

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD  
KATEDRA MECHANIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
VLIV TUHNUTÍ BETONU NA VÝVOJ TLAKU V BEDNĚNÍ

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta aplikovaných věd  
Akademický rok: 2020/2021

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Karel ŠMÍD**  
Osobní číslo: **A19N0065P**  
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**  
Studijní obor: **Stavatelství**  
Téma práce: **Vliv tuhnutí betonu na vývoj tlaku v bedněni**  
Zadávající katedra: **Katedra mechaniky**

### Zásady pro vypracování

1. Vypracujte textové části dle zadání práce s obecným popisem a rozbohem betonových směsí v návaznosti na tuhnutí betonu a na jeho vývoj – vývoj tlaku v bedněni nebo na bedněni (stěnu a dno) se statickým schématem zatížení a řešením vnitřních sil a jejich vhodnosti či nevhodnosti použití do konstrukčních systémů bednicích systémů.
2. Zpracujte a připravte vzorky betonových směsí pro určení doby a počátku tuhnutí betonové směsi pro jednotlivé sady a dle ČSN na testování materiálových charakteristik dle vzorků na dané testovací zařízení jako experimentální část.
3. Zpracujte a vyhodnoťte testovací vzorky pomocí základních tabulek a hledisek pro tuhnutí, tvrdnutí a zpracování betonové směsi v návaznosti na tlak v bednicím systému s popisem jeho vývoje.

Rozsah diplomové práce: **60 – 75 stran A4**  
Rozsah grafických prací: **práce skládající se z výkresů a textových částí**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:


1. ČSN EN 1990 – Zásady navrhování stavebních konstrukcí.
2. ČSN EN 1991 – Zatížení stavebních konstrukcí.
3. ČSN EN 1992 – Navrhování betonových konstrukcí.
4. ČSN EN 206 – Výroba betonu, specifikace, vlastnosti, výroba a shoda.
5. Frick / Knoll – Stavební konstrukce I. a II. JAGA 2005.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kesi, Ph.D.**  
Katedra mechaniky

Datum zadání diplomové práce: **1. července 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **6. ledna 2021**



**Doc. Dr. Ing. Vlasta Radová**  
děkanka



**Doc. Ing. Jan Vimmr, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 1. července 2020

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci s názvem „Vliv tuhnutí betonu na vývoj tlaku v bedněni“ jsem vypracoval, pod odborným dohledem pana Ing. Petra Kesla, Ph.D. Při zpracování diplomové práce, bylo využito různých zdrojů a software, jejich výčet je shrnut v seznamu, který je součástí této práce.

Dále prohlašuji, že veškerý použitý software, použitý při řešení této diplomové práce, byl získán legálním způsobem.

V Plzni dne 6.1.2021

.....

Bc. Karel Šmíd

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Keslovi, Ph.D. za cenné odborné rady, připomínky, metodické vedení práce a čas strávený konzultacemi a zkušební laboratoři STACHEMA CZ s.r.o. za poskytnutí údajů o tuhnutí cementových směsí.

Dále bych rád poděkoval své rodině, za umožnění studia na vysoké škole a všem odborným pracovníkům Západočeské univerzity v Plzni, kteří mi během mého celého studia předávali své znalosti.

## **Anotace**

Předkládaná diplomové práce je zaměřena na analýzu vlastností cementu, stanovení počátku a konce doby tuhnutí za pomoci Vicatova přístroje, při různém působení teploty a stanovení výsledného vlivu tuhnutí na vývoj tlaku na svislou bednicí konstrukci.

## **Klíčová slova**

Cement, beton, složení betonu, počátek a konec doby tuhnutí, hydrostatický tlak, Bednicí konstrukce, rychlost plnění bednění, tlak v bednění.

## **Annotation**

The presented diploma thesis is focused on the analysis of cement properties - determination of the beginning and end of setting time with Vicat's device's help. To determine the different temperatures affect results in pressure development on vertical formwork structure.

## **Key words**

Cement, concrete, concrete composition, beginning and end setting time, hydrostatic pressure, formwork construction, filling speed of worm work, formwork pressure.

**Obsah:**

1	Beton.....	12
1.1	Požadavky na beton.....	13
1.2	Zatřídění betonů, vlastnosti a metody ověřování.....	14
1.2.1	Stupeň vlivu prostředí.....	14
1.2.2	Konzistence.....	18
1.2.3	Fyzikální vlastnosti.....	23
1.3	Složení betonu.....	25
1.3.1	Kamenivo.....	25
1.3.2	Voda (záměsová).....	26
1.3.3	Cement.....	26
1.3.4	Příspěvy.....	28
1.3.5	Příměsi.....	30
2	Metody stanovení doby tuhnutí betonové směsi.....	31
2.1	Stanovení doby tuhnutí pomocí Vicatova přístroje:.....	31
2.1.1	Stanovení počátku doby tuhnutí.....	32
2.1.2	Stanovení konce doby tuhnutí.....	33
2.2	Stanovení doby tuhnutí metodou „vtlačování“:.....	33
3	Tlak čerstvé betonové směsi na svislé konstrukce bedněni.....	35
3.1	Návrhová hodnota tlaku čerstvé betonové směsi.....	36
3.2	Účinky ovlivňující výslednou hodnotu tlaku čerstvé betonové směsi.....	36
3.3	Charakteristická hodnota tlaku čerstvé betonové směsi.....	39
4	Bedněni:.....	45
4.1	Základní požadavky.....	46
4.2	Druhy Bedněni.....	46
4.2.1	Jednorázové použití.....	47
4.2.2	Bedněni pro vícenásobné použití.....	47
4.2.3	Speciální bedněni.....	48
4.3	Vhodnost druhu bedněni.....	49
4.4	Odbedňování.....	49
5	Výroba, doprava, zpracování a tvrdnutí betonu.....	50
5.1	Výroba čerstvého betonu.....	50
5.2	Doprava betonu.....	51
5.3	Zpracování betonu.....	52
5.4	Ošetřování betonu.....	54



5.5	Tvrdnutí betonu.....	55
5.5.1	Proteplování betonu.....	56
5.5.2	Betonování za vyšších teplot v letním počasí.....	58
5.5.3	Betonování za nižších teplot v zimním počasí.....	59
6	Pevnost betonu.....	61
6.1	Zkoušky pevností betonu.....	61
6.2	Deformace betonu.....	63
6.3	Vodotěsnost betonu.....	64
7	Experimentální část.....	65
7.1	Tuhnutí betonu.....	65
7.2	Zkoušky pevnosti betonu, průsaku a CHRL.....	83
	Závěr:.....	91
	Seznam literatury a informačních zdrojů:.....	92
	Seznam použitého software:.....	93
	Seznam tabulek:.....	94
	Seznam obrázků:.....	96
	Seznam grafů:.....	97
	Seznam použitých symbolů a zkratk:.....	98

## **Úvod:**

Beton nejen pro své vysoké pevnosti v tlaku a variability tvarovatelnosti je v dnešní době jeden z nejvíce využívaných materiálů v moderním stavitelství. Lze jej považovat za kompozitní stavební materiál, který se skládá z kameniva, hydraulického pojiva neboli převážně cementu a plniva. Doba tuhnutí a tvrdnutí jsou zásadní pojmy, které jsou spolu neodmyslitelně propojeny a značně ovlivňují rychlost nabývání požadovaných vlastností betonové směsi. Tuhnutí betonové směsi začíná několik desítek minut po jejím smíchání. Dále po ukončení procesu tuhnutí následuje tvrdnutí, které v závislosti na konkrétní směsi, příměsí a následném způsobu ošetřování nemusí vždy dosáhnout stejných hodnot.

Oproti dřívějšímu způsobu provádění staveb, kdy převažoval monolitický způsob realizace a počítalo se v časovém harmonogramu s nemalou časovou náročností, tedy min. 3 týdny zrání betonové směsi a v některých případech i dvojnásobné doby, než bylo možné konstrukci plně zatížit, je dnes v moderním stavitelství urychlování procesu výstavby značný trend, zvláště u výškových staveb, kde lze vždy pokračovat ve zhotovení vyšších pater až po dostatečném vytvrdnutí těch předchozích.

Pro vliv trhu, ekonomické úspory a obchodní konkurence jsou dodavatelé nuceni vyrábět co nejefektivněji a nejrychleji. V oblasti monolitických konstrukcí je to právě tuhnutí a tvrdnutí, na kterých závisí doba zpracovatelnosti a zatížitelnosti a tedy i do značné míry celková doba výstavby. Nicméně tyto dva důležité pojmy jsou též samy ovlivňovány jak vnějšími, tak vnitřními faktory. Mezi vnitřní patří samotné složení cementu, poměr obsahu jednotlivých složek a jejich jemnost mletí. To do značné míry ovlivní proces hydratace, který je dále ovlivněn dalšími přísadami např. plastifikátory pro urychlení, nebo zpomalení procesu tuhnutí a dalšími chemickými přísadami. Mezi vnější vlivy patří jednoznačně teplota, která má těž velký vliv na proces hydratace a samotné ošetřování betonu v jeho počáteční fázi tuhnutí.

**Cíl práce:**

Cílem této práce je stanovit jednotlivé časy počátku a konce jednotlivých dob tuhnutí betonové směsi při různých vnějších faktorech a dále zkoumat jeho vliv na vývoj tlaku do bednicí konstrukce. Bude provedena rešerše literatury zabývající se obdobnou problematikou všech důležitých vlivů na dopady kvality betonu. Dále bude provedeno několik experimentů a jejich vzájemné porovnání, kde se bude zjišťovat počátek a konec doby tuhnutí směsi při působení vysoké (do 30 °C), střední (kolem 15°C) a nízké teploty (5°C). Při nízkých teplotách budou testovány minimálně dva vzorky, jeden z nich s příměsí plastifikátorů na urychlení doby tuhnutí.

Výsledkem bude vzájemné porovnání hodnot naměřených při působení různých vnějších teplot. Porovnání s odhady doby uvedených v normách, konkrétně podle ČSN 73 0042 a následně vyhodnocení případných odchylek.

# 1 Beton

Vědní disciplína Technologie betonu se zabývá jeho vlastnostmi, složením a výrobou betonových směsí s cílem na co nejmenší environmentální a energetické zatížení při výrobě zmíněného materiálu. Doložitelné písemné zmínky o betonu sahají až do 4. století před naším letopočtem ve formě sloupů z umělého kamene v oblasti Starověkého Egypta. Řekové v průběhu 2. století před naším letopočtem dokonce používali formu ztraceného bednění zvaného „Emplekton“, kde například hrady zdili většinou pomocí lomového kamene dvě rovnoběžné stěny a prostor mezi nimi vzniklý vyplňovali poté materiálem na bázi betonu, též prokládána lomovým kamenem.[1]

Kolem 1. století před naším letopočtem stavěli Féničané vodovodní přivaděče. Této starověké kultuře lze připisovat objev hydraulických pojiv, tehdy vápna a sopečného písku, popelu. [1]

Užívání hydraulických pojiv významně rozšířili Římané. Zdivo tvořené touto civilizací obsahovalo zejména drcený kámen, štěrky o frakci maximálně 70 mm, hydraulických pojiv a písku. Zhutňování bylo prováděno s intenzivním postupným dusáním a vpichováním. Z důvodu různých historických událostí upadl tento materiál a jeho rozvoj takřka v zapomnění. S rozvojem průmyslu v Evropě během 17. a 18. století a s tím i narůstajícím rozvojem stavebních technik a tím i betonu, ale zejména hydraulických pojiv. V roce 1825 J. Aspdin zakládá továrnu na výrobu do s názvem „Portlandský cement“. Roku 1844 dochází k počátku pálení surovin až na mez slinutí a rozpracovanějším teoriím chemismu portlandského cementu.[1]

