závislá na kvalitě zkoumaného materiálu. Ve stavebnictví se používá ultrazvukové vlnění s frekvencí v rozmezí od 20 do 500 kHz. Výhodou ultrazvukového vlnění je, že se šíří relativně silnými vrstvami materiálu [28]. Dovoluje nám tam nedestruktivně stanovit rovnoměrnost betonu, modul pružnosti, vady materiálu i pevnost v tlaku. Při ultrazvukovém zkoušení stavebních prvků, dílců i konstrukcí se používá jedné sondy (odrazová metoda) nebo dvou elektroakustických sond: budiče a snímače. Způsob prozvučování závisí na přístupnosti povrchů zkoušeného objektu a na umístění sond na zkoušené objektu [29]. Proto rozeznáváme tyto typy prozvučování:

- a) **Přímé**, sondy jsou orientovány kolmo naproti sobě,
- b) **Polopřímé**, sondy se přikládají na protější nebo boční strany, ne však přímo proti sobě,
- c) **Nepřímé**, kdy se obě sondy přikládají na tutéž plochu objektu, viz Obr. 10 [24].



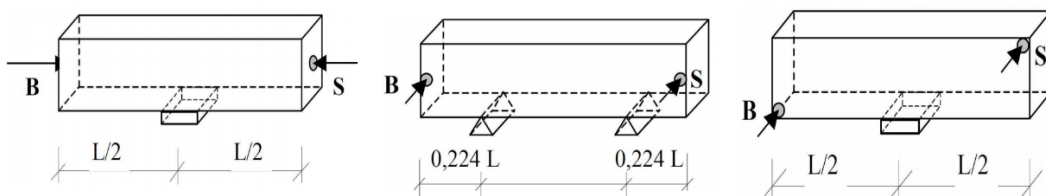
Obr. 10: Typy prozvučování ultrazvukovou metodou [30]

Pro nedestruktivní zkoušení betonu se využívají dvě normy: ČSN 73 1371 [24]: Ultrazvuková Impulzová metoda zkoušení betonu, a ČSN EN 12504-4 [25]: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového Impulsu [28].

➤ **Rezonanční metoda** je změření hodnot určitého vynuceného rezonančního kmitání menších zkušebních vzorků pravidelného geometrického tvaru, pro než dovedeme teoreticky odvodit vztahy mezi vlastními frekvencemi a odpovídajícími pružnými charakteristikami materiálu [29]. Pro nedestruktivní zkoušení betonu se využívá norma ČSN 73 1372 [26]: Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu. Nejběžněji se používají zkušební vzorky ve tvaru dlouhých hranolů nebo válců. Zkušební tělesa, uložená jako prostý nosník s převislými konci můžeme mechanickým úderem pomocí rázového kladívka rozkmitat třemi základními druhy jejich rezonančních frekvencí, a to kmitáním:

- **podélným  $f_L$** , je-li nosník podepřen (vetknut) uprostřed své délky a obě jeho čela kmitají v protifázi směru délky vzorku, viz Obr. 11,
- **příčným  $f_f$** , je-li nosník podepřen v místě uzlů jako prostý nosník s převislými konci, viz Obr. 11,
- **Kroutivým  $f_t$** , je-li nosník podepřen (vetknut) uprostřed své délky s torzním kmitáním čel vyvozeným kroutivým momentem, viz Obr. 11.

Další možnou charakteristikou k posouzení kvality materiálu prvku je logaritmický dekrement útlumu, pomocí něhož můžeme sledovat časové změny kvality, např. degradaci materiálu působením okolí [29].



Obr. 11: Rezonanční frekvence zleva podélná, příčná, kroutivá [26]

## B. PRAKTICKÁ ČÁST

### B.1 POPIS EXPERIMENTU

Hlavním úkolem tohoto experimentu je sledování vlivu vlhkosti lehkého kameniva při výrobě betonu na jeho vybrané trvanlivostní, dynamické a pevnostní vlastnosti. Sledované parametry betonu byly stanoveny na zkušebních tělesech tvaru krychle a hranolu po 7, 28 a 90 dnech jeho zrání. Na zkušebních tělesech tvaru krychle o hraně 150 mm se provádělo zkoušení pro získání objemové hmotnosti, hloubky průsaku tlakovou vodou, pevnosti v tlaku a příčném tahu. Na zkušebních tělesech tvaru hranolu 100x100x400 mm, viz Obr. 12, se provádělo zkoušení pro získání objemové hmotnosti, pevnosti v tahu ohybem a dynamického modulu pružnosti stanovené ultrazvukovou a rezonanční metodou. V rámci práce bylo do dvou druhů betonu použito lehké kamenivo Agloporit se dvěma vstupními vlhkostními stavy: S– suché kamenivo a N – nasycené kamenivo urychleným předmáčením pod tlakem. Experiment byl naplánován a částečně proveden ve spolupráci s firmou Svoboda a syn, s.r.o.



Obr. 12: Vyrobené zkušební hranoly a krychle [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]

### B.2 ZKUŠEBNÍ TĚLESA

#### B.2.1 Výroba zkušebních těles

Pro účel této práce byly použity dvě různé receptury lehkého betonu (transportbeton, který je v práci označen písmenem A, a samozhutnitelný beton, který je označen písmenem B), které byly navrženy firmou Svoboda a syn, s.r.o.

Z důvodu plánovaného komerčního využití zkoušených lehkých betonů nelze v této práci uveřejnit jejich přesné složení. V Tab. 3 jsou uvedeny pouze jednotlivé složky receptur betonu. Veškerá zkušební tělesa byla vyrobena v areálu firmy Svoboda a syn, s.r.o.

*Tab. 3: Složky receptur čerstvého betonu*

<b>Receptura A</b>	<b>Receptura B</b>
CEM I 42,5 R (Mokrý)	CEM I 42,5 R (Mokrý)
Vápenec č. 8 Carmeuse	Popílek TOT (39 % z hmotnosti cementu)
DTK 0/4 Zaječí	DTK 0/2 Zaječí
Aglopotit 4/8	Agloporit 1/4 (drcený)
Agloporit 8/16	Agloporit 4/8
Plastifikátor (polykarboxylát)	Plastifikátor (polykarboxylát)
Provzdušňovací přísada	VMA (Viscosity Modifying Admixture) - stabilizační přísada

Dne 19. 8. 2019 bylo vyrobeno 60 zkušebních krychlí z betonu A a dne 26. 8. 2019 bylo vyrobeno 60 zkušebních krychlí z betonu B. Výroba probíhala vzhledem k plánovaným zkouškám v týdenním odstupu, další informace jsou však pro oba betony shodné. Dne 5. 2. 2020 bylo vyrobeno 60 zkušebních hranolů (30 ks z betonu A a 30 ks z betonu B). Polovina betonových těles z obou receptur byla vyrobena z předem nasyceného kameniva (tělesa označena písmenem N) a druhá polovina z kameniva suchého (tělesa označena písmenem S). Jednotlivé složky betonu byly naváženy a následně smíchány v laboratorní míchačce, viz Obr. 13. Čerstvý beton se dále uložil do forem, které byly předem pečlivě vyčištěny a vymazány olejem. Beton A se ve formách zhutnil pomocí vibrační desky a beton B nebylo potřeba hutnit (jedná se o samozhutnitelný beton). Čerstvý beton byl následně ve formách označen štítky podle jeho složení (A/B) a vlhkostního stavu kameniva (N/S). V PE fólií přikrytých formách byla zkušební tělesa ponechána 48 hodin, poté byla z forem vyjmuta a převezena do laboratoře Fakulty stavební VUT.



Obr. 13: Míchání čerstvého betonu a vážení složek betonu

## B.2.2 Vlastnosti čerstvého betonu

Před uložením čerstvého betonu do forem byly provedeny zkoušky čerstvého betonu, viz Obr. 14. U betonu A byla provedena zkouška sednutím podle ČSN EN 12350-2 [19], viz Tab. 4, a u betonu B (samozhutnitelný) byla provedena zkouška sednutí-rozlitím podle ČSN EN 12350-8 [31], viz Tab. 5. Dále byla pro oba čerstvé betony provedena zkouška pro stanovení objemové hmotnosti v souladu s ČSN EN 12350-6 [21]. Vodní součinitel, určený podle vztahu z normy ČSN EN 206-1+A1 [5], je uveden v Tab. 6.

Tab. 4: Vlastnosti čerstvého betonu A

Betón A				
Vlastnosti čerstvého betonu	19. 8. 2019		5. 2. 2020	
	A-S	A-N	A-S	A-N
Sednutí [mm]	220	240	70	150
D [kg·m <sup>-3</sup> ]	1940	1950	1930	1950

Tab. 5: Vlastnosti čerstvého betonu B

Betón B				
Vlastnosti čerstvého betonu	26. 8. 2019		5. 2. 2020	
	B-S	B-N	B-S	B-N
Rozlití-sednutím [mm]	720	720	730	700
T <sub>500</sub> [s]	6,2	5,7	11,4	13,1
D [kg·m <sup>-3</sup> ]	1850	1890	1860	1890

Tab. 6: Vodní součinitel

Vodní součinitel	
Beton A	Beton B
$w/c \text{ pro } S = 0,45$	$w/c \text{ pro } S = 0,32$
$w/c \text{ pro } N = 0,45$	$w/c \text{ pro } N = 0,30$



Obr. 14: Zleva zkouška sednutím, zkouška sednutí-rozlitím

### B.2.3 Ošetřování a skladování zkušebních těles

Po vyjmutí z forem byla zkušební tělesa uložena do vodní lázně s teplotou  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Ve vodní lázni byla ponechána do stáří betonu 7 dní. Po vyjmutí z vodní lázně byla tělesa uložena do klimatizované místnosti s teplotou okolního vzduchu  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  a vlhkostí vzduchu  $(55 \pm 10) \%$ , viz Obr. 15. Tělesa byla uložena na police z roštů, tak aby bylo umožněno jejich přirozené vysychání všemi povrchy.



Obr. 15: Přirozené vysychání všemi povrchy v klimatizované místnosti

### B.3 MĚŘENÍ A ZKOUŠENÍ TĚLES

Všechny povrchy těles byly očištěny, následně zváženy digitální váhou a změřeny digitálním posuvným měřidlem Mitutoyo (300 mm) všechny rozměry. V každém termínu (po 7, 28 a 90 dnech zrání betonu) byla v rámci každé zkoušky otestována trojice od každého jí příslušného zkušebního tělesa (A-S, A-N, B-S, B-N).



Obr. 16: Vážení a měření rozměrů zkušebních těles [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]

### B.3.1 Objemová hmotnost

Byla spočítána ze skutečných změřených rozměrů a zjištěných hmotností zkušebních těles podle ČSN EN 12390-7 [18] následujícím vztahem:

$$D = \frac{m}{V}$$

kde  $D$  je objemová hmotnost zkušebního tělesa v  $\text{kg/m}^3$ ,  
 $m$  hmotnost zkušebního tělesa v podmínkách v době zkoušení v  $\text{kg}$ ,  
 $V$  objem stanovený příslušným způsobem v  $\text{m}^3$ .

### B.3.2 Hloubka průsaku tlakovou vodou

Plocha zkušebních těles byla zdrsňena ocelovým kartáčem. Zkušební tělesa byla upnuta do zkušební stolice na zkoušky vodotěsnosti betonu Brio Hranice AVB-PLC 6, viz Obr. 17. Na zkušební tělesa působil vodní tlak 500 kPa po dobu 72 hodin. Po uplynutí této doby byla zkušební tělesa vyjmuta ze zařízení a utřena, aby se odstranila přebytečná voda. Zkoušky hloubky průsaku tlakovou vodou byly ukončeny zkouškou v příčném tahu dle ČSN EN 12390-6 [11]. Stáří zkušebních těles při určení pevnosti v příčném tahu tedy je vždy o 3 dny větší než při zkoušce pevnosti v tlaku. Zkušební tělesa byla umístěna do zkušebního lisu tak, aby plocha, na kterou působil vodní tlak, byla dole. Po přelomení zkušebního tělesa se nechaly lomové plochy oschnout a změřila se největší zřetelná hloubka průsaku od zkoušené plochy na nejbližší milimetr.



Obr. 17: Zkušební stolice Brio Hranice AVB-PLC 6, stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]

Na zkušebních krychlích z betonu B, při zkoušení po 90 dnech, nebylo možné stanovit hloubku průsaku tlakovou vodou, neboť krychle byly poškozeny trhlinami, viz Obr. 18, zkouška tak musela být kvůli protékání vody bočními stranami po jedné hodině ukončena. Zkouška pevnosti v příčném tahu však byla provedena ve stáří 93 dní aby byl zachován dosavadní postup zkoušení.



Obr. 18: Zkušební krychle poškozené trhlinami [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]

### B.3.3 Pevnost v příčném tahu

Zkušební tělesa tvaru krychlí byla umístěna do středu zkušebního hydraulického lisu ALPHA 3-3000 S (firmy Form+Test Prüfsysteme), viz Obr. 19. V zatěžovací středové rovině byly na tělesa pomocí přípravku osazeny, nahoře i dole, roznášecí proužky.

Tělesa pak byla zatěžována tlakovou silou v úzké linii po jeho délce. Betonová zkušební tělesa se vlivem působení tlakové liniové síly poruší tahem. Výsledkem je potom maximální naměřená síla v N, která dané zkušební těleso porušila. Pevnost v příčném tahu byla následně stanovena podle normy ČSN EN 12390-6 [11] pomocí vztahu:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

kde  $f_{ct}$  je pevnost v příčném tahu v MPa,  
 F maximální zatížení v N,  
 L délka dotykové přímky tělesa v mm,  
 D zjištěný příčný rozměr tělesa v mm.



Obr. 19: Hydraulický lis ALPHA 3-3000 S

### B.3.4 Pevnost v tlaku

Dotykové plochy tlačných desek hydraulického lisu ALPHA 3-3000 S, viz Obr. 19, byly otřeny a plochy zkušebních těles tvaru krychle, které přišly do kontaktu s tlačnými deskami, byly zbaveny zbytků písku a jiného uvolněného materiálu. Krychle se osadily do hydraulického lisu tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr hutnění betonu. Zkušební tělesa byla dále zatěžována konstantní rychlostí zatěžování až do porušení tělesa. Byly zaznamenány maximální dosažené zatížení a pevnost v tlaku je dána podle normy ČSN EN 12390-3 [22] následujícím vztahem:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

kde  $f_c$  je pevnost v tlaku v MPa,  
 F maximální zatížení při porušení v N,  
 $A_c$  průřezová plocha zkušebního tělesa zatížená tlakem v mm<sup>2</sup>.