Za zakladatele železobetonu je považován J. Monier (1823-1906) i když první zmínky o bronzových výztuhách betonu lze nalézt již v antickém Římě. V 19. století proto beton získává dominantní postavení ve vodním stavitelství, zejména ve výstavbě přehrad, staveb se spodní vodou a obecně je spojen se zakládáním staveb. S rozvojem technologií v průběhu 20. století přišel i výrazný zlom v používání betonu. Technologie zlepšili dostupnost, zpracovatelnost a výrazný nárůst dosahovaných pevností, tedy i celkové kvality. [1]

Bezesporu lze v dnešní době říci, že žádná výstavba, v jakémkoliv odvětví, se neobejde bez betonu, nebo materiálů na jeho bázi a to jak v případě hrubých staveb, tak i různých finálních úpravách.[1]

Beton jak ho známe dnes, je materiál, který by se dal stále nazývat „umělým kamenem“, je to látka složená z více materiálů. Skládá se z kameniva (drobného, hrubého), vody, přísad a příměsí v různých poměrech v závislosti na požadovaných vlastnostech. Konečné vlastnosti konstrukcí z tohoto materiálu mají velmi dobré vlastnosti v oblasti pevností materiálu při namáhání tlakem. Prostý beton však naopak dosahuje velmi malých hodnot v pevnostech při namáhání za ohybu (lze klasifikovat jako křehký materiál při působení za ohybu, tahu), proto u konstrukcí namáhaných tahem, nebo ohybem je beton používán v kombinaci s ocelí. Tato kombinace, jejichž výsledkem jsou železobetonové konstrukce lze uskutečnit díky podobné tepelné roztažnosti obou materiálů. Navíc beton vytváří krycí vrstvu před vnějšími vlivy působícími na ocel a tím výrazně zabraňuje vzniku koroze a prodlužuje životnost celé konstrukce a také zlepšuje vlastnosti odolávání účinkům požáru. Mezinárodní označení betonu je např. C25/30 - „C“ z anglického Concrete, neboli beton vzniklé pravděpodobně z latinského concrescere = tuhnutí. První číslo značení, vždy značí pevnost v tlaku na

válcovém tělese o průměru 30 mm a výšce 77 mm a druhá hodnota je pevnosti v tlaku krychelného tělesa o rozměrech 150x150x150 mm. Dimenze výztuže v železobetonových konstrukcích se pohybuje na napětí od 120 MPa do 250 MPa. Při napětí do 120 MPa lze předpokládat, že trhliny v konstrukci nevznikají. V uvedeném rozmezí vznikají v betonové konstrukci, při namáhání za ohybu, tahu, nebo jejich kombinací vznikají malé trhlinky šíře od 0,2 mm do 0,3 mm. V závislosti na typu použitého betonu, jehož pevnosti se například mohou běžně pohybovat do 10 MPa až do 70 MPa. Tato šíře trhlin neohrožuje životnost železobetonových konstrukcí. Ovšem při delším protažení výztuže a vzniku větších trhlin je potřeba individuálně posoudit vlivy a prostředí, ve kterých se konstrukce nachází. Mohlo by začít docházet ke korozi výztuže a tím se rapidně snížit životnost navrhované konstrukce. [2]

## **1.1 Požadavky na beton**

Obecně beton a betonové konstrukce pevně zabudované do stavby musí splňovat základní požadavky na stavby:

### Mechanická odolnost a stabilita:

- Schopnost konstrukce, stavby nebo systémové celku odolávat po dobu své navržené životnosti všem mechanickým zatížením a vlivům při jejím užívání tak, aby nedošlo k nadměrným deformacím, zřícením a nadměrnému opotřebením.

### Požární bezpečnost:

- V případě požáru musí být konstrukce, stavba nebo systémový prvek schopen minimálně po dobu požadovanou v návrhu odolávat požárnímu zatížení tak, aby byla omezena schopnost požáru se šířit v rámci jednoho celku, nebo šíření na sousedící budovy a objekty, zachovávat únosnost a stabilitu tak, aby osoby a zvířata byly schopny objekt včas opustit.

### Hygiena, ochrana životního prostředí a zdraví:

- Konstrukce, stavba nebo systémový prvek musí být navržen tak, aby působil zdravotně nezávadně na své okolí a nepůsobil škodlivě na zdraví uživatelů a svého okolí.

### Bezpečnost při užívání:

- Konstrukce, stavba nebo systémový prvek musí být navržen tak, aby při provozu nebylo způsobováno nepřiměřené nebezpečí vzniku úrazu.

### Ochrana proti hluku:

- Konstrukce, stavba nebo systémový prvek musí být navržen tak, aby nezatěžoval své okolí a samotné uživatele nadměrných hlukovým zatížením.

### Úspora energie a ochrana tepla:

- Konstrukce, stavba nebo systémový prvek musí být navržen tak, aby byla spotřeba energií jak při výstavbě, tak během její životnosti co nejmenší s ohledem na své okolí a klimatické podmínky. [1]

## 1.2 Zatřídění betonů, vlastnosti a metody ověřování

Betonová směs se podle ČSN EN 206-1 zatřídí podle různých kritérií podle:

- stupně vlivu prostředí
- stupně konzistence směsi
- třídy pevnosti v tlaku
- Třídy objemové hmotnosti

Tyto vlastnosti ověřujeme také podle situace, je-li beton ve fázi před počátkem doby tuhnutí a během doby tuhnutí. Do té doby, kdy je beton tvárný a lze tedy dále zpracovávat mluvíme o čerstvé betonové směsi. Po ukončení doby tuhnutí následuje bezprostředně tvrdnutí, která trvá 28 dní. V tomto případě jde o ztvrdlou betonovou směs.[3]

### Čerstvá směs

U čerstvé betonové směsi pozorujeme zejména:

- Konzistenci.
- Objemovou hmotnost a to uloženého betonu po zhutnění.
- Poměr vodního součinitele a cementu.
- Obsah vzduchu

[3]

### Ztvrdlá betonová směs

U ztvrdlé betonové směsi pozorujeme zejména:

- Pevnost v tlaku.
- Pevnost v příčném tahu.
- Pevnost v tahu ohybem.
- Nárůst jednotlivých pevností v průběhu zrání betonu až do konečné 28 denní pevnosti.
- Odolnost proti obrusu.
- Vodotěsnost betonu.
- Mrazuvzdornost.
- Objemová hmotnost.

- [3]

#### 1.2.1 Stupeň vlivu prostředí

Určení stupně vlivu prostředí je zejména důležité pro navržení životnosti dané stavební konstrukce. Určuje se chemická agresivita prostředí, nebezpečí koroze prvků výztuže (bez nebezpečí koroze X0, nebezpečí koroze XC, XD, XS), biologické vlivy/koroze betonu (XF, XA, XM).

V některých specifických případech může být zapotřebí speciální posudek pro stanovení příslušných ochranných opatření. Jedná se o:

- Jiné vlivy než jsou uvedeny v tabulce číslo 1.2.1
- Jiné netypické agresivní chemikálie
- Chemicky znečištěné pozemní vody

Na betonovou konstrukci může najednou působit více z uvedených vlivů. V těchto případech se vlivy vyjadřují jako jejich kombinace.

[3]

Tabulka 1.2.1 - Stupně vlivu prostředí

Označení stupně	Popis prostředí	Informativní příklady výskytu stupně vlivu prostředí
<b>1. Bez nebezpečí koroze nebo narušení</b>		
X0	Beton bez výztuže, nebo kovových prvků zabudovaných. Působí všechny vlivy s výjimkou zmrazování a rozmrazování, chemických vlivů nebo obrusu.	Beton využívaný uvnitř budov s velmi nízkou vlhkostí vzduchu
<b>2. Koroze vlivem karbonatace</b>		
Pokud beton obsahuje výztuž a jiné výztužné prvky z kovu je stupeň vlivu prostředí určen následovně:		
XC1	Suché nebo stále mokré.	Beton uvnitř budov s nízkou vlhkostí vzduchu, Beton trvale ponořený ve vodě
XC2	Mokré, občas suché	Povrch betonu vystavený dlouhodobému působení vody, Většina základů
XC3	Středně mokré, vlhké	Beton uvnitř budov se střední nebo velkou vlhkostí vzduchu Venkovní beton chráněný proti dešti
XC4	Střídavě mokré a suché	Povrchy betonu ve styku s vodou, které nejsou zahrnuty ve stupni vlivu prostředí XC2
<b>3. Koroze vlivem chloridů (ne mořské vody)</b>		
Pokud beton obsahuje výztuž a jiné výztužné prvky z kovu a přichází do styku je stupeň vlivu prostředí určen následovně:		
XD1	Středně mokré, vlhké	Povrchy betonů vystavené chloridům rozptýleným ve vzduchu
XD2	Mokré, občas suché	Plavecké bazény. Beton vystavený působení průmyslových vod obsahující chloridy.
XD3	Střídavě mokré a suché	Části mostů vystavené postřikům obsahující chloridy. Vozovky, betonové povrchy parkovišť
<b>4. Koroze vlivem chloridů Z MOŘSKÉ VODY</b>		
Beton obsahující výztuž nebo kovové vyztužující části atd., který přichází do styku s chloridy z mořské vody, nebo slaným vzduchem, stupeň vlivu prostředí se určuje následovně:		
XS1	Vystaven slanámu vzduchu, ale v nepřímém styku s mořskou vodou	Stavby přilehlé k pobřeží, nebo přímo na pobřeží.
XS2	Trvale ponořen v mořské vodě	Části konstrukcí, staveb v moři.
XS3	Smáčený a ostříkovaný přílivem mořské vody	Části konstrukcí, staveb v moři.

[ČSN EN 73 2403]



Tabulka 1.2.1 - Stupně vlivu prostředí

Označení stupně	Popis prostředí	Informativní příklady výskytu stupně vlivu prostředí
<b>5. Působení mrazu a rozmrazování v kombinaci s rozmrazovacími prostředky, nebo bez nich.</b>		
Mokrý beton vystaven střídavým účinkům mrazu a rozmrazování. Stupeň vlivu prostředí se určí následovně:		
XF1	Mírné nasycení vodou bez rozmrazovacích prostředků	Svislé betonové povrchy vystavené účinkům deště a mrazu
XF2	Mírné nasycení vodou s rozmrazovacími prostředky	Svislé betonové povrchy převážně silničních konstrukcí vystavené účinkům deště, mrazu a rozmrazovacím přípravkům rozptýlených ve vzduchu
XF3	Značné nasycení vodou bez rozmrazovacích prostředků	Vodorovné betonové plochy vystavené dešti a mrazu.
XF4	Značné nasycení vodou s rozmrazovacími prostředky	Mostovky a vozovky vystavené rozmrazovacím prostředkům Omývané části staveb v moři s působením mrazu
<b>6. Chemické působení</b>		
Beton vystavený chemickým vlivům od rostlé zeminy a podzemní vody. Stupeň vlivu prostředí se určí následovně:		
XA1	Slabě agresivní chemické prostředí	Beton vystavený rostlé zemině a podzemní vodě podle tabulky č. 1.2.1
XA2	Středně agresivní chemické prostředí	Beton vystavený rostlé zemině a podzemní vodě podle tabulky č. 1.2.1
XA3	Vysoce agresivní chemické prostředí	Beton vystavený rostlé zemině a podzemní vodě podle tabulky č. 1.2.1

[ČSN EN 73 2403]

Agresivní působení chemických vlivů uvedené v následující tabulce platí pro rostlé zeminy a podzemní vody v rozsahu teplot od +5 °C do +25°C. V případě dvou a více najednou působících vlivů stejného stupně je potřeba použít nejvyšší vyšší stupeň působení, neprokáže-li zvláštní posudek jinak.