### B.3.5 Pevnost v tahu ohybem

Ke stanovení pevnosti v tahu ohybem byla použita zkušební tělesa tvaru hranolu. Zkoušení probíhalo na hydraulickém lisu DELTA 6-300 (firmy Form+Test Prüfsysteme), viz Obr. 20, s nastavnou hlavicí pro zatěžování dvěma břemeny ve třetinách rozpětí (čtyřbodový ohyb). Tělesa byla umístěna do lisu oboustranně centricky a podélnou osou kolmo k podélným osám horních a dolních válečků. Zároveň bylo zajištěno, aby směr zatěžování byl kolmý na směr hutnění betonu zkušebního tělesa. Zatěžování probíhalo konstantní rychlostí zatěžování až do porušení zkušebních těles. Byla zaznamenána maximální dosažená zatížení a pevnost v tahu ohybem je dána podle normy ČSN EN 12390-5 [23] následujícím vztahem:

$$f_{cf} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times d_1 \times d_2^2}$$

kde  $f_{cf}$  je pevnost v tahu ohybem v MPa,

F maximální zatížení v N,

l vzdálenost mezi podpěrnými válečky v mm (300 mm),

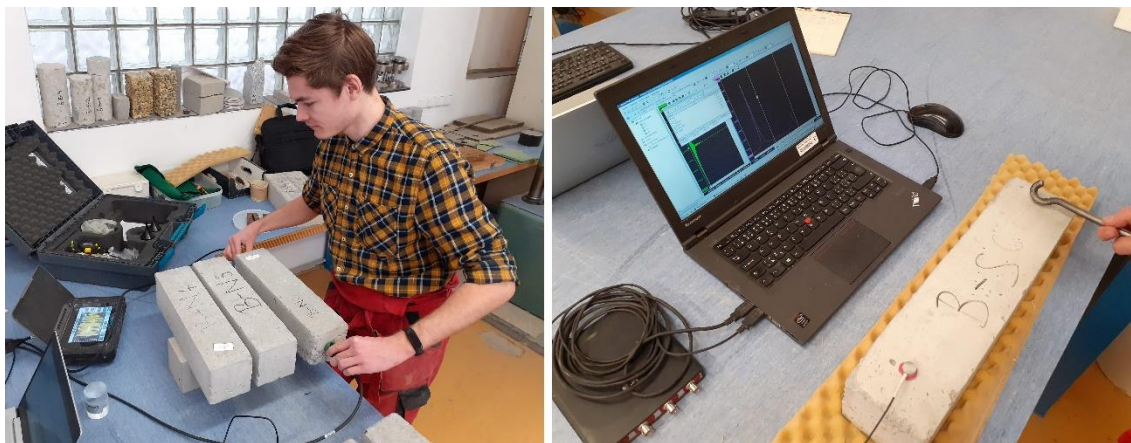
$d_1$  a  $d_2$  rozměry příčného řezu v mm.



Obr. 20: Vlevo lis DELTA 6-300, vpravo zkoušený hranol porušený v tahu ohybem

### B.3.6 Dynamický modul pružnosti

Hodnoty modulu pružnosti byly stanoveny ultrazvukovou impulzovou metodou (UZ) a rezonanční metodou, viz Obr. 21, na zkušebních tělesech tvaru hranolu, a to před zkouškou pevnosti v tahu ohybem.



Obr. 21: Vlevo měření doby průchodu UZ impulzu, vpravo stanovení vlastní frekvence zkušebního tělesa [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.]

Měření UZ metodou se provádělo přístrojem Pundit PL-200 (firmy Proceq) podle norem ČSN 73 1371 [24] a ČSN EN 12504-4 [25]. Nejprve byl přístroj zkalibrován pomocí přiloženého plastového válečku (etanolu), u kterého je známa přesná doba průchodu UZ impulzu. Zkoušená tělesa byla podepřena v polovině své délky. Přístrojem byly dále změřeny doby průchodu UZ vlněním skrze zkušební hranol v podélném směru ve třech místech každého tělesa. Z doby průchodu vlnění a délky zkoušeného hranolu byla stanovena rychlost šíření ultrazvukového vlnění. Hodnota dynamického modulu pružnosti se určila z následujícího vztahu:

$$E_{cu} = D \times v_L^2 \times \frac{1}{k^2}$$

kde  $E_{cu}$  je dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu v GPa,

$D$  objemová hmotnost betonu v  $\text{kg/m}^3$ ,

$v_L$  impulzová rychlost podélného UZ vlnění v  $\text{km/s}$ ,

$k$  součinitel rozměrnosti prostředí závislý na Poissonově čísle.

Modul pružnosti byl též stanoven pomocí rezonanční metody na zkušebních tělesech tvaru hranolu. Mechanickým impulzem rázového kladívka byla rozkmitána zkušební tělesa uložená na pružné podložce. Vlastní frekvence zkušebních těles se stanovila pomocí softwaru, který pracuje na principu rychlé Fourierovy transformace a který je součástí dodávky osciloskopu Handyscope HS4. Umístění snímače akustické emise (připojeného k osciloskopu) a umístění úderů rázového kladívka, bylo voleno na základě měření vlastní frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání každého zkušební tělesa, viz Obr. 11. Hodnota dynamického modulu pružnosti betonu při podélném kmitání byla stanovena podle normy ČSN 73 1372 [26] následujícím vztahem:

$$E_{crL} = 4 \times L^2 \times f_L^2 \times D$$

- kde  $E_{crL}$  je dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo tahu v MPa,  
 $L$  délka zkoušeného tělesa v m,  
 $f_L$  první vlastní kmitočet podélného kmitání zkoušeného tělesa v kHz,  
 $D$  objemová hmotnost betonu v  $\text{kg/m}^3$ .

Dále byla stanovena hodnota modulu pružnosti  $E_{crf}$  při příčném kmitání, a to ze vztahu:

$$E_{crf} = 0,0789 \times c_1 \times L^4 \times f_f^2 \times D \times \frac{1}{i^2}$$

- kde  $E_{crf}$  je dynamický modul pružnosti betonu v tlaku nebo tahu v MPa,  
 $c_1$  korekční součinitel podle tabulky 2 v normě ČSN 73 1372 [26],  
 $L$  délka zkušební tělesa v m,  
 $f_f$  první vlastní kmitočet příčného kmitání zkušební tělesa v kHz,  
 $D$  objemová hmotnost betonu v  $\text{kg/m}^3$ ,  
 $i$  poloměr setrvačnosti řezu k ose kolmé na rovinu kmitání v m.

Jako poslední byl stanoven modul pružnosti betonu ve smyku  $G_{cr}$  v MPa ze vztahu:

$$G_{cr} = 4 \times k \times L^2 \times f_t^2 \times D$$

kde  $L$  je délka zkušební tělesa v m,

$f_t$  první vlastní kmitočet kroutivého kmitání zkušební tělesa v kHz,

$D$  objemová hmotnost betonu v  $\text{kg/m}^3$ ,

$k$  součinitel charakterizující tvar příčného řezu zkušební tělesa.

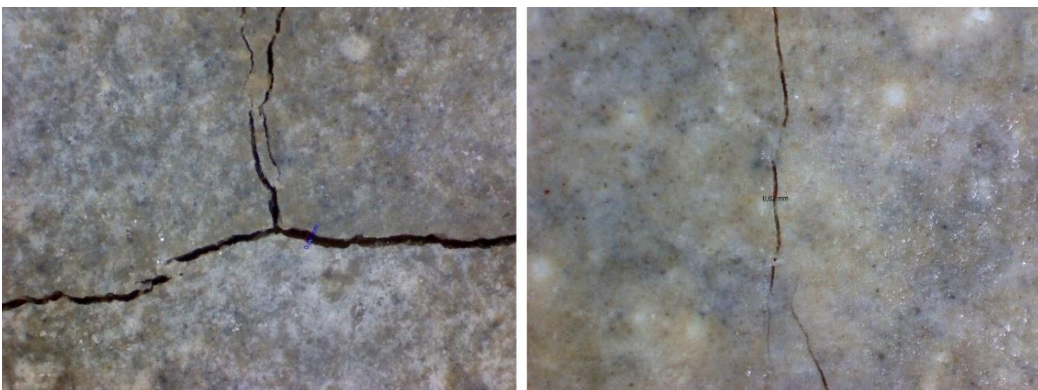
## B.4 VADY ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Na zkušebních těles byly pozorovány primárně dvě vady:

- Kaverny při spodním líci těles (zejména v rozích těles) u betonu B, kvůli krátké době zpracovatelnosti čerstvého betonu, viz Obr. 22.
- Mikrotrhliny ve struktuře betonu (pravděpodobně vznikající zejména objemovými změnami betonu), viz Obr. 23.



Obr. 22: Zkušební tělesa ze samozhutnitelného betonu



Obr. 23: Vlevo mikrotrhlina betonu B, vpravo mikrotrhlina betonu A

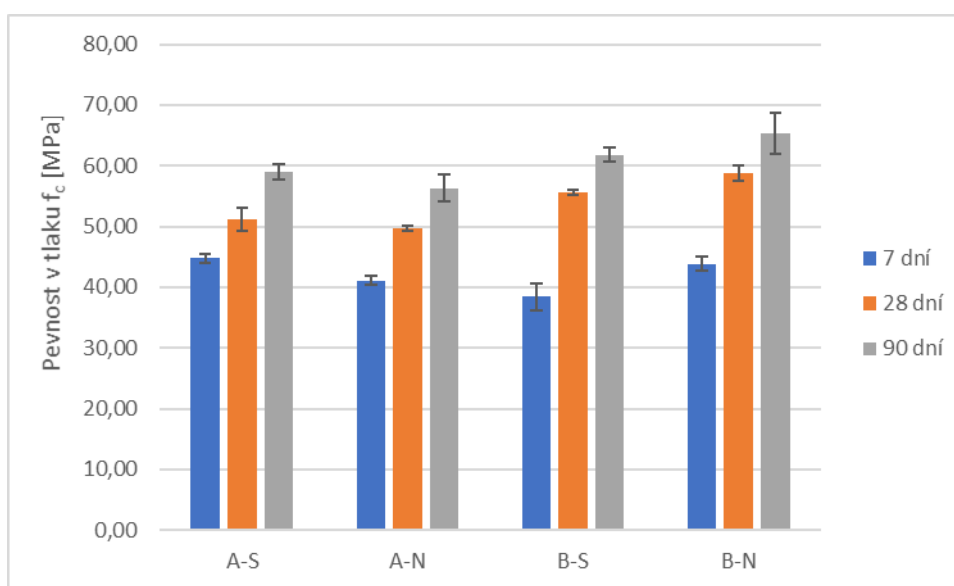
## B.5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A JEJICH DISKUZE

Celkem bylo odzkoušeno 36 krychlí pro zjištění objemové hmotnosti a pevností v tlaku, 36 krychlí pro zjištění pevností v příčném tahu a hloubky průsaků tlakovou vodou a 36 hranolů pro zjištění objemové hmotnosti, dynamických modulů pružnosti stanovených ultrazvukovou i rezonanční metodou a pevností v tahu ohybem. Výsledky jsou shrnuty v následujících tabulkách s průměrnými hodnotami a výběrovými směrodatnými odchylkami.

V Tab. 7 je uveden vývoj pevnosti v tlaku jednotlivých betonů. Pro lepší představu jsou výsledky uvedeny také graficky, a to na Obr. 24.

Tab. 7: Průměrné pevnosti v tlaku stanovené na krychlích včetně výběrových směrodatných odchylek (v.s.o.)

Průměrná pevnost v tlaku						
Beton	7 dní		28 dní		90 dní	
	$f_c$ [MPa]	v.s.o.	$f_c$ [MPa]	v.s.o.	$f_c$ [MPa]	v.s.o.
A-S	44,8	0,71	51,2	1,88	59,0	1,35
A-N	41,1	0,65	49,7	0,42	56,3	2,19
B-S	38,5	2,19	55,7	0,40	61,8	1,10
B-N	43,9	1,24	58,8	1,33	65,3	3,31



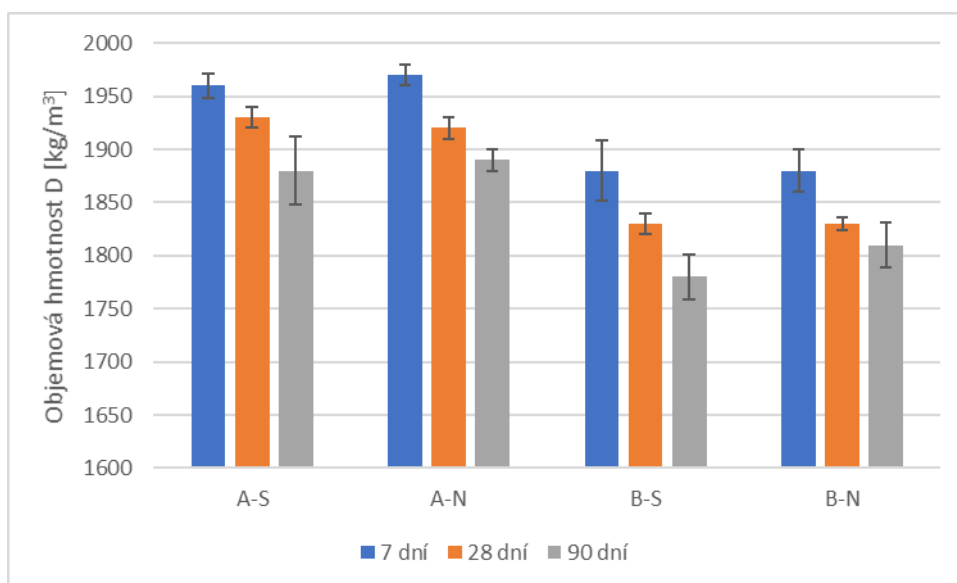
Obr. 24: Porovnání pevností v tlaku

Z výsledků je vidět, že vstupní vlhkost kameniva nemá na hodnoty pevnosti do 90 dní zrání betonů v podstatě žádný vliv. Rozdíly mezi betony N a S jsou velmi malé a nepřevyšují variabilitu výsledků. U samozhutnitelného betonu je patrný pomalejší nárůst pevnosti v tlaku v prvních 7 dnech oproti transportbetonu.

V Tab. 8 je uveden vývoj objemové hmotnosti jednotlivých betonů. Pro lepší představu jsou výsledky uvedeny také graficky, a to na Obr. 25.

Tab. 8: Průměrné objemové hmotnosti stanovené na krychlích včetně v.s.o.