Tabulka 1.2.2 – Mezní hodnoty pro stupně chemického působení rostlé zeminy a podzemní vody

Chemická charakteristika	Referenční zkušební metoda	XA1	XA2	XA3
<b>Podzemní voda</b>				
SO <sup>2-</sup> <sub>4</sub> mg/litr	EN 196-2	≥200 a ≤ 600	> 600 a ≤ 3 000	> 3 000 ≤ 6 000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 a ≥ 5,5	< 5,5 a ≥ 4,5	< 4,5 a ≥ 4,0
CO <sub>2</sub> mg/litr agresivní	EN 13557	≥ 15 a ≤ 40	> 40 a ≤ 100	> 100 až do nasycení
NH <sup>+</sup> <sub>4</sub> mg/litr	ISO 7150-1	≥ 15 a ≤ 30	> 30 a ≤ 60	> 60 a ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> mg/litr	ISO 7980	≥ 300 a ≤ 1 000	≥ 1 000 a ≤ 3 000	> 3 000 až do nasycení
<b>Rostlá zemina</b>				
SO <sup>2-</sup> <sub>4</sub> mg/kg <sup>a</sup> celkem	EN – 196-2 <sup>b</sup>	≥ 2 000 a ≤ 3 000 <sup>c</sup>	>3 000 <sup>c</sup> a ≤ 12 000	> 12 000 a ≤ 24 000
Kyselost podle Baumann Gully ml/kg	prEN 16502	> 200	V praxi se nepoužívá	V praxi se nepoužívá

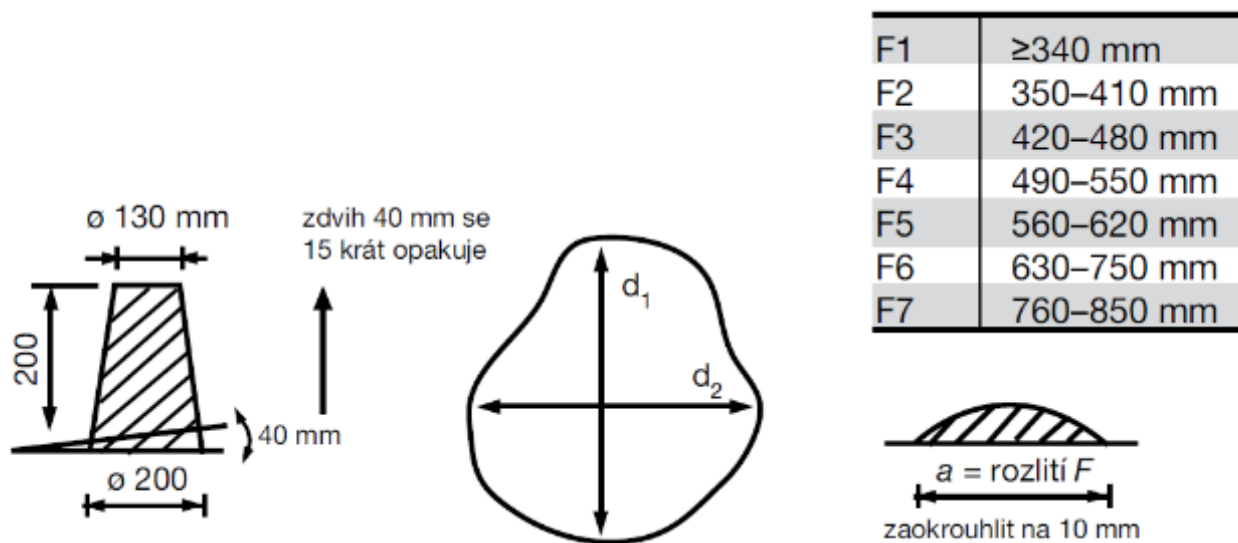
[ČSN EN 73 2403]

### 1.2.2 Konzistence

Konzistenci bychom mohli definovat jako odpor směsi proti jejímu přetváření.

Konzistence určuje míru tekutosti, nebo sypkosti betonu a tak ovlivňuje míru jeho zpracovatelnosti. U konstrukčních betonů se nejvíce vyskytuje stupeň konzistence S3. Záleží ovšem vždy na konkrétním případě. Při požadavku na větší míru zpracovatelnosti například u velmi zahuštěné výztuže může být nezbytné použít tekutější směsi v kombinaci s menším kamenivem, aby směs vyplnila řádně bednicí formu a neunikaly dutiny, kaverny.

Jednou z metod určování míry konzistence je zkouška rozlitím podle zkušební postupu ČSN EN 12350-5. Jednotlivé zkoušky pro specifické případy upřesňují normy ČSN EN 12350-8 až ČSN EN 12350-12. [3]

**Zkouška rozlitím kužele:**

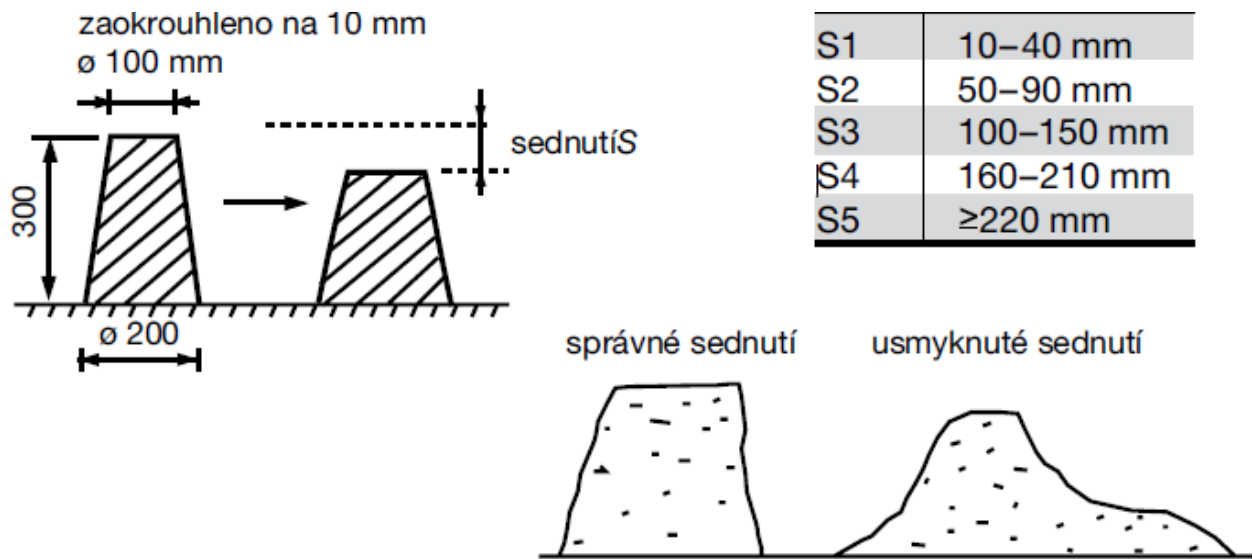
Obrázek 1- zkušební postup rozlití kužele [Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s.]

Tabulka 1.2.3 – Určení konzistence podle rozlití kužele.

Stupeň	Rozlití zkoušené směsi [mm]
F1	≤ 340
F2	350 až 410
F3	420 až 480
F4	490 až 550
F5	560 až 620
F6	≥ 630

[ČSN EN 73 2403]

**Zkouška sednutí kužele:**



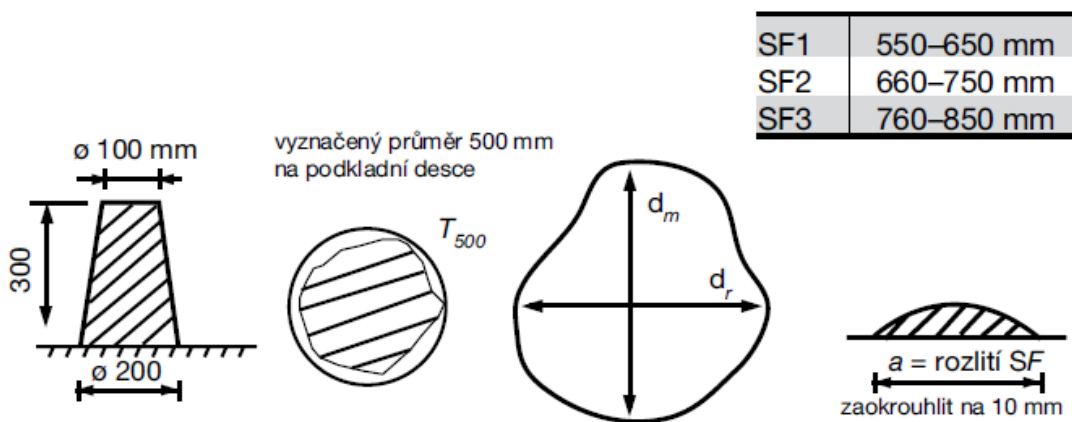
Obrázek 2 - Sednutí kužele, značení S = Slumptest [Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s.]

Tabulka 1.2.4 – Určení konzistence podle sednutí kužele.

Stupeň	Sednutí zkoušení směsi [mm]
S1	10 až 40
S2	50 až 90
S3	100 až 150
S4	160 až 210
S5	≥ 220

[ČSN EN 73 2403]

**Zkouška rozlití kužele pro samozhutitelný beton:**



Obrázek 3 - Rozlití kužele samozhutitelný beton, značení SF = Slump-flow [Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, Českomoravský beton, a.s.]

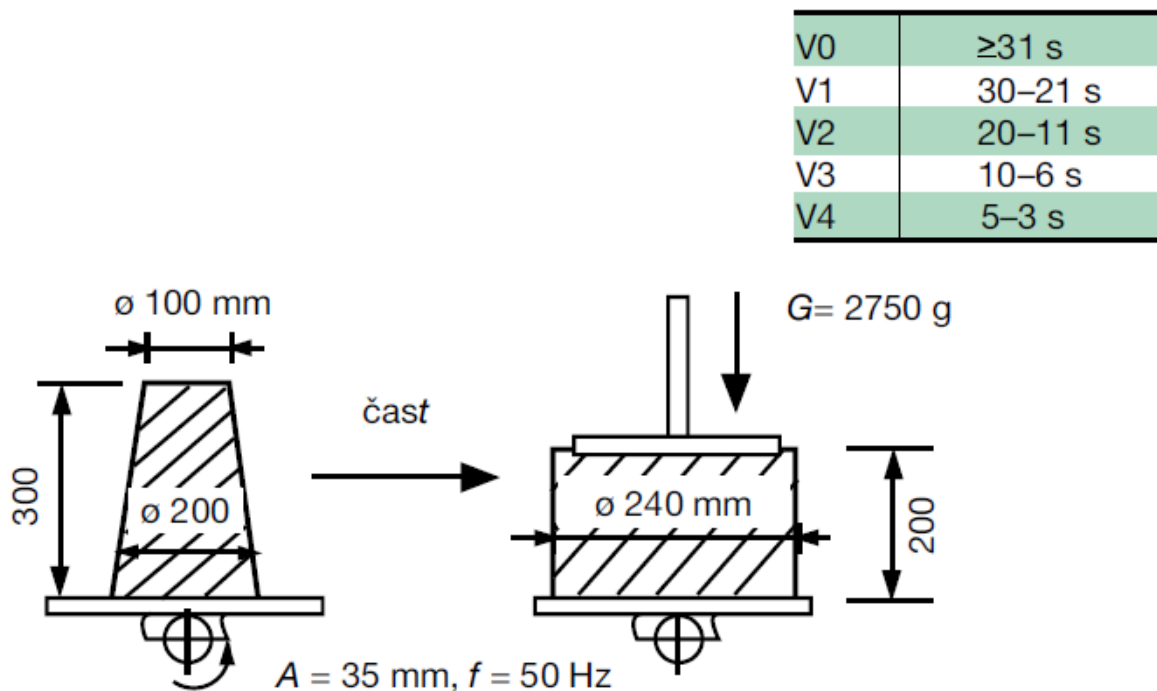
Tabulka 1.2.5 – Určení konzistence samozhutitelného betonu podle rozlití kužele.