Průměrná objemová hmotnost						
Beton	7 dní		28 dní		90 dní	
	D [kg/m <sup>3</sup> ]	v.s.o.	D [kg/m <sup>3</sup> ]	v.s.o.	D [kg/m <sup>3</sup> ]	v.s.o.
A-S	1960	12	1930	10	1880	32
A-N	1970	10	1920	10	1890	10
B-S	1880	29	1830	10	1780	21
B-N	1880	20	1830	6	1810	21



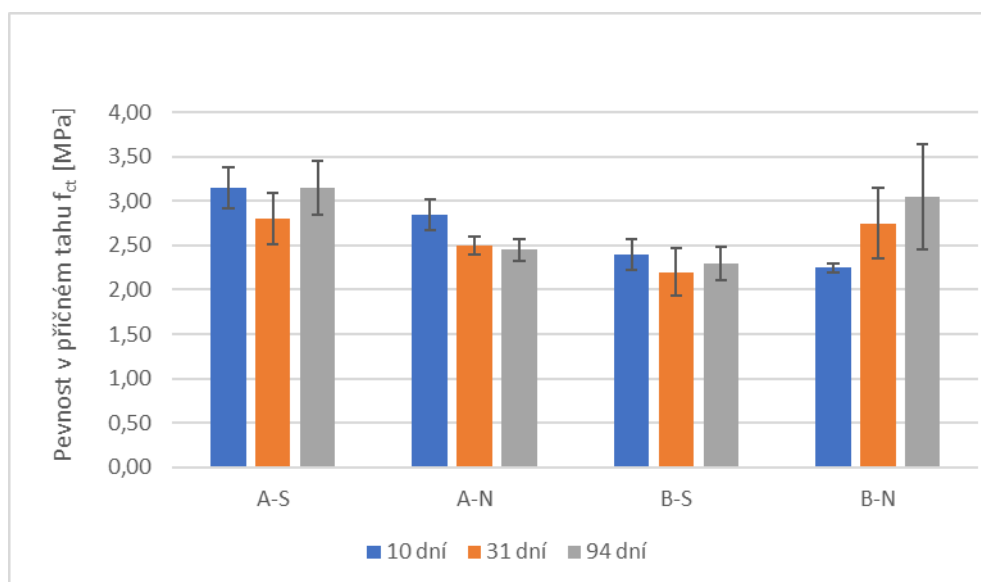
Obr. 25: Porovnání objemových hmotností

Z výsledků lze vidět očekávaný průběh objemové hmotnosti v čase. Vzhledem k uložení zkušebních těles tak, aby beton volně vysychal všemi plochami těles, není postupné snižování objemové hmotnosti nijak překvapivé. U všech betonů klesla objemová hmotnost mezi 7. a 90 dnech jejich stáří o přibližně 80 kg/m<sup>3</sup>.

V Tab. 9 je uveden vývoj pevnosti v příčném tahu jednotlivých betonů. Pro lepší představu jsou výsledky uvedeny také graficky, a to na Obr. 26.

Tab. 9: Průměrné pevnosti v příčném tahu stanovené na krychlích

Průměrná pevnost v příčném tahu						
Beton	10 dní		31 dní		94 dní	
	$f_{ct}$ [MPa]	v.s.o.	$f_{ct}$ [MPa]	v.s.o.	$f_{ct}$ [MPa]	v.s.o.
A-S	3,15	0,24	2,80	0,29	3,15	0,30
A-N	2,85	0,17	2,50	0,10	2,45	0,13
B-S	2,40	0,18	2,20	0,26	2,30	0,19
B-N	2,25	0,05	2,75	0,40	3,05	0,59



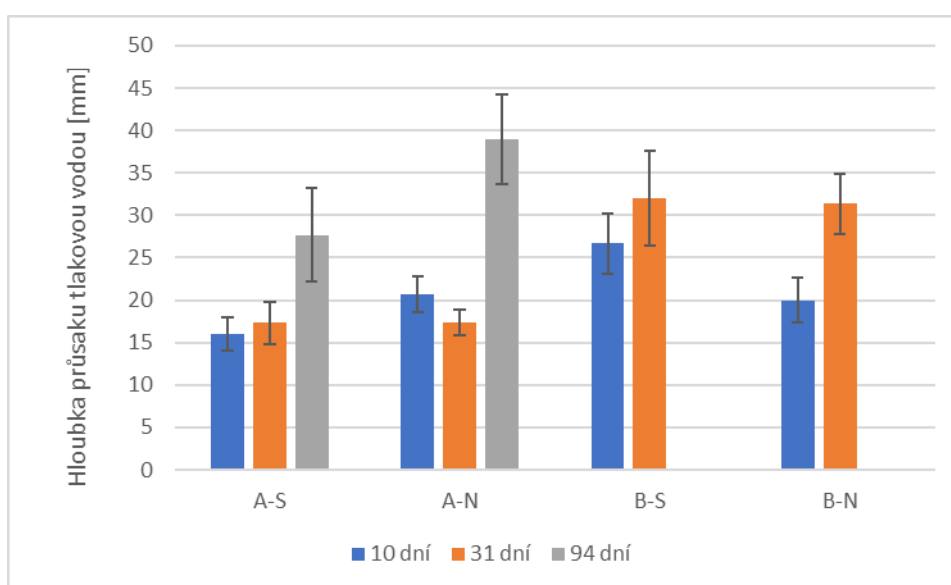
Obr. 26: Porovnání pevností v příčném tahu

Z výsledků lze vidět že pevnost v příčném tahu se pohybuje různě mezi 2,25-3,15 MPa v průběhu všech měření. Lze uvažovat, že vstupní vlhkosti lehkého kameniva nemá na pevnost v příčném tahu skoro žádný vliv. Variabilita výsledků je vyšší než změny v čase.

V Tab. 10 je uveden vývoj hloubek průsaku tlakovou vodou jednotlivých betonů. Pro lepší představu jsou výsledky uvedeny také graficky, a to graficky na Obr. 27.

Tab. 10: Průměrné hloubky průsaku tlakovou vodou stanovené na krychlích

Průměrná hloubka průsaku tlakovou vodou						
Beton	10 dní		31 dní		94 dní	
	h [mm]	v.s.o.	h [mm]	v.s.o.	h [mm]	v.s.o.
A-S	16	2	17	3	28	6
A-N	21	2	17	2	39	5
B-S	27	4	32	6	-	-
B-N	20	3	31	4	-	-



Obr. 27: Porovnání hloubek průsaku tlakovou vodou

Z výsledků průsaku tlakovou vodou není u betonu A zatím možné vyvodit žádné definitivní závěry. Je vidět, že transportbeton dosahuje nejhorších výsledků ve stáří 90 dní, ovšem u lehkého betonu a zejména při určování vlivu vstupní vlhkosti lehkého kameniva je nutné počkat na dlouhodobé výsledky (po 1, 2 nebo i více letech). To však již není předmětem této bakalářské práce.

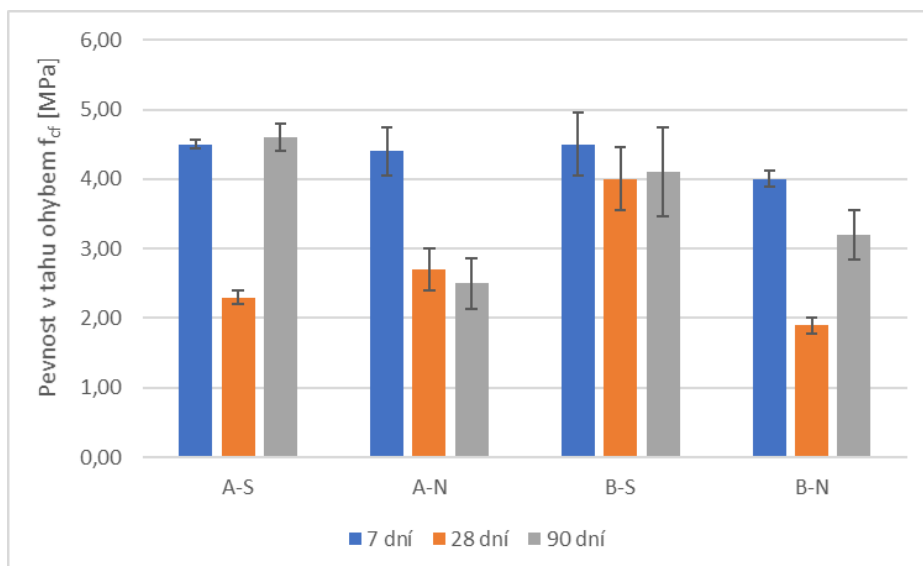
U samozhutnitelného betonu naopak z výsledků průsaku tlakovou vodou jednoznačný závěr učinit lze. Tento beton je navržený nedokonale a bude nutné recepturu upravit tak, aby beton fungoval. Trhliny (viz Obr. 23 vlevo a Příloha 1), které se v betonu B po přibližně 90 dnech zraní objevily, značí, že beton vykazuje vysokou míru objemových změn. Navrhnout recepturu lehkého betonu, a zejména

lehkého samozhutitelného betonu, je poměrně obtížné, protože každé lehké kamenivo má jiné vlastnosti (nejen odolnost zrn proti drčení, ale zejména nasákavost či rychlost absorpce vody). Vzhledem k výraznému poškození vnitřní struktury samozhutitelného betonu nemohla být zkouška průsaku tlakovou vodou v 90 dnech provedena. Je tedy téměř jisté, že se návrh receptury betonu B nezdařil. Výše uvedené vlastnosti byly určeny na krychlích, které byly vyrobeny v srpnu 2019. Následující vlastnosti byly určeny na hranolech, které byly vyrobeny v únoru 2020. Ačkoliv byly použity stejné receptury, byly pro výrobu použity složky jiných šarží (např. cement či agloporit). Tím pádem se pravděpodobně nepodařilo připravit stejné betony, což je vidět na výsledcích konzistence (sednutí kužele u betonu A a čas  $T_{500}$  u betonu B). Vlastnosti stanovené na krychlích proto nelze bezvýhradně spojovat s vlastnostmi stanovenými na hranolech.

V Tab. 11 je uveden vývoj pevnosti v tahu ohybem jednotlivých betonů. Pro lepší představu jsou výsledky uvedeny také graficky, a to na Obr. 28.

*Tab. 11: Průměrné pevnosti v tahu ohybem stanovené na hranolech*

Průměrná pevnost v tahu ohybem [MPa]						
Beton	7 dní		28 dní		90 dní	
	$f_{cf}$ [MPa]	v.s.o	$f_{cf}$ [MPa]	v.s.o	$f_{cf}$ [MPa]	v.s.o
A-S	4,50	0,06	2,30	0,10	4,60	0,20
A-N	4,40	0,35	2,70	0,31	2,50	0,36
B-S	4,50	0,45	4,00	0,45	4,10	0,64
B-N	4,00	0,12	1,90	0,12	3,20	0,36



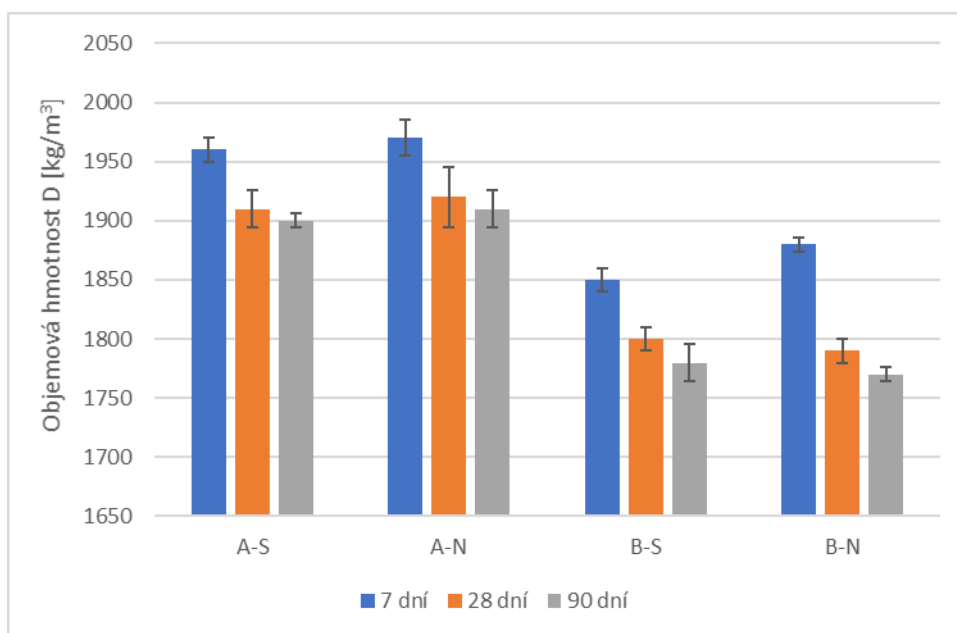
Obr. 28: Porovnání pevností v tahu ohybem

Výsledky pevnosti v tahu ohybem není možné jednoznačně interpretovat. Jak již bylo uvedeno, je to i z důvodu, že u tohoto typu experimentu se může vliv vlhkosti kameniva projevit až po několika letech. Na základě všech provedených zkoušek nelze určit, proč u betonu A-S a B-N došlo k poklesu pevnosti v tahu ohybem ve stáří 28 dní. Aby mohl být tento fenomén objasněn, bylo by nutné znát více informací, jako je např. rychlost přirozeného vysychání a nasákávání použitého agloporitu, vývoj smrštění betonů apod. Doporučení (průběžně stanovovat vlastnosti lehkého kameniva, kdyby se experiment měl opakovat, průběžný mikroskop, v případě finančních možností CT, nanointendace v různých časech).

V Tab. 12 jsou uvedeny objemové hmotnosti stanovené na hranolech je jednotlivých betonů. Pro lepší představu jsou výsledky uvedený také graficky, a to na Obr. 29.

Tab. 12: Průměrné objemové hmotnosti stanovené na hranolech

Průměrná objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]						
Beton	7 dní		28 dní		90 dní	
	D [kg/m <sup>3</sup> ]	s.v.o.	D [kg/m <sup>3</sup> ]	s.v.o.	D [kg/m <sup>3</sup> ]	s.v.o.
A-S	1960	10	1910	15	1900	6
A-N	1970	15	1910	12	1910	15
B-S	1850	10	1880	10	1780	15
B-N	1880	6	1790	10	1770	6



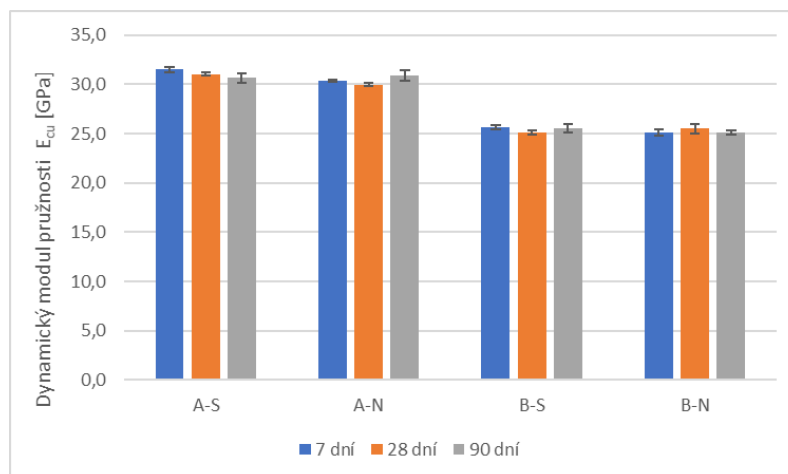
Obr. 29: Porovnání objemových hmotností

Z výsledků je znatelný pokles objemových hmotností hranolů. Není ale plynule lineární jako u zkušebních těles tvaru krychle. Hranol má totiž větší plochu které může odpařovat. U všech betonů klesla objemová hmotnost mezi 7. a 90 dnech jejich stáří o přibližně 75 kg/m<sup>3</sup>.

V Tab. 13 až 16 jsou uvedeny hodnoty dynamických modulů pružnosti jednotlivých betonů. Pro lepší představu jsou výsledky uvedeny také graficky, a to na Obr. 30 až 33.

Tab. 13: Průměrné dynamické moduly pružnosti stanovené ultrazvukovou metodou

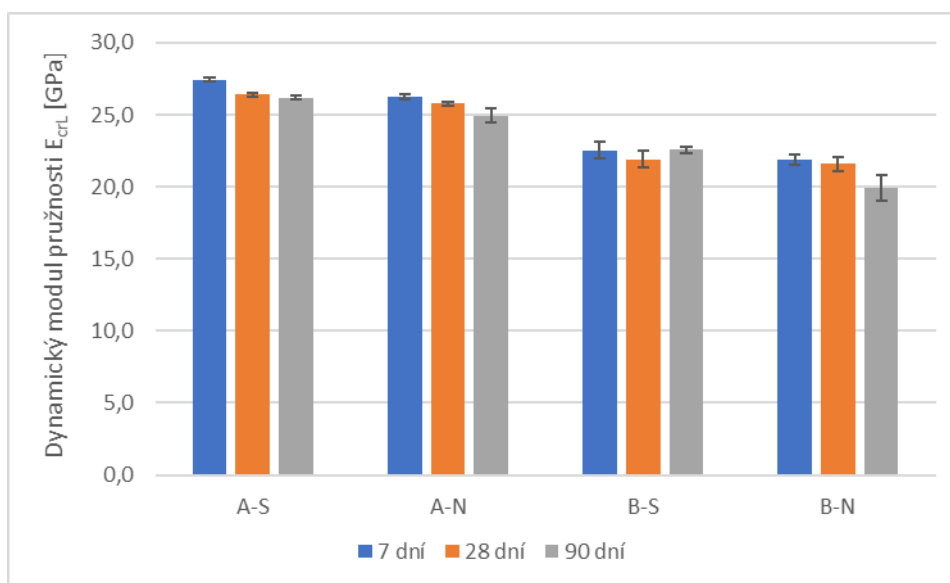
Beton	Průměrný dynamický modul pružnosti $E_{cu}$ [MPa]					
	7 dní		28 dní		90 dní	
	$E_{cu}$ [GPa]	s.v.o.	$E_{cu}$ [GPa]	s.v.o.	$E_{cu}$ [GPa]	s.v.o.
A-S	31,5	0,2	31,0	0,2	30,6	0,4
A-N	30,3	0,1	30,0	0,2	30,9	0,6
B-S	25,6	0,2	25,1	0,2	25,5	0,4
B-N	25,1	0,3	25,5	0,5	25,1	0,2



Obr. 30: Porovnání dynamických modulů stanovených ultrazvukovou metodou

Tab. 14: Průměrný dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou z podélného kmitání

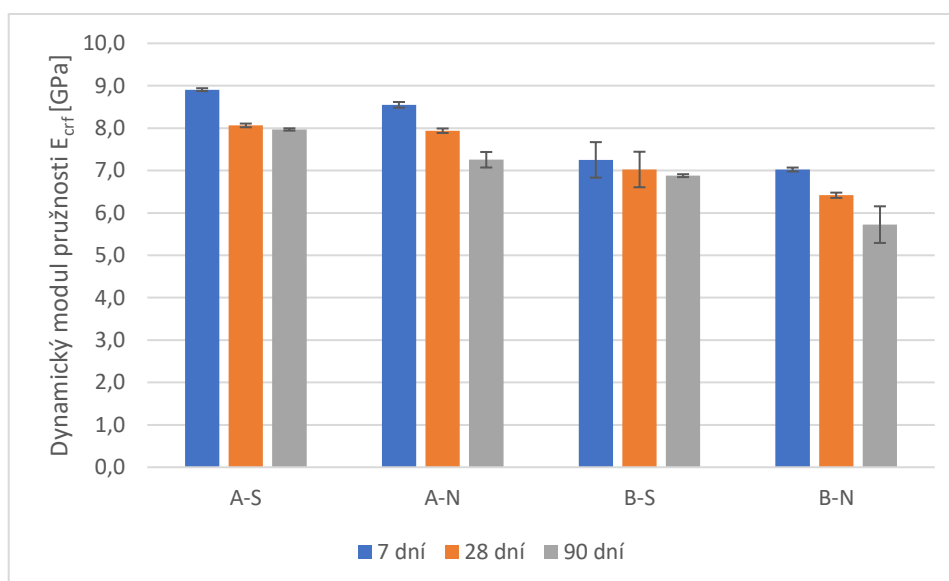
Průměrný dynamický modul pružnosti $E_{crL}$ [GPa]						
Beton	7 dní		28 dní		90 dní	
	$E_{crL}$ [GPa]	s.v.o.	$E_{crL}$ [GPa]	s.v.o.	$E_{crL}$ [GPa]	s.v.o.
A-S	27,4	0,2	26,4	0,2	26,2	0,1
A-N	26,2	0,2	25,8	0,2	24,9	0,5
B-S	22,5	0,6	21,9	0,6	22,6	0,2
B-N	21,9	0,4	21,6	0,5	19,9	0,9



Obr. 31: Porovnání dynamických modulů stanovených z podélného kmitání

Tab. 15: Průměrný dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou z příčného kmitání

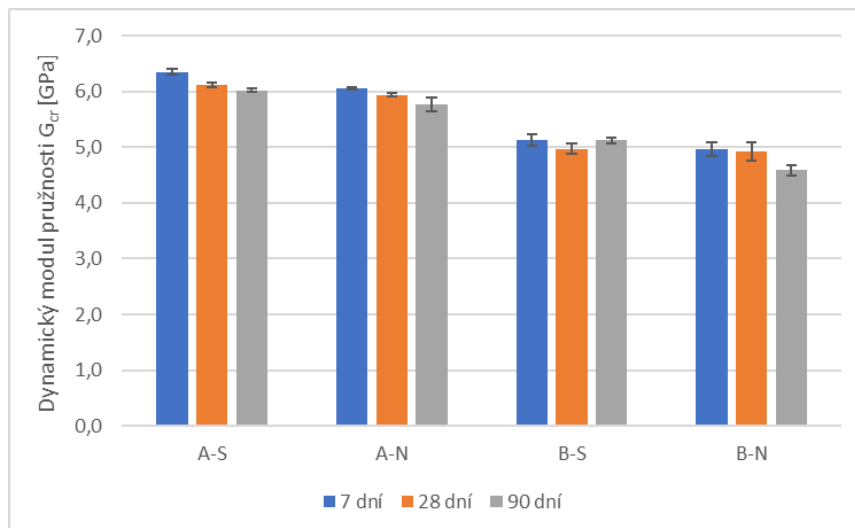
Průměrný dynamický modul pružnosti $E_{crf}$ [GPa]						
Beton	7 dní		28 dní		90 dní	
	$E_{crf}$ [GPa]	s.v.o.	$E_{crf}$ [GPa]	s.v.o.	$E_{crf}$ [GPa]	s.v.o.
A-S	8,9	0,0	8,1	0,0	8,0	0,0
A-N	8,5	0,1	7,9	0,1	7,3	0,2
B-S	7,3	0,4	7,0	0,4	6,9	0,0
B-N	7,0	0,1	6,4	0,1	5,7	0,4



Obr. 32: Porovnání dynamických modulů pružnosti stanovených z příčného kmitání

Tab. 16 Průměrný dynamický modulu pružnosti stanovený rezonanční metodou z kroutivého kmitání

Průměrný dynamický modulu pružnosti $G_{cr}$ [GPa]						
Beton	7 dní		28 dní		90 dní	
	$G_{cr}$ [GPa]	s.v.o.	$G_{cr}$ [GPa]	s.v.o.	$G_{cr}$ [GPa]	s.v.o.
A-S	6,3	0,1	6,1	0,0	6,0	0,0
A-N	6,0	0,0	5,9	0,0	5,8	0,1
B-S	5,1	0,1	5,0	0,1	5,1	0,1
B-N	5,0	0,1	4,9	0,2	4,6	0,1



*Obr. 33: Porovnání dynamických modulů pružnosti stanovených z přímého kmitání*

U hranolů se do 90 dnů trhliny neobjevily. Pokud by k porušení vnitřní struktury došlo, dynamický modul pružnosti by vykazoval pokles hodnot.

Z modulů dva dílčí závěry – 1. modul u betonu B je nižší než u betonu A. 2. dochází ke stagnaci či dokonce mírnému poklesu hodnot, teoreticky by však měly hodnoty růst v čase – rozhodující opět budou dlouhodobé zkoušky.

## B.6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo sledování vlivu vlhkosti lehkého kameniva při výrobě betonu na jeho vybrané parametry. Jako vstupní složka bylo použito lehké kamenivo Agloporit, které bylo v jednom případě dávkováno ve stavu suchém a ve druhém případě ve stavu plného nasycení. V rámci experimentu byly testovány dvě různé receptury lehkého betonu – transportbeton a samozhutnitelný beton. Celkově bylo otestováno 108 zkušebních těles pomocí destruktivních i nedestruktivních zkoušek. Byl zjišťován vývoj objemových hmotností, dynamických modulů pružnosti, tří druhů pevností a hloubky průsaku tlakovou vodou v čase. Experiment byl rozdělen na dvě etapy, přičemž v první z nich byly vyrobeny zkušební krychle a ve druhé, s odstupem 6 měsíců, byly vyrobeny zkušební hranoly. Z výsledků zkoušek čerstvého betonu je vidět, že se nepodařilo namíchat v obou etapách zcela stejné betony, ačkoliv byly použity identické receptury.

Z výsledků zkoušek je patrné, že samozhutnitelný beton má oproti transportbetonu pomalejší nárůst pevnosti v tlaku v prvních 7 dnech. Z ostatních zkoušek transportbetonu zatím není možné vyvodit žádné definitivní závěry. Vliv vstupní vlhkosti lehkého kameniva se u tohoto betonu během prvních 90 dní projevil zatím velmi málo. Obecně je možné konstatovat, že transportbeton s nasyceným kamenivem dosahuje během prvních 90 dní horších hodnot sledovaných vlastností než beton s kamenivem suchým. Pozitivní vliv nasyceného kameniva se však může projevit později, s odstupem až několika let.

U samozhutnitelného betonu je možné učinit závěr již po 90 dnech zrání, neboť se v jeho struktuře objevily trhliny, pravděpodobně kvůli vysoké míře smršťování. To se projevilo na vlastnostech, které jsou na kvalitu vnitřní struktury citlivé, jako je dynamický modul pružnosti nebo hloubka průsaku tlakovou vodou, kterou u samozhutnitelného betonu ve stáří 90 dní nebylo možné vůbec stanovit. Ukázalo se, že navrhnout recepturu lehkého betonu je poměrně obtížné, což u samozhutnitelného betonu platí dvojnásob. Celkově tedy lze konstatovat, že návrh receptury lehkého samozhutnitelného betonu se nepovedl a pro budoucí výrobu je určitě nutné recepturu ještě upravit.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DĚDEK, Miloň a František VOŠICKÝ. *Stavební materiály: pro 1. ročník SPŠ stavebních*. 6., upr. vyd. Praha: Sobotáles, 2008. ISBN 978-80-86817-26-2.
- [2] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [3] ADÁMEK, Jiří, Jan KOUKAL a Bohumil NOVOTNÝ. *Stavební materiály*. Brno: CERM, 1997. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0631-3.
- [4] SVOBODA, L. a spol. *Stavební hmoty*. 3. vydání. Praha, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.
- [5] ČSN EN 206+A1: *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [6] ČSN EN 197-1: *Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.
- [7] ČSN EN 12620+A1: *Kamenivo do betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [8] ČSN 73 2028: *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [9] Lehký beton. *Beton TKS* [online]. , 106-119 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2012-7-106.pdf>
- [10] IVAILO, Terzijiski, Kadlec JAROSLAV, Kratochvíl MIROSLAV a Zvolánek LUKÁŠ. *Vývoj a základní vlastnosti ultra lehkého betonu* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10785-vyvoj-a-zakladni-vlastnosti-ultralehkeho-betonu>
- [11] ČSN EN 12390-6: *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [12] ČSN 73 2402: *Provádění a kontrola konstrukcí z lehkého betonu z umělého pórovitého kameniva*. Praha: Vydavatelství norem, 1989.
- [13] ČSN EN 1520: *Prefabrikované dílce z mezerovitého betonu z pórovitého kameniva vyztužené nosnou a nenosnou výztuží*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [14] HUBERTOVÁ, M. Současné trendy ve využití lehkého betonu. *Beton TKS* [online]. , 112-113 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2019-7-112n.pdf>
- [15] ČSN EN 13055: *Pórovité kamenivo*. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [16] DROCHYTKA, Rostislav a Pavla MATULOVÁ. *Lehké stavební látky*. Brno: Vysoké učení technické, 2006. Učební texty vysokých škol.
- [17] *Vlastnosti a použití Agloporitu* [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <http://agloporit.cz/lehke-umele-kamenivo/>

- [18] ČSN EN 12390-7: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [19] ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [20] ČSN EN 12390-8: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [21] ČSN EN 12350-6: Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [22] ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [23] ČSN EN 12390-5: Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [24] ČSN 73 1371: Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [25] ČSN EN 12504-4: Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Praha: ČNI, 2005.
- [26] ČSN 73 1372: Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [27] PETR, Cikrle a Kocáb DALIBOR. Dynamické a statické moduly pružnosti betonu. *TZB Info* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/10746-dynamicke-a-staticke-moduly-pruznosti-betonu>
- [28] CIKRLÉ, P., D. KOCÁB a O. POSPÍCHAL. Zkoušení betonu ultrazvukovou metodou. *Beton TKS* [online]. , 74-79 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: [http://www.betontks.cz/sites/default/files/2013-3-74\\_0.pdf](http://www.betontks.cz/sites/default/files/2013-3-74_0.pdf)
- [29] PAVEL, Schmid. *Zkušebnictví a technologie: Modul BI02-M02*. Brno: CERM, 2004.
- [30] STANISLAV, Štěpán. *Využití ultrazvukové metody při diagnostice betonových konstrukcí*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Cikrle Ph.D.
- [31] ČSN EN 12350-8: Zkoušení čerstvého betonu - Část 8: Samozhutnitelný beton - Zkouška sednutí-rozlitím. Praha: ÚNMZ, 2010.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