Stupeň	Sednutí - rozlití zkoušené samozhutitelné směsi [mm]
SF1	550 až 650
SF2	660 až 750
SF3	760 až 850

\*Poznámka: Zařídění nelze užit pro betony s  $D_{max} \geq 40$  mm

[ČSN EN 73 2403]

### Zkouška přeformování Vebe:

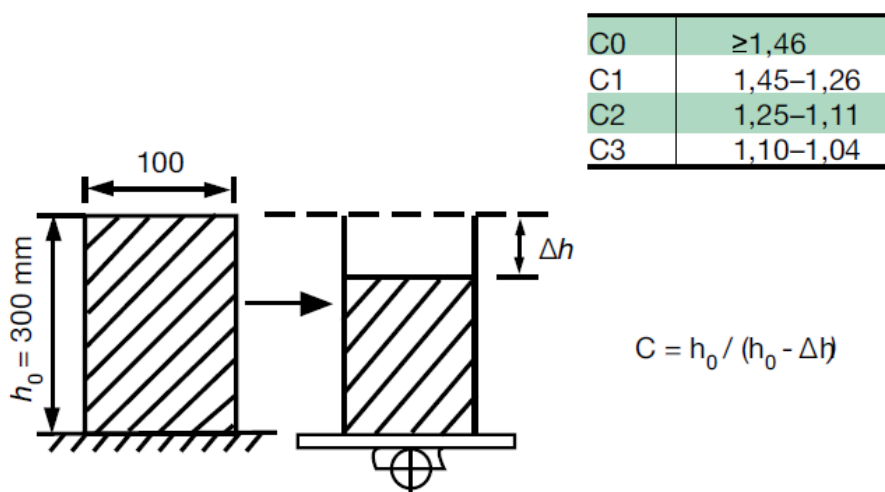


Obrázek 4 - Přeformování Vebe,  $V =$  Vebe test [Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s.]

Tabulka 1.2.6 – Klasifikace přeformování Vebe

Stupeň	Vebe čas [s]
V0	31
V1	30 až 21
V2	20 až 11
V3	10 až 6
V4	5 až 3

[Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s.]

**Zkouška zhutnění betonu C= Compaction Test:**

Obrázek 5 - Přeformování Vebe, V = Vebe test [Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s.]

Tabulka 1.2.7 – Klasifikace přeformování Vebe

Stupeň	Zhutnitelnost
C0	≥ 1,46
C1	1,45 až 1,26
C2	1,25 až 1,11
C3	1,1 až 1,04
C4	< 1,04

\*Poznámka: stupeň C4 se používá pouze po lehký beton

[ČSN EN 73 2403]

### 1.2.3 Fyzikální vlastnosti

Označení betonů (C- concrete = beton) je podle charakteristické pevnosti v tlaku. Nejvyšší přípustná odchylka nižší než je udávaná pevnost je 5% ze všech možných zkoušek daného betonu. První číslo vždy značí pevnost válcovou. Druhá hodnota je pevnost krychelná.

Tabulka 1.2.8 – Pevnostní třídy betonu

Třída pevnosti v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost $f_{ck,cyl}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimální charakteristická krychlená pevnost $f_{ck,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
C -/5	-	5
C -/7,5	-	7,5
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

Poznámka: \* Vysokopevnostní beton

[ČSN EN 73 2403]

Tabulka 1.2.9 – Porovnání pevností podle ČSN EN 206-1 a ČSN 73 2400

ČSN EN 206-1	ČSN 73 2400	ČSN EN 206-1	ČSN 73 2400
C -/5	B 5	C 35/45	B 45
C -/7,5	B 7,5	C 40/50	B 50
C 8/10	B 10	C 45/55	B 55
	B 12,5	C 50/60	B 60
C 12/15	B 15	C 55/67*	
C 16/20	B 20	C 60/75*	
C 20/25	B 25	C 70/85*	
C 25/30	B 30	C 80/95*	
	B 35	C 90/105*	
C 30/37		C 100/115*	

Tabulka 1.2.10 – Fyzikální a mechanické vlastnosti betonu

Objemová hmotnost	Lehký beton (LC)	max. 2000 kg/m <sup>3</sup>
	Obyčejný beton (L)	2000 kg/m <sup>3</sup> až 2800 kg/m <sup>3</sup>
	Těžký beton (HC)	min. 2800 kg/m <sup>3</sup>
Pevnost v tahu	Osový tah	1 až 3 MPa
	Tah za ohybu	3 až 6 MPa
	Příčný tah	1,5 až 4 MPa
Objemové změny při tvrdnutí	Smrštění	$\varepsilon = - (0,2 * 10^{-3} \text{ až } 0,5 * 10^{-3})$
	Nabývání	$\varepsilon = 0,2 * 10^{-3} \text{ až } 0,5 * 10^{-3}$
Modul pružnosti		17,5 až 40 GPa
Pevnost v tlaku		15 MPa až 60 MPa
Vodotěsnost		V 2, V 4, V 8, V 12
Trvanlivost (mrazuvzdornost)		T50, T 100, T 150, T 250

[ČSN EN 73 2403]



### 1.3 Složení betonu

Veškeré použité materiály do betonové směsi musejí být v souladu se všemi postupy o prokazování shody §5 až §9 prohlášení o shodě, které jsou zejména certifikace, posuzování systému řízení výroby, ověření shody, posouzení shody výrobcem a posouzení shody při kusové výrobě a podle §13 NV č. 163/2020 Sb. Ve znění NV č.313/2005 Sb.

Autorizovaná osoba v souladu s výše uvedenými paragrafy poté vydá doklad ve formě certifikátu, protokolu a případně stavebně technické osvědčení.

Povinností výrobce je k jednotlivým výrobkům předkládat soulad s technickými požadavky na stavební výrobky formou:

- Prohlášení o shodě
- Kvalita a jakost
- Systém – vzájemně související prvky
- Systém managementu kvality
- Systém kvality
- Shoda
- Certifikace
- Certifikace výrobků

[1]

#### 1.3.1 Kamenivo

Kamenivo, které tvoří téměř 75% celkového objemu betonové směsi, může být těžené, drcené recyklované nebo umělé a tvoří základní skelet betonu. Objemová hmotnost se pohybuje v hodnotách od 250 kg/m<sup>3</sup> do 2 000 kg/m<sup>3</sup> u lehkého kameniva např. keramzit. Hutné od 2 000 kg/m<sup>3</sup> do 3 000 kg/m<sup>3</sup> a těžké nad 3 000 kg/m<sup>3</sup> (baryt, magnetit, atd.).

Pevnost jednotlivých složek musí být vždy větší, než výsledná pevnost navrhované betonové směsi. Tvarově jsou nejvhodnější kulovitá zrna a musí být zvolen přiměřený poměr jednotlivých velikostí zrn. Výběr velikostí závisí zejména na tloušťce konstrukce, krytí výztuže a vzdálenosti jednotlivých prvků výztužení. Nejčastěji užívané velikosti frakcí zrn jsou: 0 - 4 mm, 4 - 8 mm, 8 – 16 mm, 16 – 22 mm a 16 – 32 mm. O maximální velikosti zrna rozhoduje podmínka nejmenšího rozměru a požadované složení frakcí se musí blížit k optimální křivce zrnitosti. V rámci výroby betonové směsi, lze užívat jen kamenivo čisté a nezvětralé.

Na území České republiky se dnes zejména vyrábí keramzit a expandovaný perlit. [2]

### 1.3.2 Voda (záměsová)

Voda je obecně spjata se zpracovatelností (hutnění) betonu, tedy konzistence betonu při ukládce, s hydratací betonu a tím s vytvářením pevných vazeb mezi kamennými zrny. Poměr vody nutný k hydrataci

Tabulka 1.3.1 – Použitelnost typů vod do betonu

Druh vody:	Vhodnost užití:
Pitná	Použitelná bez zkoušek
Voda z recyklace	Nutné ověření použitelnosti
Podzemní voda	Nutné ověření použitelnosti
Povrchová voda	Nutné ověření použitelnosti
Odpadní průmyslová voda	Nutné ověření použitelnosti
Mořská voda	Není vhodná do vyztužených, nebo předpjatých konstrukcí
splašková	Nevhodná

[Technologie Staveb I, Doc. Ing. Karel Dočkal, CSc., 2005]

### 1.3.3 Cement

Cement neboli pojivo skládající se z anorganických surovin. Spojením cementu se záměsovou vodou vznikne cementová kaše. Reakci po spojení cementu s vodou nazýváme počátek hydratace. Tento proces probíhá jak v suchém, tak vlhkém prostředí i pod vodou. Vnější podmínky mohou do značné míry urychlit, ale i případně zpomalit tento proces. To může být v závislostech na požadované aspekty žádoucí, ale i nežádoucí, např. vlivem nadměrného horka může být hydratace urychlena a tím dojde k rychlejšímu vytvrdnutí betonové konstrukce. Rychlejší proces hydratace pravděpodobně způsobí znehodnocení betonu a to z hlediska většího výskytu prasklinek, trhlin, nebo drolení okrajů konstrukce a narušení ochranné vrstvy výztuže, ale i snížením celkové pevnosti betonového prvku po 28 denní době zrání. Oproti konstrukci, kde hydratace nebyla vlivem vnějších podmínek urychlena. [2]

Cementová kaše tuhne a následně tvrdne, zde lze sledovat tento proces pomocí Vicatova přístroje a z naměřených hodnot vypočítat vývoj tlaku cementové směsi na bednicí konstrukci. Těmito procesy a tvorbou nových chemických sloučenin vzniká takzvaný cementový kámen. U cementového kamene pozorujeme jeho pevnost v různých směrech působících sil a stálost jeho objemu. [2]

Výroba cementu vzniká pálením surovinových směsí například vápence a slínu, jejichž základní silikátové oxidy jsou  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . K vzájemnému splynutí práškových částic, neboli mezi slinutí dochází zhruba kolem  $1450^\circ\text{C}$ . Vzniklý slínek se po přidání dalších přísad jako například sádrovce, kterých plní funkci regulace tuhnutí cementu, namele. [2]

#### Hlavní složky:

- Portlandský slínek
- Granulovaná vysokopecní struska
- Pucolány (Přírodní, kalcinované)

- Popílky
- Křemičitý popílek
- Vápenatý popílek
- Kalcinovaná břidlice
- Vápenec
- Křemičitý úlet
- Doplnující složky
  - o Pro zlepšení fyzikálních vlastností cementu. Nepřevyšují 5 % celkové hmotnosti cementu.
- Síran vápenatý
- Přísady
  - o Látky převážně pro usnadnění výroby. Celkové množství nepřesahuje 1% celkové hmotnosti cementu.

Podle norem ČSN, dělíme cementy podle druhu do pěti skupin:

- CEM I - Portlandský
- CEM II - Portlandský cement směsný
- CEM III - Vysokopecní cement
- CEM V - Směsný cement

Osmadvacetidenní pevnost cementu (normalizovaná) musí v souladu s příslušnými ČSN EN 196-1 odpovídat tab. 1.3.2 [2]

Tabulka 1.3.2 – Popis charakteru tuhnutí betonu

Pevnostní třída [normalizovaná]	Pevnost v tlaku [MPa]				Počátek tuhnutí [min]	Objemová stálost [mm]
	Počáteční pevnost		Normalizovaná pevnost			
	2 dny	7 dnů	28 dnů			
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10	-				
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 10	-				
52,5 N	≥ 10	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 R	≥ 10	-				

[Technologie Staveb I, Doc. Ing. Karel Dočkal, CSc., 2005]

Pevnostní třídy s označením N jsou s normálními počátečními pevnostmi. Označení R znamená vysoké počáteční pevnosti. [2]

Zvýšení množství cementu k poměru ostatních složek betonové směsi výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti směsi, zejména celkovou pevnost betonu, odolnost proti mrazu, zvýšení vyztužujících ocelových prvků proti korozi a vodotěsnost betonu. [2]

Zvýšení cementu v poměru také zvyšuje vývin hydratačního tepla, zvyšuje smršťování betonu, klesá modul pružnosti betonu a velikost jeho dotvarování. [2]

Vhodnost použití určitého cementu je vždy dána typem konstrukce, jejího účelu a podmínek působících v průběhu výstavby, plánované životnosti, způsobu provádění prací, způsob ošetřování v závislosti na působící podmínky (proteplování, chlazení), rozměr budované konstrukce (její masivnost), podmínky okolního prostředí, které působí na beton a reaktivnost kameniva s ostatními alkáliemi složek betonu. [2]

Například u masivních konstrukcí (přehrad, masivní základové desky pod reaktory, atd.) je potřeba použít cement s velmi nízkým hydratačním teplem. V případě agresivního působení vlivů lze užitím více složkových cementů (síranovzdorný, vysokopecní, portlandský směsný) výrazně zvýšit odolnost betonu proti těmto vlivům. [2]

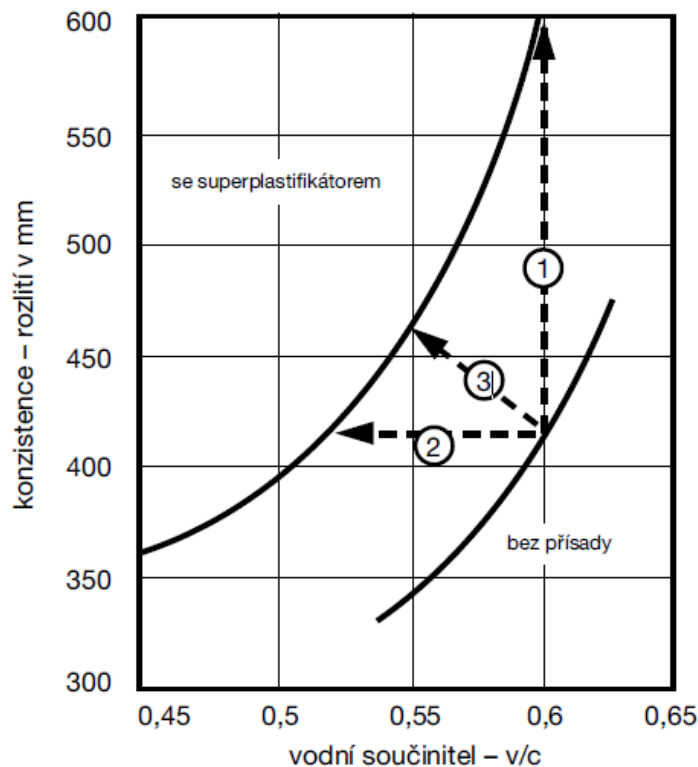
#### **1.3.4 Přísady**

Přísady neboli chemické sloučeniny, které se postupně přidávají během výroby míchané směsi betonu v poměru do 5% celkové hmotnosti cementu, svým účinkem ať už z hlediska chemie, nebo fyziky ovlivňují některé vlastnosti při tuhnutí, tvrdnutí betonu, tak i vlastnosti výsledné betonové směsi. [1]

Rozdělení přísad:

- Plastifikační
  - o Pro zlepšení vlastností z hlediska zpracování betonové směsi (ukládka, čerpatelnost pomocí automobilových betonových pump.
  - o Redukují potřebnou míru vody
- Superplastifikační
  - o Výrazná redukce míry potřebné vody při zachování stejné zpracovatelnosti
  - o Výrazný nárůst pevnosti (za 7 a 28 dní o 110% pevnosti) [1]

Obrázek 6 – rozdělení tlaku čerstvého betonu po výšce bedně



[Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s. ]

- Provzdušňovací
    - Zvýšení odolnosti proti promrznutí
    - Zvýšení odolnosti proti vlivům rozmrazovacích solí (např. mostní konstrukce)
    - Snížení pevnosti betonu v tlaku při provzdušnění zhruba o 5 % na každé 1% provzdušnění
- [1]
- Urychlující tuhnutí
    - K ovlivnění počátku doby tuhnutí v závislosti na působení externích podmínek např. nízké teploty.
    - Doba tuhnutí nesmí být kratší než 30 minut.
  - Urychlující tvrdnutí
    - Referenční pevnost v tlaku betonu minimálně 120 % za 24 hodin.
    - 28 denní pevnost betonu nejméně 90% referenční pevnosti.
    - Při +5°C za dobu 48 hodin, musí být pevnosti v tlaku nejméně 130% referenční pevnosti betonu

- Zpomalovače tuhnutí
  - K ovlivnění počátku doby tuhnutí v závislosti na působení externích podmínek např. vysoké teploty.
  - Pevnost v tlaku musí za 7 dní dosáhnout více než 80% a za 28 dní vyšší než 90%.
  - Počátek doby tuhnutí delší než 90 minut.
  - Konec doby tuhnutí prodloužen. Nesmí být však prodloužen více než o 360 minut
- Těsnicí (hydrofobizační)
  - Zvyšují hustotu cementu.
  - Zlepšují vodotěsnost.
  - Zmenšují kapiláry
- Ostatní přísady
  - Injektážní přísady (zlepšení tekutosti)
  - Inhibitory koroze (vytváří ochranný povrch koroze)
  - Biocidní přísady (omezují biologickou korozi betonu)
  - Plynotvorné přísady (kypření betonu)
  - Pěnotvorné přísady (pěnobeton)
  - Adhézní přísady (zlepšení přídržnosti betonu)

[4]

### 1.3.5 Příměsi

Jemné anorganické nebo organické látky, jejichž cílem je zlepšit vlastnosti betonové směsi.

Dělí se na dva typy

- I. Interní - filery (mletý vápenec, kamenná moučka)
- II. Pucolány a hydraulické příměsi (popílek, křemičitý úlet, struska)

[4]

## 2 Metody stanovení doby tuhnutí betonové směsi

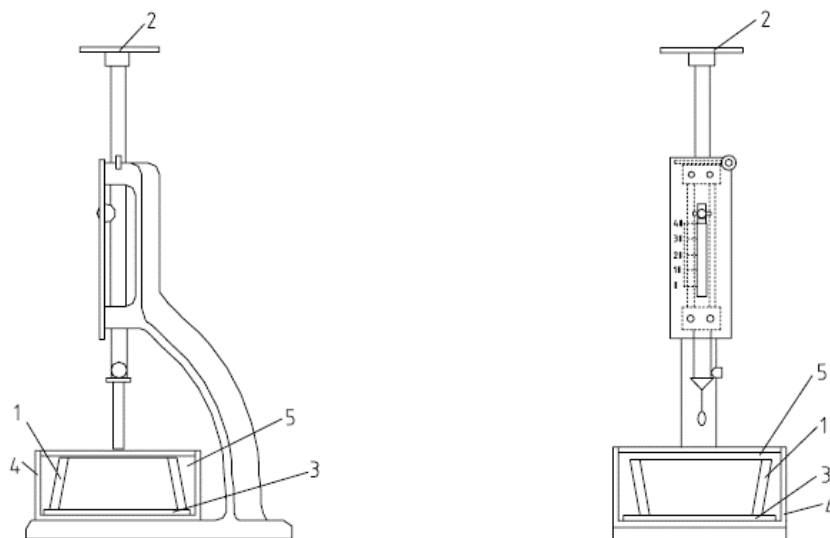
Doba tuhnutí  $t_E$  potřebná pro stanovení tlaku čerstvého betonu je rovna  $t_E = 1,25 \cdot t_{E,knead}$ .

Doba  $t_{E,knead}$  je časový interval od přidání vody do betonové směsi do času, kdy lze betonovou směs považovat za tuhou. [ČSN 73 0042 – A.1]

### 2.1 Stanovení doby tuhnutí pomocí Vicatova přístroje:

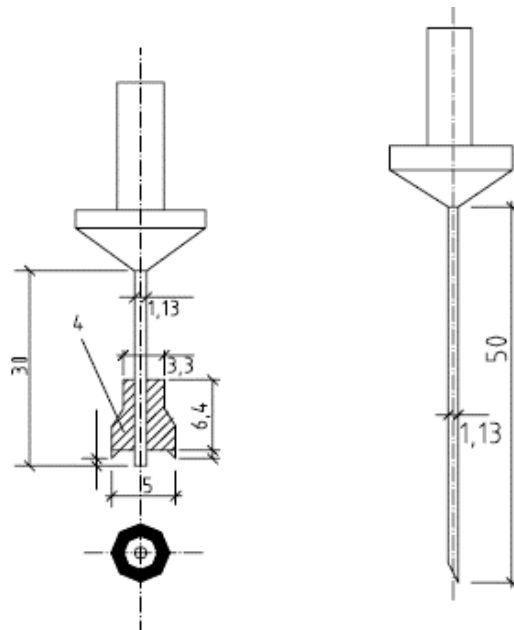
Přístroje a pomůcky experimentu:

- Nádobu s vodou o teplotě  $\pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Vicatův přístroj s ocelovou jehlou (obr. 6)
- Vicatův přístroj s ocelovou jehlou a kruhovým nástavcem (obr. 7)
- Vicatův prstenec
- Skleněná destička



Obrázek 2 - Vicatův přístroj. [ČSN EN 196-3]

1-prstenec z tvrzené pryže, 2-ploška pro přídavné závaží 3-skleněná destička, 4-nádoba na vodu, 5-voda



Obrázek 8 - Vlevo jehla Vicatova přístroje s nástavcem pro stanovení konce tuhnutí. Vpravo jehla Vicatova přístroje pro stanovení doby počátku tuhnutí

[ČSN EN 196-3]

### 2.1.1 Stanovení počátku doby tuhnutí

Postup experimentu:

- Nastavení nulové polohy na přístroji spuštěním hrotu jehly na podkladní destičku.
- Naplnění Vicatova prstence cementovou kaší normální hustoty. Po naplnění se povrch zarovná
- Vicatův prstencem umístěný na skleněné destičce se vloží do nádoby, která se následně doplní vodou tak, aby hladina vody byla nejméně 5 mm nad povrchem zarovnané cementové kaše. Následuje uložení do prostoru s kontrolovatelnou teplotou.
- V přiměřených časových intervalech se nádobka s prstencem a destičkou vloží do zkušebního zařízení. Jehlu přístroje je nutné zajistit v takové poloze, aby se hrotem dotýkala povrchu cementové kaše. Po uvolnění zajišťovacího šroubu lze pozorovat jehlu, jak vniká do cementové kaše, hloubku vniknutí je potřeba odečíst nejpozději do 30 sekund.[5]

Vyhodnocení experimentu:

- Vzdálenost mezi zapuštěným hrotem jehly a skleněnou destičkou společně s dobou od přidání cementu do míchané směsi (nulový čas) uvedeme do měřicího protokolu.
- Jednotlivé odečítání hodnot provádíme v opakovaných intervalech například po deseti minutách a to na místech nejméně 8 mm od kraje pryžového prstence a 5 mm od sebe. Nejmenší vzdálenost vpichu od posledního zkušebního místa je 10 mm.
- Počátek doby tuhnutí je naměřený čas, který uplyne od nulového času až do doby, kdy lze odečíst vzdálenost mezi hrotem jehly a skleněnou destičkou  $6 \pm 3$  mm.
- V protokolu o zkoušce se uvádí čas s přesností na 5 minut. [5]



### **2.1.2 Stanovení konce doby tuhnutí**

Postup experimentu:

- Po stanovení počátku doby tuhnutí je nutné vyměnit nástavce Vicatova přístroje. Jehlu pro stanovení počátku doby tuhnutí prohodíme za jehlu s kruhovým nástavcem (viz. obr. 7). Ve stejný čas se otočí Vicatův prstencem na skleněné destičce a vloží opět do prostředí s kontrolovatelnou teplotou. Prodlouží se zkušební intervaly například po 25 nebo 30 minutách.
- V přiměřených časových intervalech se nádobka s prstencem a destičkou vloží do zkušebního zařízení. Jehlu s kruhovým nástavcem přístroje je nutné zajistit v takové poloze, aby se hrotem dotýkala povrchu cementové kaše. Po uvolnění zajišťovacího šroubu lze pozorovat jehlu, jak vniká do cementové kaše, hloubku vniknutí je potřeba odečíst nejpozději do 30 sekund. [5]

Vyhodnocení experimentu:

- Konec doby tuhnutí je naměřený čas, který uplyne od nulového času až do doby, kdy jehla s kruhovým nástavcem proniká do hloubky cementové kaše jen 0,5 mm. Počátkem doby tvrdnutí směsi jehla s kruhovým nástavcem nezanechává v zatvrdlé cementové kaši žádný patrný otisk.
- V protokolu o zkoušce se uvádí čas s přesností na 15 minut. [5]

## **2.2 Stanovení doby tuhnutí metodou „vtlačování“:**

Přístroje a pomůcky experimentu:

- Nepropustný uzavíratelný platový pytel o objemu 20 l.
- Nádobka s vodou o dostatečné velikosti pro umístění plastového pytle
- Teploměr
- Tepelně izolovanou podložku

Postup experimentu:

Provede se odběr reprezentativního vzorku přibližně o objemu 10 l, který se umístí do plastového pytle a přiměřeně zhutní v závislosti na třídě konzistence. Následuje vložení pytle do nádoby s vodou a stanovení teploty uložené směsi. Po určení teploty se pytel neprodyšně uzavře.

Uzavřená směs se pozoruje v intervalech po 30 minutách. Při dosažení betonové směsi konzistence „plastická“ až „tuhnoucí“ podle tabulky 2.2.1 se pytel obsahující směs vyjme a vloží na tepelně izolovanou podložku. Následuje měření teploty betonové směsi.

Pokračuje se v pozorování v třiceti minutových intervalech vtlačováním palce do proti svislým stranám pytle s betonovou směsí přibližně uprostřed. Postupné vtlačování provádět postupně na třech místech dříve nestlačených. Vtlačování se ukončí po dosažení konzistence značené v tabulce 2.2.1 jako „ztuhlá“.[6]

Maximální rozdíly teplot před ukládkou a ztuhnutím vzorků by měly být při teplotách nad 5°C menší než 2°C, Při teplotách nad 15°C menší než 3°C a při teplotách nad 20°C menší než 4°C.

Tabulka 2.2.1– Popis charakteru tuhnutí betonu

Pol.	Konzistence	Popis chování
1	tekutá	Teče v platovém pytli
2	měkká	Neteče a prosakuje při stlačení
3	plastická	Lze hníst
4	tuhnoucí	Vtlačení do max. hloubky 30 mm
5	částečně ztuhlá	Vtlačení do max. hloubky 10 mm
6	ztuhlá	Vtlačení do max. hloubky menší 1 mm

[ČSN 73 0042 – příloha A]

Vyhodnocení experimentu:

Provede se označení vzorku s uvedeným místem, datum zkoušení a hodnoty vnějších teplot. Čas přidání vody do betonové směsi a čas ukončení tuhnutí, tedy doby kdy betonová směs dosáhla konzistence klasifikované jako „ztuhlá“.

Zaznamenání časového intervalu v minutách od přidání vody do betonové směsi po její ztuhnutí, neboli  $t_{E,knead}$ .

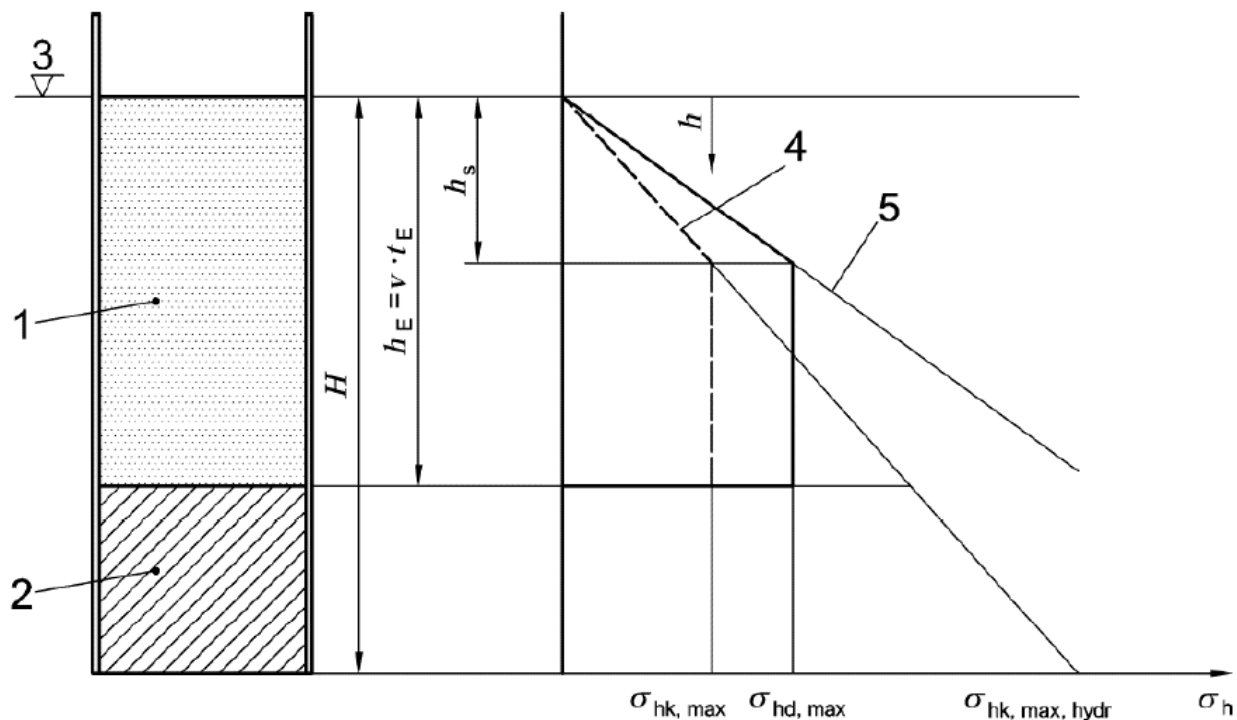
Zaznamenání nevyšší dosažené teploty betonové směsi během experimentu neboli  $T_{c,ref}$ .

[6]

### 3 Tlak čerstvé betonové směsi na svislé konstrukce bedně

Při návrhu konstrukce svislého bedně se tlak od čerstvé betonové směsi uvažuje jako proměnné zatížení. Rozlišuje se na absolutní velikost a velikost po výšce bedně. [6]

Obrázek 9 – rozdělení tlaku čerstvého betonu po výšce bedně



1. Čerstvý beton
2. Beton s ukončenou dobou tuhnutí
3. Horní úroveň betonu
4. Hydrostatický tlak čerstvého betonu ( $\sigma_{hk,max,hydr}$ )
5.  $\gamma_F$  – násobek hydrostatického tlaku čerstvého betonu

$\sigma_{hk,max}$  - charakteristická hodnota vodorovného tlaku od čerstvého betonu

$\sigma_{hd,max}$  – návrhová hodnota vodorovného tlaku od čerstvého betonu

$\sigma_h$  – vodorovný tlak od čerstvého betonu

$h_E$  – výška betonu při ukončení doby tuhnutí  $t_E$

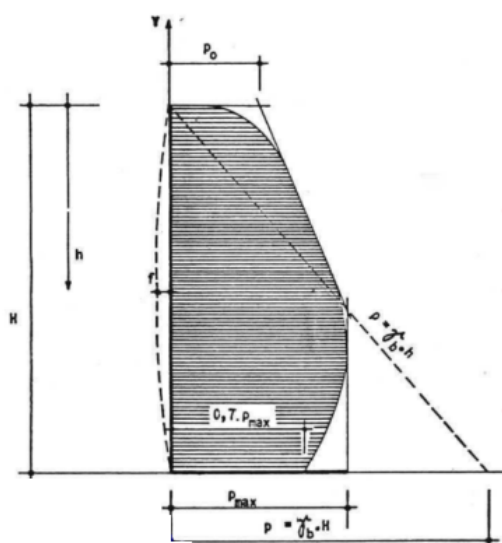
$h_s$  – Hydrostatická výška

$t_E$  – doba tuhnutí

$v$  – rychlost ukládání

[ČSN 73 0042]

Obrázek 10 – Diagram spojitěho nerovnoměrného zatížení při betonování podle Ertinghausena vs normový vodorovný tlak.



$$p_{1n} = \gamma_{bs} d$$

$$p_{2n} = 3v_{bs} + 100 b + 15$$

$$p_{3n} = \gamma_{bs} v_{bs} \kappa + 5$$

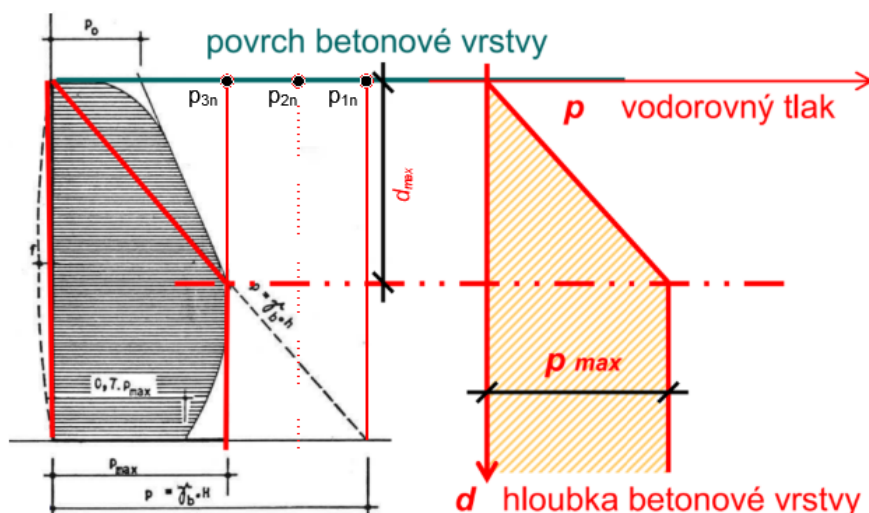
$\gamma_{bs}$  - objemová tíha čerstvého betonu 24 [kN.m<sup>-3</sup>]

$d$  - hloubka betonové vrstvy [m]

$v_{bs}$  - rychlost kladení betonu [m.h<sup>-1</sup>]

$b$  - nejmenší půdorysný rozměr betonovaného dílce [m]

$\kappa$  - opravný součinitel (způsob vibrace, teplota, zpracovatelnost směsi)



### 3.1 Návrhová hodnota tlaku čerstvé betonové směsi

Podle normy ČSN 73 0042 je návrhová hodnota tlaku je násobkem charakteristické hodnoty a dílčího součinitele  $\gamma_F$ , kde  $\gamma_F = 1,0$  při příznivě působících zatížení tlakem a  $\gamma_F = 1,5$  u nepříznivého působení tlaku. [6]

$$\sigma_{hd} = \sigma_{hk} \cdot \gamma_F$$

### 3.2 Účinky ovlivňující výslednou hodnotu tlaku čerstvé betonové směsi

Existuje řada účinků, která významně ovlivňuje vývoj tlaku čerstvé betonové směsi na bedně a může jeho účinky zvýšit, nebo naopak snížit. Nicméně je třeba mít na paměti, že je třeba dodržovat určitou vyváženost mezi vlastnostmi betonu a jednotlivými účinky. Například při působení vysoké teploty bez účinků zpomalovačů tuhnutí, když pomíneme problémy, které mohou vzniknout, při samotném zpracování betonové směsi během ukládky v důsledku rychlého tuhnutí se předpokládá, že vývoj tlaku čerstvé směsi na bedně bude příznivější,

tedy se zmenšovat. V důsledku toho bude možné rychlejší provedení ukládky betonové směsi do bedněni, ale v lepším případě s výrazně horší pohledovostí výsledné betonové konstrukce. V horším případě se vznikem nepřiměřených trhlinek, nebo prasklin. [6]

### **Doba tuhnutí**

Zaleží na samotném složení betonové směsi, procesu hydratace, příměsích, okolní teploty. [6]

### **Teplota**

#### **Teplota směsi:**

Je-li teplota směsi ihned po uložení vyšší než referenční teplota a v průběhu tuhnutí se navyšuje, nebo lze zajistit, že v průběhu tuhnutí bude neustále vyšší, lze předpokládat s každým 1°C snížení tlaku bedněni o 3% maximálně však o 30 %.