**LC** – lehký beton

**A** - transportbeton

**B** – samozhutnitelný beton

**S** – suché lehké kamenivo

**N** – nasycené lehké kamenivo

**D** - objemová hmotnost

**m** – hmotnost tělesa

**V** – objem tělesa

**$f_{ck,cyl}$**  - cylindrická pevnost v tlaku

**$f_{ck,cube}$**  - krychelná pevnost v tlaku

**E** – modul pružnosti

**$\sigma$**  - napětí

**$\epsilon$**  - poměrná deformace

**$\tau$**  – tečné napětí

**$\gamma$**  – zkosení

**$\lambda$**  – štíhlostní poměr

**DTK** – drobné těžené kamenivo

**VMA** – stabilizační přísada

**w/c** – vodní součinitel

**F** - naměřená maximální tlaková síla

**L** - délka tělesa

**$f_{ct}$**  – pevnost v příčném tahu

**$f_{cf}$**  – pevnost v tahu ohybem

**$f_c$**  - pevnost betonu v tlaku

**$A_c$**  – tlačená plocha zkušebního tělesa

**$d_1, d_2$**  - rozměry příčného průřezu

**UZ** - ultrazvuk

**$E_{cu}$**  - dynamický modul pružnosti – UZ metoda

**$v_L$**  - rychlost impulzu

**$E_{crL}$**  - dynamický modul pružnosti v tlaku nebo tahu - rezonanční

**$f_L$**  - první vlastní frekvence podélného kmitání zkoušeného tělesa

**$f_f$**  - první vlastní frekvence příčného kmitání zkoušeného tělesa

**$f_t$**  - první vlastní kmitočet kroutivého kmitání zkušebního tělesa

**$E_{crL}$**  - dynamický modul pružnosti stanovený podélným kmitáním

**$E_{crf}$**  - dynamický modul pružnosti stanovený příčným kmitáním

**$G_{cr}$**  - dynamický modul pružnosti ve smyku

**$c_1$**  - korekční součinitel

**$k$**  - koeficient rozměrnosti prostředí

**$i$**  - poloměr setrvačnosti průřezu zkoušeného tělesa

**$s.v.o.$**  - směrodatná výběrová odchylka

## SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

<b>Obr. 1:</b> Závislost pevnosti betonu na vodním součiniteli w/c [3] .....	19
<b>Obr. 2:</b> Druhy lehkých betonů (zleva: hutný, mezerovitý, pěnobeton, pórobeton) [10].....	21
<b>Obr. 3:</b> Tvary usmyknutí: a) Správné,.....	29
<b>Obr. 4:</b> Měření sednutí [27].....	29
<b>Obr. 5:</b> Abramsova forma [27].....	29
<b>Obr. 6:</b> Druhy pevností v tlaku [3] .....	31
<b>Obr. 7:</b> způsoby vyvození příčného tahu [3] .....	32
<b>Obr. 8:</b> Vlevo tříbodový ohyb, vpravo čtyřbodový ohyb [23] .....	32
<b>Obr. 9:</b> Pracovní diagram betonu [3] .....	33
<b>Obr. 10:</b> Typy prozvučování ultrazvukovou metodou [30].....	34
<b>Obr. 11:</b> Rezonanční frekvence zleva podélná, příčná, kroutivá [26].....	35
<b>Obr. 12:</b> Vyrobené zkušební hranoly a krychle [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.] .....	36
<b>Obr. 13:</b> Míchání čerstvého betonu a vážení složek betonu .....	38
<b>Obr. 14:</b> Zleva zkouška sednutím, zkouška sednutí-rozlitím .....	39
<b>Obr. 15:</b> Přirozené vysychání všemi povrchy v klimatizované místnosti .....	40
<b>Obr. 16:</b> Vážení a měření rozměrů zkušebních těles [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.].....	40
<b>Obr. 17:</b> Zkušební stolice Brio Hranice AVB-PLC 6, stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.].....	42
<b>Obr. 18:</b> Zkušební krychle poškozené trhlinami [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.] .....	42
<b>Obr. 19:</b> Hydraulický lis ALPHA 3-3000 S .....	43
<b>Obr. 20:</b> Vlevo lis DELTA 6-300, vpravo zkoušený hranol porušený v tahu ohybem.....	44
<b>Obr. 21:</b> Vlevo měření doby průchodu UZ impulsu, vpravo stanovení vlastní frekvence zkušebního tělesa [fotoarchiv Ing. Dalibora Kocába, Ph.D.] .....	45
<b>Obr. 22:</b> Zkušební tělesa ze samozhutnitelného betonu .....	47
<b>Obr. 23:</b> Vlevo mikrotrhlina betonu B, vpravo mikrotrhlina betonu A .....	47
<b>Obr. 24:</b> Porovnání pevností v tlaku.....	48
<b>Obr. 25:</b> Porovnání objemových hmotností.....	49
<b>Obr. 26:</b> Porovnání pevností v příčném tahu.....	50
<b>Obr. 27:</b> Porovnání hloubek průsaku tlakovou vodou.....	51
<b>Obr. 28:</b> Porovnání pevností v tahu ohybem.....	53
<b>Obr. 29:</b> Porovnání objemových hmotností.....	54
<b>Obr. 30:</b> Porovnání dynamických modulů stanovených ultrazvukovou metodou.....	55
<b>Obr. 31:</b> Porovnání dynamických modulů stanovených z podélného kmitání.....	55
<b>Obr. 32:</b> Porovnání dynamických modulů pružnosti stanovených z příčného kmitání.....	56
<b>Obr. 33:</b> Porovnání dynamických modulů pružnosti stanovených z příčného kmitání .....	57
<b>Obr. 34:</b> Formy pro zkušební krychle.....	67
<b>Obr. 35:</b> Formy pro zkušební hranoly.....	67

<b>Obr. 36:</b> Stanovené objemové hmotnosti čerstvého betonu .....	67
<b>Obr. 37:</b> Trychtýř pro urychlení namáčení lehkého umělého kameniva .....	67
<b>Obr. 38:</b> Hutnění čerstvého betonu na vibrační desce .....	67
<b>Obr. 39:</b> Předpokládané porušení zkušebního hranolu v tahu ohybem .....	68
<b>Obr. 40:</b> Zkušební hranoly A-N .....	68
<b>Obr. 41:</b> Zkušební krychle B-S .....	68
<b>Obr. 42:</b> Zkušební hranol A-S1 .....	68
<b>Obr. 43:</b> Kaverny na zkušebním hranolu B-N3 .....	69
<b>Obr. 44:</b> Detail porušeného příčného řezu po zkoušce v tahu ohybem .....	69
<b>Obr. 45:</b> Mapování mikrotrhlin na zkušebních krychlích B-N .....	70
<b>Obr. 46:</b> Mapování mikrotrhlin na zkušebních krychlích A-N .....	70
<b>Obr. 47:</b> Detail vyplněné mikrotrhliny pod mikroskopem .....	71
<b>Obr. 48:</b> Detail hluboké mikrotrhliny pod mikroskopem .....	71
<b>Obr. 49:</b> Rezonanční křivka A-N .....	78
<b>Obr. 50:</b> Detailní rezonanční křivka A-N .....	78
<b>Obr. 51:</b> Rezonanční křivka A-S .....	79
<b>Obr. 52:</b> Detailní rezonanční křivka A-S .....	79
<b>Obr. 53:</b> Rezonanční křivka B-N .....	80
<b>Obr. 54:</b> Detailní rezonanční křivka B-N .....	80
<b>Obr. 55:</b> Rezonanční křivka B-S .....	81
<b>Obr. 56:</b> Detailní rezonanční křivka B-S .....	81

## SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

<b>Tab. 1:</b> Třídy pevnosti v tlaku obyčejného a těžkého betonu [5] .....	16
<b>Tab. 2:</b> Třídy pevnosti v tlaku lehkého betonu [5] .....	17
<b>Tab. 3:</b> Složky receptur čerstvého betonu .....	37
<b>Tab. 4:</b> Vlastnosti čerstvého betonu A .....	38
<b>Tab. 5:</b> Vlastnosti čerstvého betonu B .....	38
<b>Tab. 6:</b> Vodní součinitel .....	39
<b>Tab. 7:</b> Průměrné pevnosti v tlaku stanovené na krychlích včetně výběrových směrodatných odchylek (v.s.o.) .....	48
<b>Tab. 8:</b> Průměrné objemové hmotnosti stanovené na krychlích včetně v.s.o. ....	49
<b>Tab. 9:</b> Průměrné pevnosti v příčném tahu stanovené na krychlích .....	50
<b>Tab. 10:</b> Průměrné hloubky průsaku tlakovou vodou stanovené na krychlích .....	51
<b>Tab. 11:</b> Průměrné pevnosti v tahu ohybem stanovené na hranolech .....	52
<b>Tab. 12:</b> Průměrné objemové hmotnosti stanovené na hranolech .....	53
<b>Tab. 13:</b> Průměrné dynamické moduly pružnosti stanovené ultrazvukovou metodou .....	54
<b>Tab. 14:</b> Průměrný dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou z podélného kmitání .....	55
<b>Tab. 15:</b> Průměrný dynamický modul pružnosti stanovený rezonanční metodou z příčného kmitání .....	56
<b>Tab. 16:</b> Průměrný dynamický modulu pružnosti stanovený rezonanční metodou z kroutivého kmitání .....	56
<b>Tab. 17:</b> Tabulky změřených hodnot a výpočtů na zkušebních krychlích (str.71-72) .....	72
<b>Tab. 18:</b> Tabulky změřených hodnot a výpočtů na zkušebních hranolech (str. 73-76) .....	74

## SEZNAM PŘÍLOH

<b>PŘÍLOHA 1:</b> FOTODOKUMENTACE .....	67
<b>PŘÍLOHA 2:</b> TABULKY ZMĚŘENÝCH HODNOT .....	72
<b>PŘÍLOHA 3:</b> GRAFY REZONANČNÍCH KŘIVEK.....	78

## PŘÍLOHA 1: FOTODOKUMENTACE



Obr. 35: Formy pro zkušební hranoly



Obr. 34: Formy pro zkušební krychle



Obr. 36: Stanovené objemové hmotnosti  
čerstvého betonu



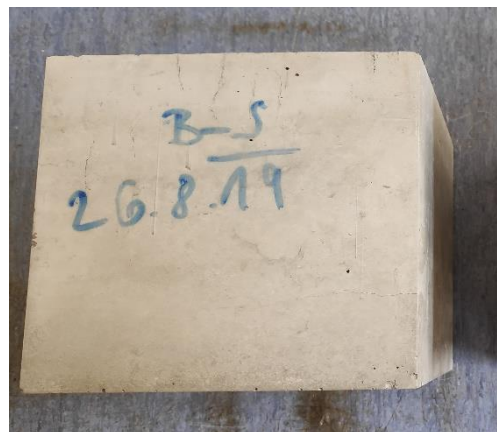
Obr. 38: Hutnění čerstvého betonu na  
vibrační desce



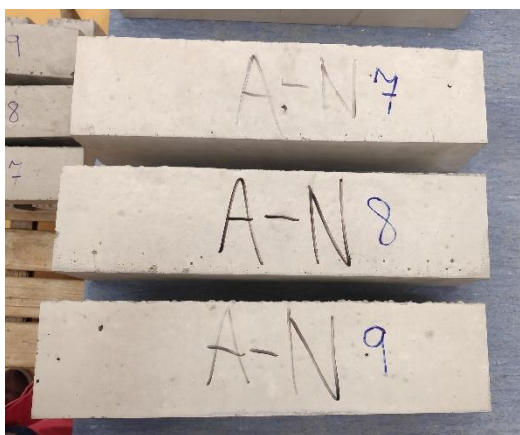
Obr. 37: Trychtýř pro urychlení  
namáčení lehkého umělého kameniva



Obr. 42: Zkušební hranol A-S1



Obr. 41: Zkušební krychle B-S



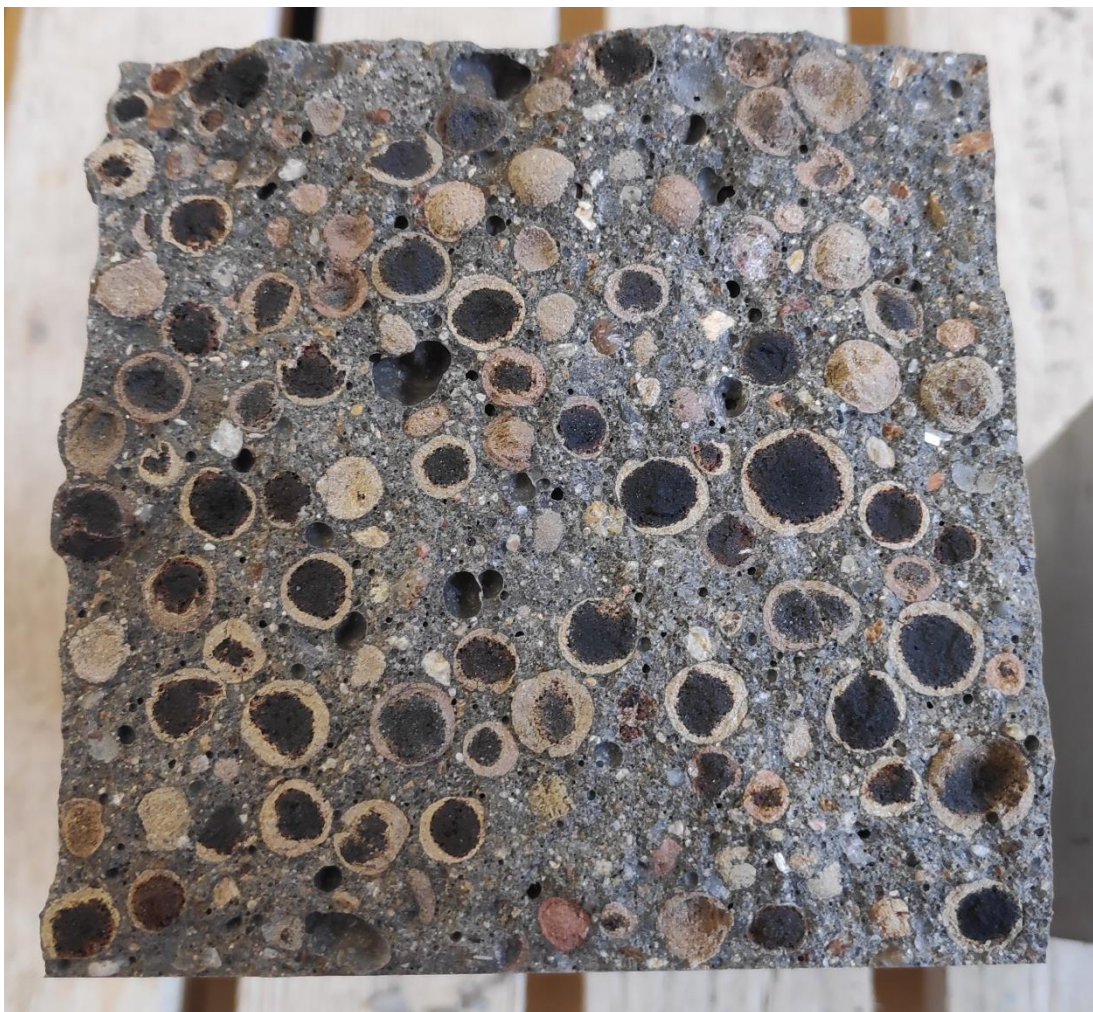
Obr. 40: Zkušební hranoly A-N



Obr. 39: Předpokládané porušení zkušebního hranolu v tahu ohybem



Obr. 43: Kaverny na zkušebním hranolu B-N3



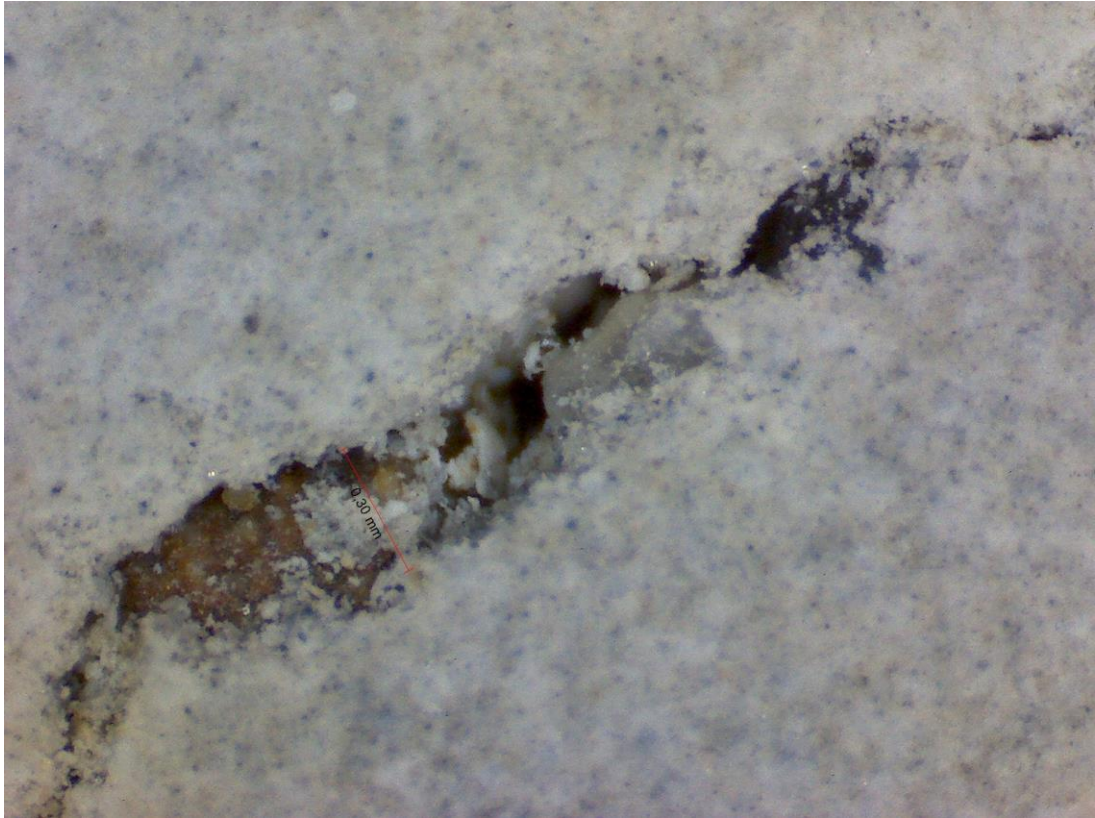
Obr. 44: Detail porušeného příčného řezu po zkoušce v tahu ohybem



Obr. 46: Mapování mikrotrhlin na zkušebních krychlích A-N



Obr. 45: Mapování mikrotrhlin na zkušebních krychlích B-N



Obr. 48: Detail hluboké mikrotrhliny pod mikroskopem



Obr. 47: Detail vyplněné mikrotrhliny pod mikroskopem

## PŘÍLOHA 2: TABULKY ZMĚŘENÝCH HODNOT

Tab. 17: Tabulky změřených hodnot a výpočtů na zkušebních krychlích (str.71-72)

Pevnost v tlaku									
Stáří [dny]	Krychle	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [kg]	D [kg/m <sup>3</sup> ]	A <sub>c</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>max</sub> [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]
7	T-A-S1	150,07	150,98	150,06	6,640	1950	22656,06	1027,6	45,4
	T-A-S2	149,87	148,56	149,88	6,561	1970	22264,69	999,4	44,9
	T-A-S3	149,89	149,78	149,95	6,575	1950	22450,52	987,4	44
	T-A-N1	149,91	151,59	150,10	6,741	1980	22724,11	934	41,1
	T-A-N2	149,92	151,81	150,09	6,730	1970	22758,61	922,6	40,5
	T-A-N3	149,90	148,86	150,14	6,560	1960	22314,11	933,4	41,8
28	T-A-S4	149,97	151,06	150,15	6,541	1920	22653,71	1169,6	51,6
	T-A-S5	150,14	150,32	150,15	6,560	1940	22568,29	1194,1	52,9
	T-A-S6	150,10	150,26	150,07	6,516	1930	22553,27	1110	49,2
	T-A-N4	149,88	150,86	150,06	6,516	1920	22610,90	1126,1	49,8
	T-A-N5	150,05	151,51	149,99	6,571	1930	22734,08	1136,6	50
	T-A-N6	149,99	149,15	150,03	6,399	1910	22369,51	1100,9	49,2
91	T-A-S7	150,04	151,79	150,05	6,284	1840	22773,06	1308,5	57,5
	T-A-S8	150,27	148,53	150,31	6,326	1890	22318,85	1340,9	60,1
	T-A-S9	150,69	151,16	150,63	6,505	1900	22776,79	1352,3	59,4
	T-A-N7	149,81	148,24	149,95	6,249	1880	22207,83	1239,4	55,8
	T-A-N8	149,97	150,59	149,91	6,395	1890	22583,98	1228,3	54,4
	T-A-N9	149,86	149,50	149,84	6,395	1900	22403,32	1315,3	58,7
Pevnost v tlaku									
Stáří [dny]	Krychle	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [kg]	D [kg/m <sup>3</sup> ]	A <sub>c</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>max</sub> [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]
7	T-B-S1	150,09	149,97	150,07	6,413	1900	22509,00	904,3	40,2
	T-B-S2	150,74	149,66	150,96	6,285	1850	22558,25	812	36
	T-B-S3	150,14	149,78	150,08	6,408	1900	22487,22	881,3	39,2
	T-B-N1	149,90	150,19	150,14	6,290	1860	22513,48	972,3	43,2
	T-B-N2	150,02	150,40	150,06	6,420	1900	22562,26	1022,6	45,3
	T-B-N3	149,86	151,45	150,15	6,402	1880	22695,55	977,8	43,1
28	T-B-S4	150,14	151,60	150,10	6,201	1820	22759,72	1277	56,1
	T-B-S5	150,11	150,81	149,93	6,212	1830	22637,34	1251,5	55,3
	T-B-S6	150,03	148,73	150,08	6,153	1840	22313,21	1240,9	55,6
	T-B-N4	150,08	152,80	149,94	6,302	1830	22931,46	1332,1	58,1
	T-B-N5	150,05	150,58	149,97	6,239	1840	22593,78	1363,3	60,3
	T-B-N6	149,97	149,72	149,94	6,160	1830	22452,76	1299,5	57,9
91	T-B-S7	149,97	150,27	149,77	6,078	1800	22535,24	1381,7	61,3
	T-B-S8	150,06	150,17	149,95	5,961	1760	22533,76	1376,1	61,1
	T-B-S9	150,06	149,46	149,98	6,027	1790	22427,22	1415,6	63,1
	T-B-N7	149,89	152,65	149,97	6,156	1790	22879,95	1416,5	61,9
	T-B-N8	150,00	150,96	149,86	6,179	1820	22643,25	1484,9	65,6
	T-B-N9	149,83	149,98	150,00	6,162	1830	22470,75	1540	68,5

Pevnost v příčném tahu a průsak tlakovou vodou										
BETON A	Stáří [dny]	Krychle	d [mm]		L [mm]		F <sub>ct</sub> [kN]	f <sub>ct</sub> [MPa]	h [mm]	
	10	P-A-S1		150,58	150,4	148,92	151,52	121	3,4	18
		P-A-S2		149,974	149,97	149,58	150,87	107,7	3,05	16
		P-A-S3		149,98	149,97	151,75	149,81	105,6	2,95	14
		P-A-N1		150,58	149,59	150,88	150,99	98	2,75	23
		P-A-N2		149,79	149,82	149,51	150,94	97,4	2,75	19
		P-A-N3		150,03	149,72	150,11	149,83	107,3	3,05	20
	31	P-A-S4		149,76	150,1	150,65	151,48	94,4	2,65	15
		P-A-S5		149,81	149,79	151,47	150,38	112,5	3,15	20
		P-A-S6		149,95	150,09	149,82	148,01	93,1	2,65	17
P-A-N4			149,68	150,06	150,89	152,25	86,1	2,4	16	
P-A-N5			149,75	149,98	149,96	149,93	92,6	2,6	17	
P-A-N6			149,62	150,11	150,16	152,52	88,2	2,5	19	
94	P-A-S7		149,84	149,87	149,85	149,56	100,5	2,85	25	
	P-A-S8		150,13	150,11	151,38	150,1	109,4	3,1	34	
	P-A-S9		149,94	150,05	150,85	150,33	122,8	3,45	24	
	P-A-N7		150,29	149,64	148,57	149,63	85,2	2,45	45	
	P-A-N8		149,6	150,29	150,88	150,48	90,5	2,55	37	
	P-A-N9		149,59	150,54	151,71	152,02	82,4	2,3	35	
Pevnost v příčném tahu a průsak tlakovou vodou										
BETON B	Stáří [dny]	Krychle	d [mm]		L [mm]		F <sub>ct</sub> [kN]	f <sub>ct</sub> [MPa]	h [mm]	
	10	P-B-S1		150,6	150,72	147,48	147,58	90,1	2,6	30
		P-B-S2		150,08	150,15	147,97	148,37	84,2	2,4	27
		P-B-S3		150,25	150,3	148,59	148,12	78,7	2,25	23
		P-B-N1		150,14	149,64	149,63	151,46	77,8	2,2	19
		P-B-N2		149,66	150,23	149,98	150,51	79,9	2,25	18
		P-B-N3		149,87	149,85	149,22	150,28	81,9	2,3	23
	31	P-B-S4		150,04	149,92	149,4	149,43	80,1	2,3	31
		P-B-S5		150,32	150,32	149,72	149,72	85,1	2,4	27
		P-B-S6		149,9	150	147,94	147,72	66,6	1,9	38
		P-B-N4		149,7	150,09	151,81	151,65	97,1	2,7	28
		P-B-N5		150,32	149,62	152,42	151,28	85,8	2,4	35
		P-B-N6		149,8	150	150,64	150,65	113,6	3,2	31
	94	P-B-S7		150,44	150,71	149,07	149,42	76,3	2,15	-
		P-B-S8		149,44	149,9	149,3	149,84	88,1	2,5	-
P-B-S9			149,74	150,19	150,42	150,69	78,6	2,2	-	
P-B-N7			149,68	150,51	150,61	150,68	113,5	3,2	-	
P-B-N8			149,78	150,44	151,79	151,67	86,6	2,4	-	
P-B-N9			149,74	150,01	148,27	147,78	123,5	3,55	-	

Tab. 18: Tabulky změřených hodnot a výpočtů na zkušebních hranolech (str. 73-76)

Pevnost v tahu ohybem									
BETON A	Stáří [dny]	Hranol	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]	h <sub>1</sub> [mm]	h <sub>2</sub> [mm]	L [mm]	F <sub>cf</sub> [MPa]	f <sub>cf</sub> [MPa]
	7	A-S1	100,91	101,04	99,85	99,71	399,78	14,89	4,4
		A-S2	100,07	98,32	99,98	100,04	399,79	14,97	4,5
		A-S3	102,65	102,94	100,17	100,24	399,71	15,33	4,5
		A-N1	99,74	98,97	99,48	99,43	399,79	14,43	4,4
		A-N2	100,57	99,54	100,52	100,67	399,79	13,82	4,1
		A-N3	100,25	101,45	100	99,92	399,75	16,19	4,8
	28	A-S4	100,89	100,67	100,05	100,12	399,94	7,66	2,3
		A-S5	103,04	103,04	99,9	99,86	399,59	7,62	2,2
		A-S6	101,17	102,47	100,13	100,53	399,59	8,03	2,4
A-N4		100,4	100,03	99,94	100,03	399,73	9,32	2,8	
A-N5		100,75	102,14	99,94	100,12	399,67	10,22	3,0	
A-N6		102,46	101,57	100,17	100,17	399,74	8,24	2,4	
90	A-S7	99,1	99,48	100,25	100,23	399,65	15,29	4,6	
	A-S8	101,92	101,43	100,05	100,09	399,58	14,77	4,4	
	A-S9	98,98	98,96	99,92	99,79	398,94	15,85	4,8	
	A-N7	100,21	98,8	100,25	100,31	398,92	7,48	2,2	
	A-N8	99,82	101	100,42	100,38	399,55	8,03	2,4	
	A-N9	99,4	97,01	100,15	100,23	399,47	9,68	2,9	
Pevnost v tahu ohybem									
BETON B	Stáří [dny]	Hranol	b <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]	h <sub>1</sub> [mm]	h <sub>2</sub> [mm]	L [mm]	F <sub>cf</sub> [MPa]	f <sub>cf</sub> [MPa]
	7	B-S1	100,8	100,67	100,04	100,02	399,96	15,53	4,6
		B-S2	100,38	100,71	100,27	100,67	399,22	14,67	4,3
		B-S3	101,31	100,86	99,65	99,72	399,31	15,59	4,7
		B-N1	101,12	102,39	99,75	99,68	399,66	13,87	4,1
		B-N2	100,33	100,74	99,96	100,11	399,92	13,61	4,1
		B-N3	99,23	100,08	99,94	99,85	399,88	13,09	3,9
	28	B-S4	101,26	100,67	100,44	100,5	399,09	8,87	2,6
		B-S5	99,82	101,15	100,45	100,29	399	7,18	2,1
		B-S6	99,87	100,36	99,71	99,63,	399,02	10,01	3,0
		B-N4	100,57	100,68	99,73	99,75	399,14	6,00	1,8
		B-N5	102,1	103,3	100,09	100,1	399,71	6,23	1,8
		B-N6	101,13	101,46	99,93	99,96	399,87	6,88	2,0
	90	B-S7	102,08	102,38	99,55	99,43	398,92	16,09	4,8
		B-S8	98,97	98,99	100,05	99,8	399,52	12,43	3,8
		B-S9	102,7	101,13	100,16	100,12	399,14	12,11	3,6
		B-N7	102,39	103,89	100,57	100,39	398,9	10,02	2,9
		B-N8	102,45	101,84	100,32	100,43	398,88	10,80	3,1
B-N9		100,67	101,12	100,25	100,04	398,86	12,30	3,6	