Dojde-li ke snížení teploty od ukládky během tuhnutí pod úroveň referenční teploty, tak dochází k navýšení tlaku o 3 % s každým snížením 1°C. U tekutějších konzistencí s označením F5 a F6 se s každým 1°C působení tlaku navyšuje o 5%.

Při užití cementu s malým hydratačním teplem nesmí teplota betonové směsi klesnout pod teplotu referenční. [6]

#### **Vnější:**

Vliv vnější teploty lze zanedbat v případě, že je bednicí konstrukce pro ukládku čerstvé betonové směsi tepelně odizolována.

V případě poklesu teploty čerstvé betonové směsi od ukládky v průběhu tuhnutí o každý 1°C se tlak betonu navyšuje v průběhu o 3%. U tekutějších konzistencí s označením F5 a F6 se s každým 1°C navyšuje o 5%.

Naopak při vyšších vnějších teplotách než je teplota betonové směsi při ukládce do bednicí konstrukce se výše uvedené nemusí uvažovat. [6]

Teplota má také velký vliv na průběh tvrdnutí betonu. Tvrdnutí není ovlivněno jen vnější teplotou, ale vývinem hydratačního tepla. Zahřívání čerstvé betonové směsi závisí opět na velikosti a tvaru monolitické konstrukce. Uvolňované teplo může působit příznivě za nízkých teplot, ale i negativně při vysokých teplotách, kdy masivní monolitické bloky vyprodukují takové teplo, že může docházet k popraskání výsledného monolitu. V minulosti byl tento nepříznivý efekt za vysokých teplot řešen tak, že hydratační teplo bylo odváděno pomocí ochlazovacích trubek integrovaných do monolitické konstrukce.

Tvrdnutí tedy lze ovlivnit ohřevem čerstvé betonové směsi už při samotné výrobě, nebo během hutnění a to buď elektro ohřevem, nebo párou. Zvyšování teploty musí být pozvolné a kontrolovatelné, aby ve výsledku nedošlo k porušení struktury betonu a to zejména vlivem

různých teplotních roztažností složek směsi v betonové směsi (voda, kamenivo, ale i vzduch). Během 4 hodin by měl být pozvolný nárůst maximálně do 40 °C. [2]

### **Ohřev bedněni**

Podle normy ČSN 73 0042 ve výpočtu nelze uvažovat s účinky ohřevu bedněni na vývoj tlaku v bedněni. [6]

### **Ochlazování betonu**

Podle normy ČSN 73 0042 ochlazování bedněni zvyšuje tlak čerstvé betonové směsi na bedněni a v případě teplota směsi po ukládce klesne, platí: o každý 1 °C se tlak betonu navyšuje v průběhu o 3%. U tekutějších konzistencí s označením F5 a F6 se s každým 1 °C navyšuje o 5%. [6]

### **Hutněni**

Při užití ponorných vibrátoru a velkém výkonu lze předpokládat, že dojde k navýšení působení tlaku na bednicí konstrukci od čerstvého betonu. [6]

Při užití příložných vibrátorů na bednicí konstrukce lze uvažovat působení navýšení působení o hydrostatický tlak v závislosti na rychlosti plnění a doby tuhnutí v místě působení vibrátoru a to až ztuhnutí betonové směsi. [6]

### **Příměsi**

Ovlivňují zejména konzistenci a v závislosti na ní i dobu tuhnutí čerstvé směsi. [6]

### **Vyztužení konstrukce**

V případě silně vyztužených konstrukcí, lze předpokládat snížení účinků tlaků na bedněni od čerstvé betonové směsi a to v některých specifických případech až o 20%. [6]

### 3.3 Charakteristická hodnota tlaku čerstvé betonové směsi

Charakteristická hodnota je tedy ovlivněna objemovou hmotností samotné čerstvé betonové směsi (vodní součinitel, typu cementu, příměsí a přísady), skutečnou dobou tuhnutí od přidání vody až po ztuhnutí směsi, konzistencí a rychlostí ukládání do bedněni.

U betonových směsí s rychlým nárůstem pevnosti při teplotě nad +15 °C a středním nárůstem o teplotě nad +20°C za předpokladu, že betonové směsi neobsahují zpomalovače tuhnutí, lze podle ČSN EN 206-1:2001 uvažovat dobu tuhnutí, neboli  $t_E = 5h$ .

Za stejných podmínek bez urychlovačů tuhnutí, lze u betonů s rychlým nárůstem pevnosti při teplotě nad +10 °C. U betonů se středním nárůstem pevnosti při teplotě nad +15 °C a s pomalým nárůstem pevnosti při teplotě nad +20 °C uvažovat s dobou tuhnutí  $t_E = 7h$ .

Přibližná doba odhadnuta u betonů minimální třídy pevnosti C20/25. [6]

Tabulka 3.3.1 – charakteristické hodnoty maximálního vodorovného tlaku čerstvého betonu (beton se ukládá proti směru výstavby)

Pol.	Třída konzistence	Maximální vodorovný tlak čerstvého betonu (Směr ukládání shora dolů)
1	F1	$(5 * v + 21) * K1 \geq 25$
2	F2	$(10 * v + 19) * K1 \geq 25$
3	F3	$(14 * v + 18) * K1 \geq 25$
4	F4	$(17 * v + 17) * K1 \geq 25$
5	F5	$25 + 30 * v * K1 > 30$
6	F6	$25 + 38 * v * K1 \geq 30$
7	SCC	$25 + 33 * v * K1 \geq 30$

kde  $v$  je rychlost ukládání betonu v m/h

$K1$  je součinitel uvážení chování betonu během tuhnutí podle tabulky 3.3.2.

[ČSN 73 0042, Příloha B tabulka 1]

Tabulka 3.3.2 – Součinitelé způsobu tuhnutí K1

Pol.	Třída konzistence	Součinitelé K1			
		Doba tuhnutí $T_E = 5$ h	Doba tuhnutí $T_E = 5$ h	Doba tuhnutí $T_E = 5$ h	Obecné <sup>b</sup>
1	F1 <sup>a</sup>	1,0	1,15	1,45	$1 + 0,03 (T_E - 5)$
2	F2 <sup>a</sup>	1,0	1,25	1,8	$1 + 0,053 (T_E - 5)$
3	F3 <sup>a</sup>	1,0	1,40	2,15	$1 + 0,077 (T_E - 5)$
4	F4 <sup>a</sup>	1,0	1,70	3,10	$1 + 0,14 (T_E - 5)$
5	F5,F6,SCC	1,0	2,00	4,00	$T_E/5$

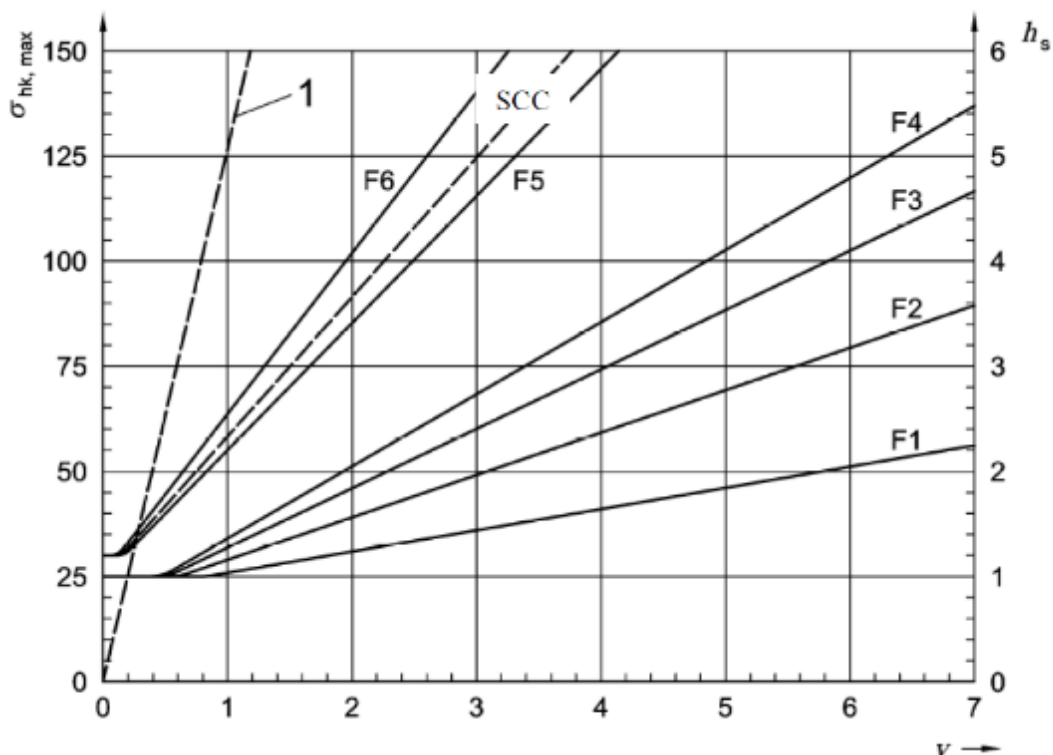
<sup>a</sup> Platí pro betonované úseky o výšce  $H$  do 10 m

<sup>b</sup> Platí pro doby tuhnutí o rozmezí  $5 \text{ h} \leq t_E \leq 20 \text{ h}$

[ČSN 73 0042, Příloha B tabulka 2]

Následující grafy slouží ke stanovení maximálních charakteristických hodnot tlaku betonové směsi v závislosti na rychlosti ukládání betonové směsi pro různé konzistence a časy tuhnutí.