<b>Objemová hmotnost</b>						
Stáří [dny]	Hranol	b [mm]	h [mm]	L [mm]	m [kg]	D [kg/m <sup>3</sup> ]
7	A-S1	100,98	99,78	399,78	7,921	1970
	A-S2	99,20	100,01	399,79	7,724	1950
	A-S3	102,80	100,21	399,71	8,061	1960
	A-N1	99,36	99,46	399,79	7,852	1990
	A-N2	100,06	100,60	399,79	7,905	1960
	A-N3	100,85	99,96	399,75	7,928	1970
28	A-S4	100,78	100,09	399,94	7,729	1920
	A-S5	103,04	99,88	399,59	7,769	1890
	A-S6	101,82	100,33	399,59	7,779	1910
	A-N4	100,22	99,99	399,73	7,596	1900
	A-N5	101,45	100,03	399,67	7,797	1920
	A-N6	102,02	100,17	399,74	7,757	1900
90	A-S7	99,29	100,24	399,65	7,512	1890
	A-S8	101,68	100,07	399,58	7,717	1900
	A-S9	98,97	99,86	398,94	7,494	1900
	A-N7	99,51	100,28	398,92	7,681	1930
	A-N8	100,41	100,40	399,55	7,66	1900
	A-N9	98,21	100,19	399,47	7,506	1910

<b>Objemová hmotnost</b>						
Stáří [dny]	Hranol	b [mm]	h [mm]	L [mm]	m [kg]	D [kg/m <sup>3</sup> ]
7	B-S1	100,74	100,03	399,96	7,47	1850
	B-S2	100,55	100,47	399,22	7,515	1860
	B-S3	101,09	99,69	399,31	7,429	1850
	B-N1	101,76	99,72	399,66	7,638	1880
	B-N2	100,54	100,04	399,92	7,566	1880
	B-N3	99,66	99,90	399,88	7,536	1890
28	B-S4	100,97	100,47	399,09	7,25	1790
	B-S5	100,49	100,37	399,00	7,294	1810
	B-S6	100,12	99,71	399,02	7,151	1800
	B-N4	100,63	99,74	399,14	7,183	1790
	B-N5	102,70	100,10	399,71	7,294	1780
	B-N6	101,30	99,95	399,87	7,274	1800
90	B-S7	102,23	99,49	398,92	7,174	1770
	B-S8	98,98	99,93	399,52	7,109	1800
	B-S9	101,92	100,14	399,14	7,235	1780
	B-N7	103,14	100,48	398,90	7,329	1770
	B-N8	102,15	100,38	398,88	7,215	1760
	B-N9	100,90	100,15	398,86	7,127	1770

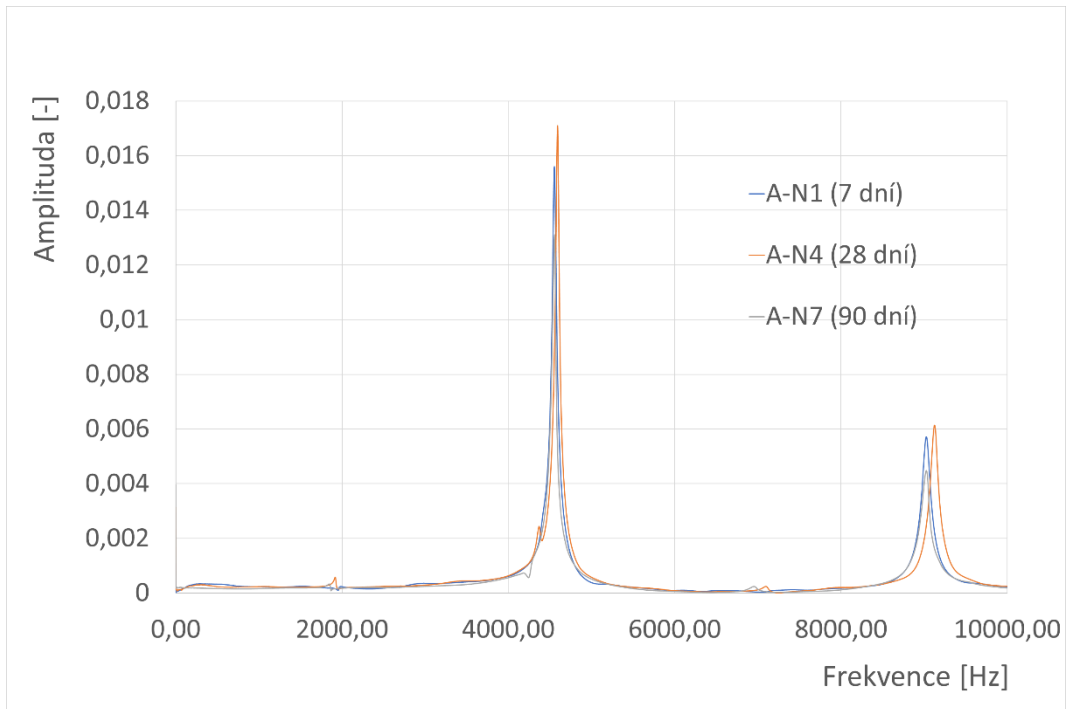
Dynamický modul pružnosti - ultrazvuková metoda							
Stáří [dny]	Hranol	$t_{L1}$ [ $\mu$ s]	$t_{L2}$ [ $\mu$ s]	$t_{L3}$ [ $\mu$ s]	$t_L$ [ $\mu$ s]	$v_L$ [km/s]	$E_{cu}$ [GPa]
7	A-S1	94,4	94,3	95	94,6	4,23	31,72
	A-S2	94,2	94,8	95,5	94,8	4,22	31,25
	A-S3	94,6	94,5	94,3	94,5	4,23	31,56
	A-N1	95,8	97,4	97,6	96,9	4,12	30,40
	A-N2	95,7	96,6	97,6	96,6	4,14	30,23
	A-N3	95,6	97	97,2	96,6	4,14	30,39
28	A-S4	94,9	93,6	94,5	94,3	4,24	31,07
	A-S5	94,1	93	94,2	93,8	4,26	30,87
	A-S6	94,8	92,9	93,7	93,8	4,26	31,20
	A-N4	95,9	95,2	95,8	95,6	4,18	29,88
	A-N5	95,2	95	96,4	95,5	4,18	30,19
	A-N6	95,6	95,6	95,8	95,7	4,18	29,88
90	A-S7	94,5	92,6	94,7	93,9	4,25	30,72
	A-S8	93,9	92,9	94,7	93,8	4,26	31,03
	A-S9	96	93,7	95,1	94,9	4,20	30,16
	A-N7	94,3	92	94,6	93,6	4,26	31,52
	A-N8	95,7	93,2	95,4	94,8	4,22	30,45
	A-N9	95,4	92,9	95,3	94,5	4,23	30,76

Dynamický modul pružnosti - ultrazvuková metoda							
Stáří [dny]	Hranol	$t_{L1}$ [ $\mu$ s]	$t_{L2}$ [ $\mu$ s]	$t_{L3}$ [ $\mu$ s]	$t_L$ [ $\mu$ s]	$v_L$ [km/s]	$E_{cu}$ [GPa]
7	B-S1	102,8	101,9	101,6	102,1	3,92	25,59
	B-S2	101,2	101,4	102,1	101,6	3,93	25,85
	B-S3	101,9	102,1	102	102,0	3,91	25,45
	B-N1	104,1	103,9	104	104,0	3,84	24,95
	B-N2	104,3	103,8	104,5	104,2	3,84	24,95
	B-N3	104	103,2	102,7	103,3	3,87	25,48
28	B-S4	100,9	98,8	100,1	99,9	3,99	25,65
	B-S5	100	99,3	99,8	99,7	4,00	26,06
	B-S6	100,5	98,9	100,3	99,9	3,99	25,79
	B-N4	101,1	99,5	100,9	100,5	3,97	25,39
	B-N5	101,8	100,1	101,1	101,0	3,96	25,12
	B-N6	100,6	98,9	99,9	99,8	4,01	26,05
90	B-S7	102,3	98,5	101	100,6	3,97	25,11
	B-S8	100,2	98,7	101	100,0	4,00	25,92
	B-S9	101,5	98,1	100,5	100,0	3,99	25,50
	B-N7	100,8	97,9	101	99,9	3,99	25,36
	B-N8	101,5	98,5	100,7	100,2	3,98	25,09
	B-N9	102,1	98,5	101,3	100,6	3,96	24,98

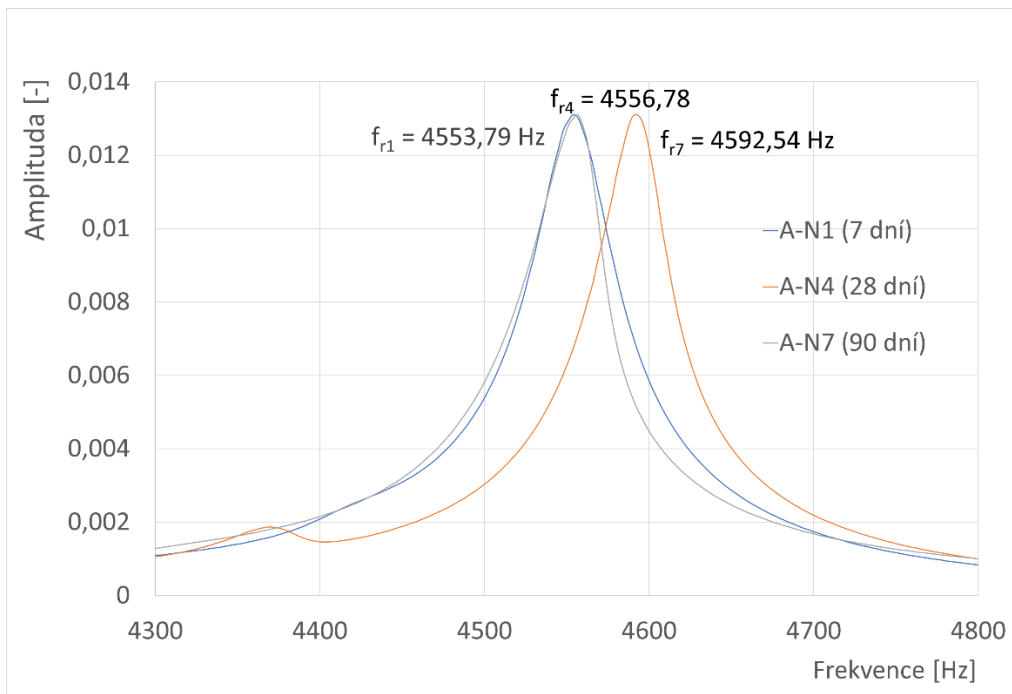
Dynamický modul pružnosti - rezonanční metoda							
Stáří [dny]	Hranol	$f_L$ [Hz]	$f_f$ [Hz]	$f_t$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G_{cr}$ [GPa]
7	A-S1	4676	2029	2757	27,54	8,93	6,38
	A-S2	4676	2035	2751	27,26	8,87	6,28
	A-S3	4688	2040	2763	27,53	8,93	6,37
	A-N1	4555	1977	2676	26,40	8,61	6,07
	A-N2	4561	1994	2688	26,07	8,48	6,03
	A-N3	4561	1988	2685	26,20	8,55	6,05
28	A-S4	4644	1962	2727	26,49	8,11	6,08
	A-S5	4659	1970	2758	26,20	8,05	6,12
	A-S6	4659	1962	2750	26,48	8,03	6,15
	A-N4	4598	1932	2705	25,67	7,79	5,92
	A-N5	4598	1939	2705	25,94	7,93	5,98
	A-N6	4598	1947	2705	25,67	7,89	5,92
90	A-S7	4663	1963	2730	26,26	7,99	6,00
	A-S8	4650	1951	2736	26,24	7,94	6,06
	A-S9	4638	1951	2724	26,02	7,98	6,00
	A-N7	4552	1877	2675	25,46	7,45	5,88
	A-N8	4497	1847	2638	24,54	7,09	5,63
	A-N9	4515	1859	2669	24,85	7,22	5,79

Dynamický modul pružnosti - rezonanční metoda							
Stáří [dny]	Hranol	$f_L$ [Hz]	$f_f$ [Hz]	$f_t$ [Hz]	$E_{crL}$ [GPa]	$E_{crf}$ [GPa]	$G_{cr}$ [GPa]
7	B-S1	4364	1879	2555	22,54	7,18	5,14
	B-S2	4387	1908	2555	22,82	7,43	5,17
	B-S3	4341	1867	2538	22,23	7,14	5,08
	B-N1	4249	1832	2474	21,69	6,99	4,90
	B-N2	4249	1838	2474	21,71	7,00	4,90
	B-N3	4295	1844	2520	22,30	7,08	5,11
28	B-S4	4447	1902	2621	22,55	7,07	5,24
	B-S5	4530	1932	2644	23,65	7,42	5,39
	B-S6	4462	1817	2606	22,82	6,58	5,21
	B-N4	4326	1795	2515	21,35	6,40	4,82
	B-N5	4326	1803	2530	21,29	6,36	4,85
	B-N6	4386	1811	2583	22,15	6,49	5,11
90	B-S7	4503	1908	2620	22,85	6,86	5,17
	B-S8	4417	1859	2583	22,42	6,86	5,11
	B-S9	4454	1877	2589	22,50	6,92	5,08
	B-N7	4141	1669	2466	19,32	5,36	4,58
	B-N8	4178	1706	2448	19,55	5,61	4,49
	B-N9	4313	1779	2491	20,95	6,20	4,68

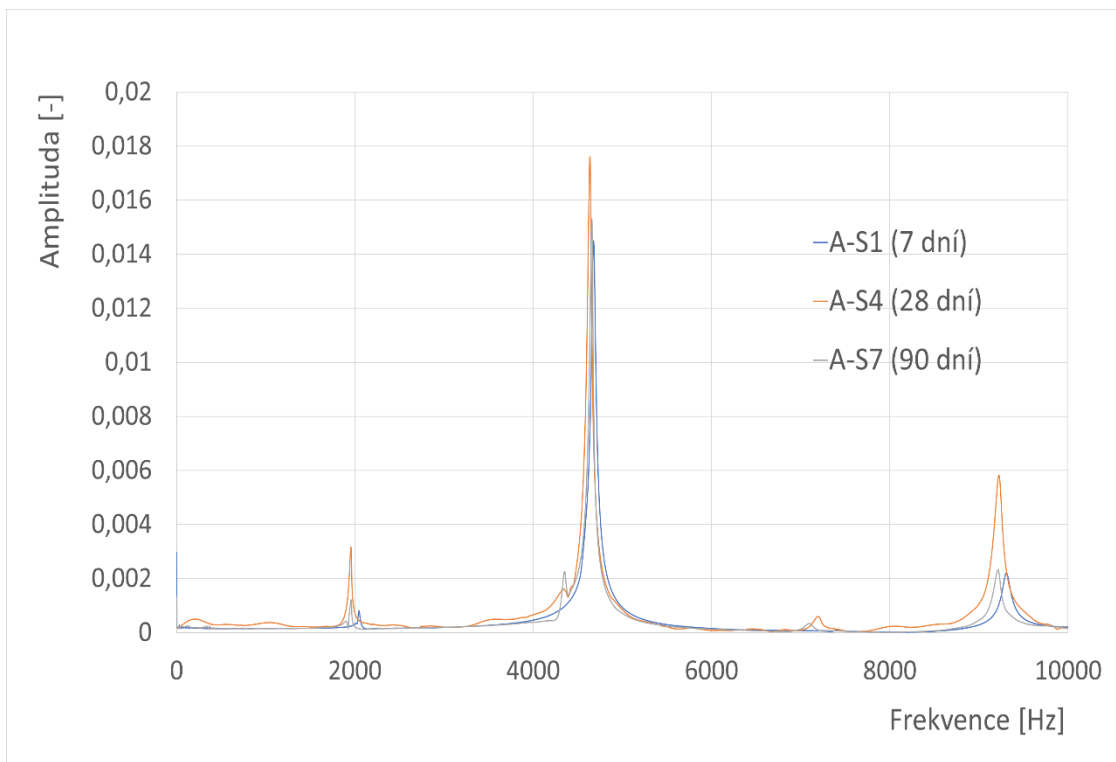
### PŘÍLOHA 3: GRAFY REZONANČNÍCH KŘIVEK



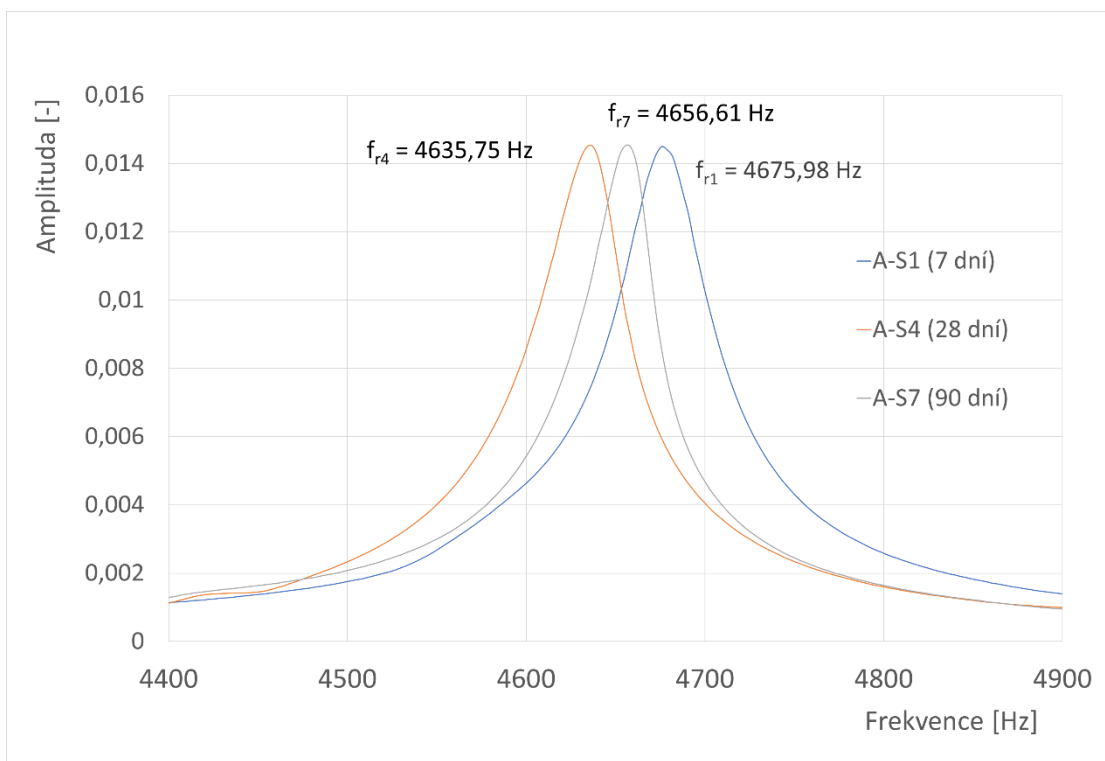
Obr. 49: Rezonanční křivka A-N



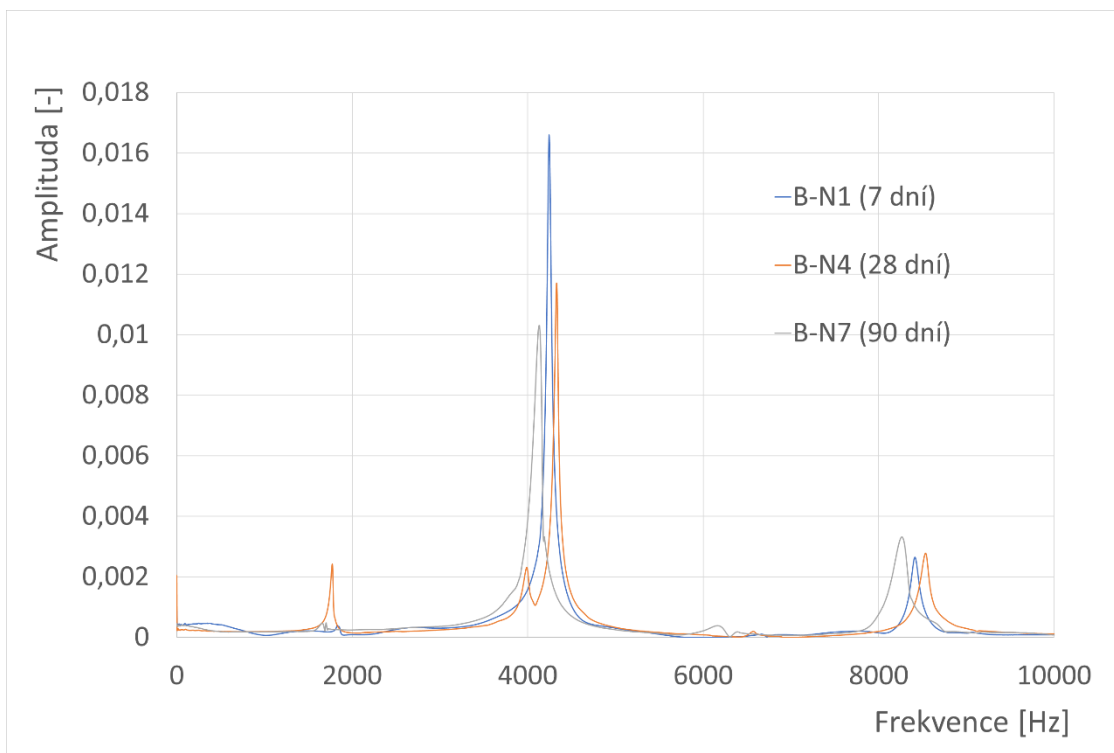
Obr. 50: Detailní rezonanční křivka A-N



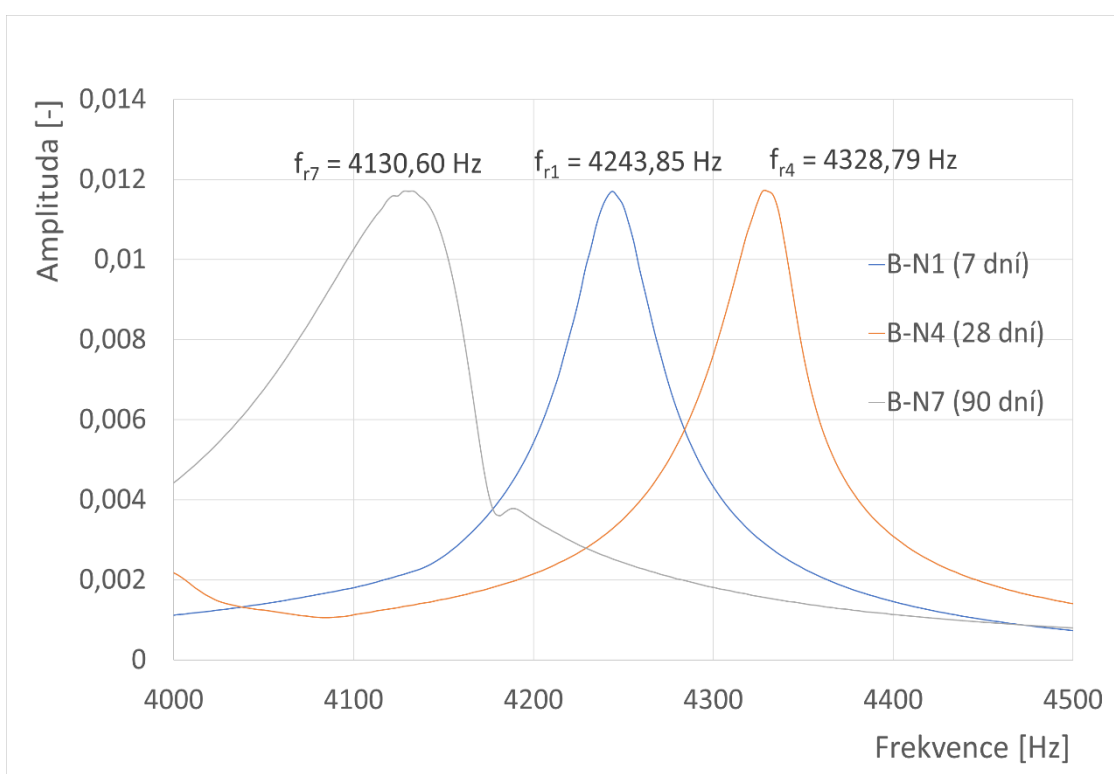
Obr. 51: Rezonanční křivka A-S



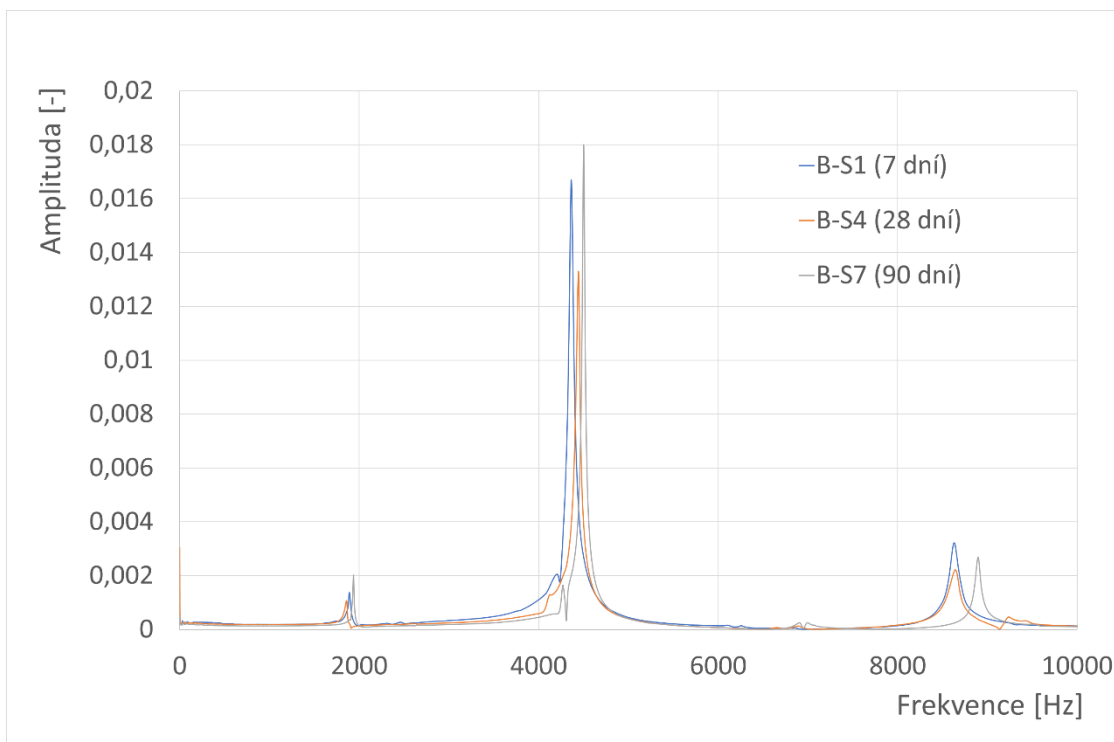
Obr. 52: Detailní rezonanční křivka A-S



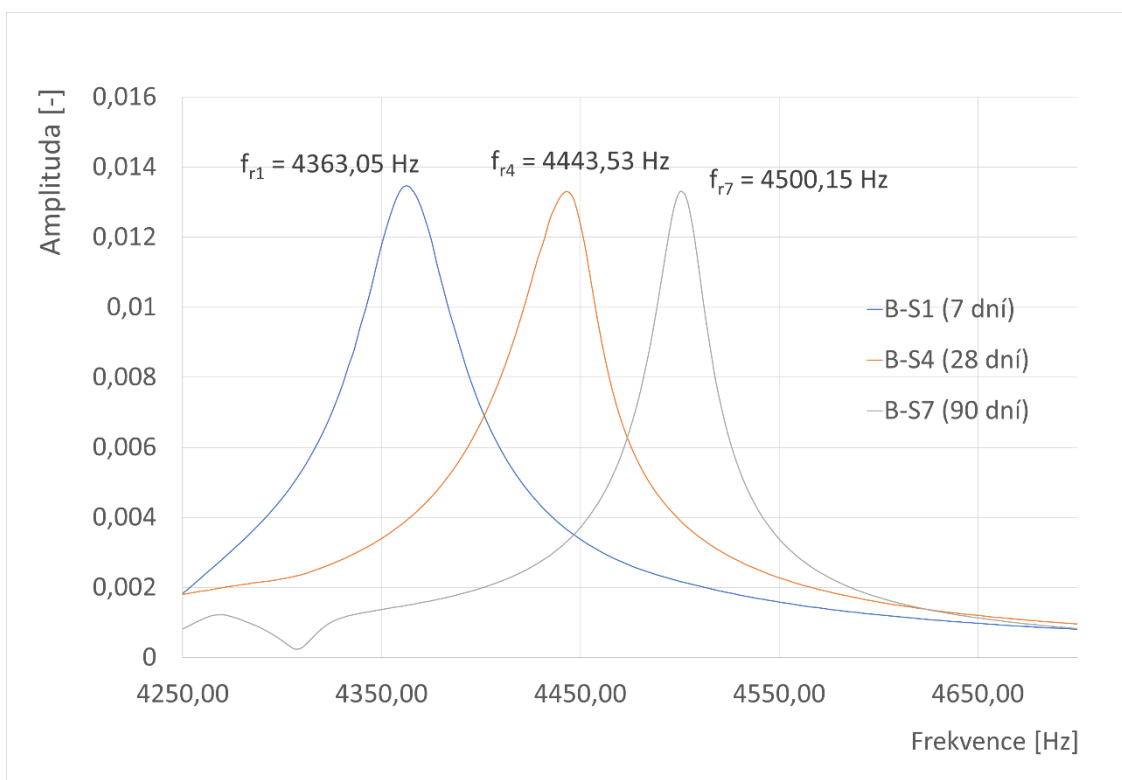
Obr. 53: Rezonanční křivka B-N



Obr. 54: Detailní rezonanční křivka B-N



Obr. 55: Rezonanční křivka B-S



Obr. 56: Detailní rezonanční křivka B-S