Graf č. 1 pro stanovení tlaku čerstvého betonu  $\sigma_{hk,max}$  v závislosti na rychlosti plnění bedně a pro třídy konzistence v době ztuhnutí  $t_E = 5$  hodin

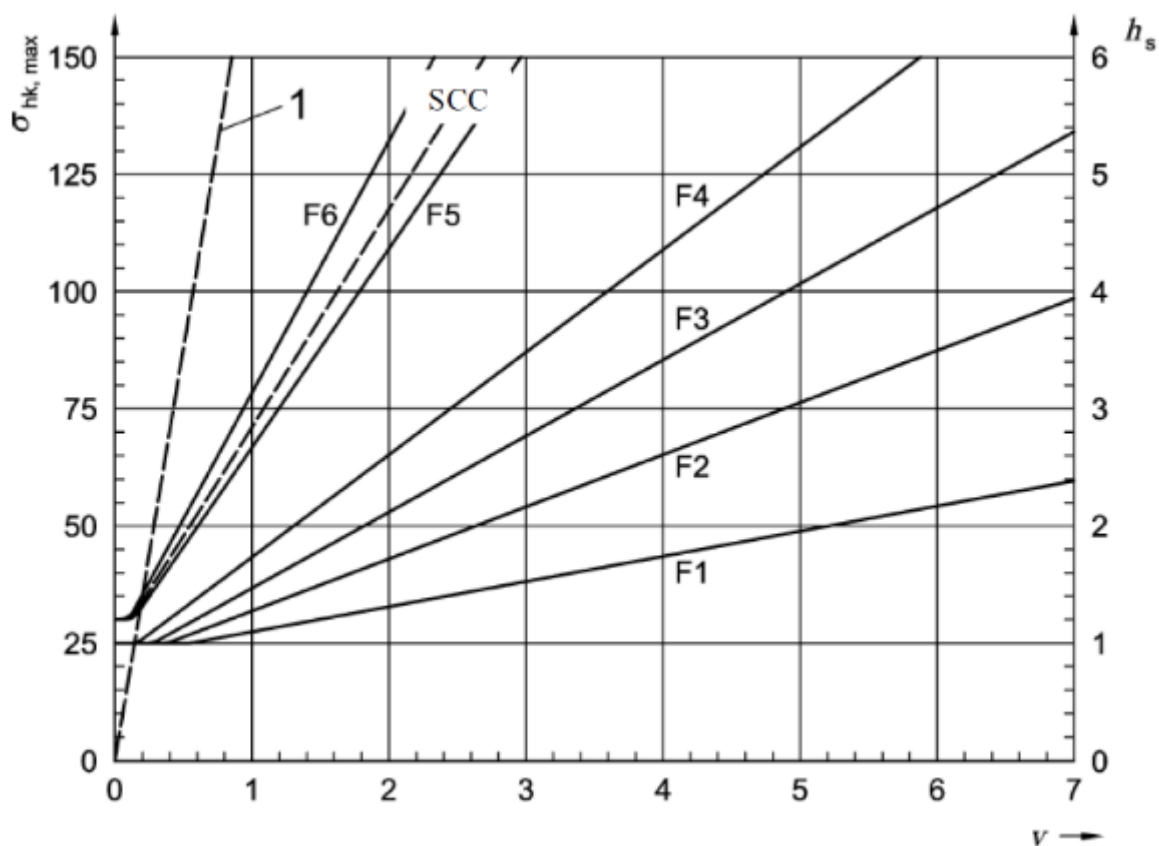


- 1- Hydrostatický tlak do doby  $t_E$   
 $t_E = 5$  h  
 $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$   
 $v$  = rychlost ukládání v m/h  
 $h_s$  = maximální hydrostatická výška

[ČSN 73 0042 B.1]



Graf č. 2 pro stanovení tlaku čerstvého betonu  $\sigma_{hk, max}$  v závislosti na rychlosti plnění bedně a pro třídy konzistence v době ztuhnutí  $t_E = 7$  hodin



1- Hydrostatický tlak do doby  $t_E$

$t_E = 7$  h

$\gamma_c = 25$  kN/m<sup>3</sup>

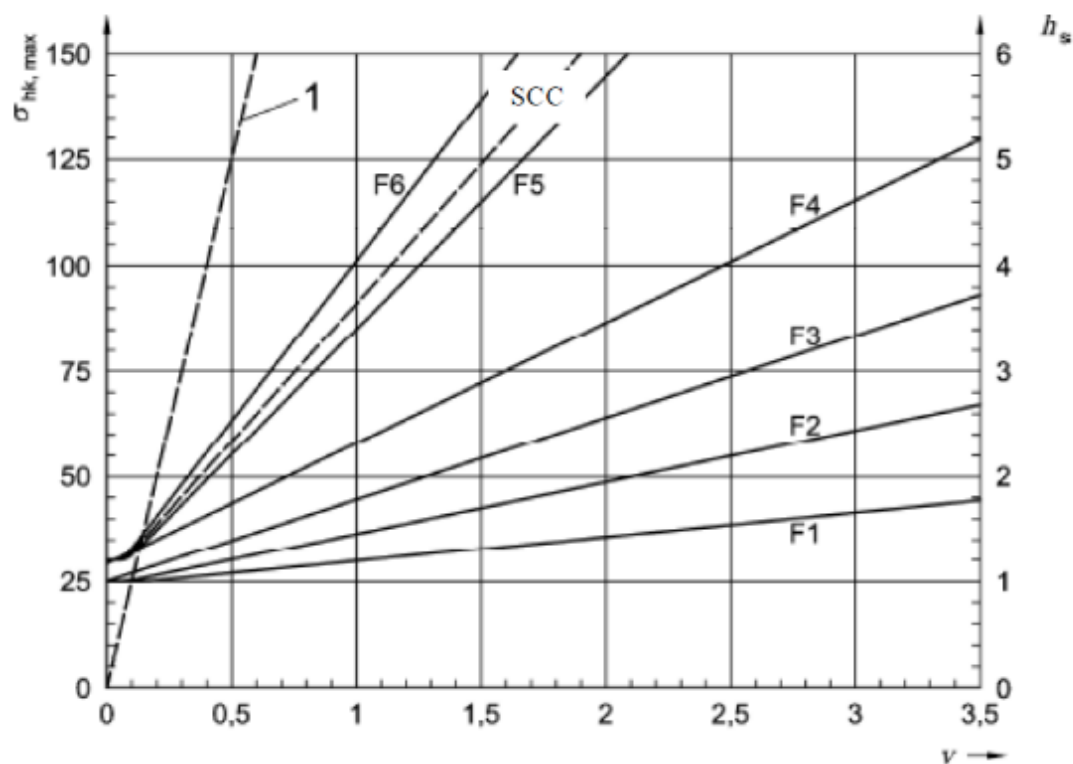
$v$  = rychlost ukládání v m/h

$h_s$  = maximální hydrostatická výška

Platí pro třídy konzistence F1 až F4, betonované úseky o výšce do 10m

[ČSN 73 0042, B.2]

Graf č. 3 pro stanovení tlaku čerstvého betonu  $\sigma_{hk, \max}$  v závislosti na rychlosti plnění bedně a pro třídy konzistence v době ztuhnutí  $t_E = 10$  hodin



1- Hydrostatický tlak do doby  $t_E$

$t_E = 10$  h

$\gamma_c = 25$  kN/m<sup>3</sup>

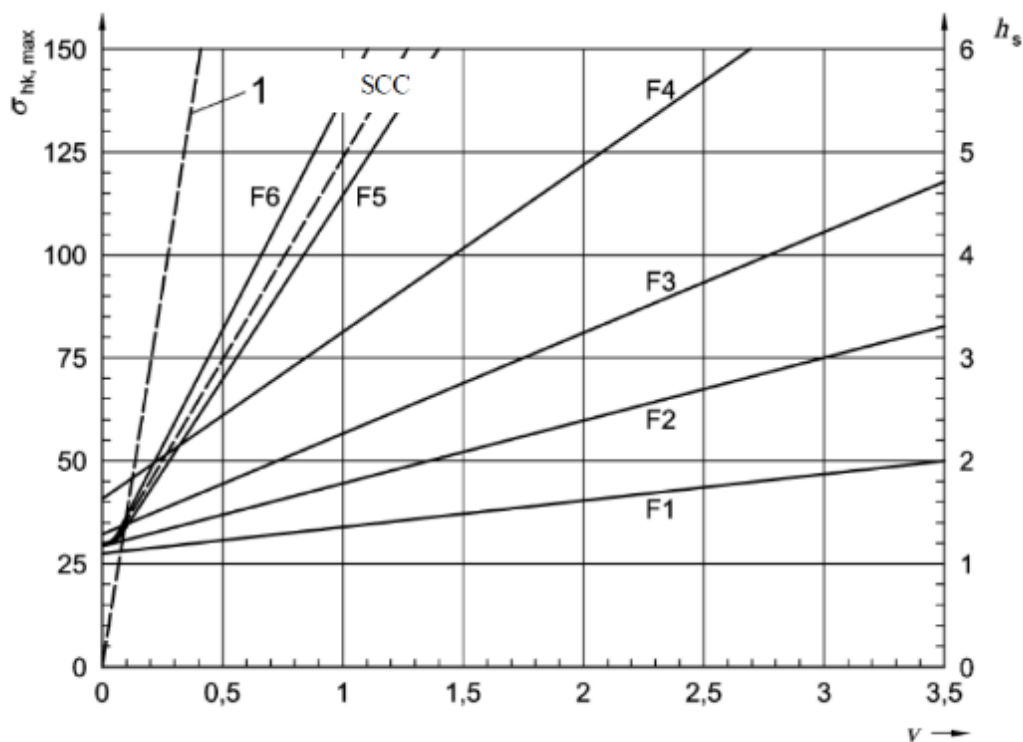
$v$  = rychlost ukládání v m/h

$h_s$  = maximální hydrostatická výška

Platí pro třídy konzistence F1 až F4, betonované úseky o výšce do 10m

[ČSN 73 0042, B.3]

Graf č. 4 pro stanovení tlaku čerstvého betonu  $\sigma_{hk,max}$  v závislosti na rychlosti plnění bedně a pro třídy konzistence v době ztuhnutí  $t_E = 15$  hodin



1- Hydrostatický tlak do doby  $t_E$

$t_E = 15$  h

$\gamma_c = 25$  kN/m³

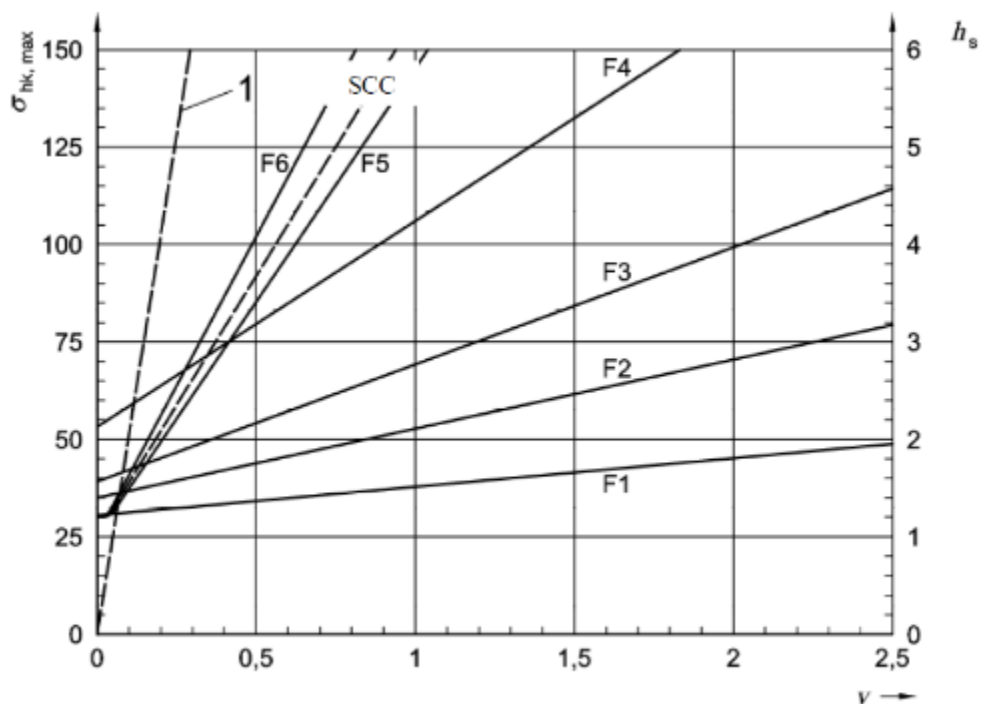
$v$  = rychlost ukládání v m/h

$h_s$  = maximální hydrostatická výška

Platí pro třídy konzistence F1 až F4, betonované úseky o výšce do 10m

[ČSN 73 0042, B.4]

Graf č. 5 pro stanovení tlaku čerstvého betonu  $\sigma_{hk, max}$  v závislosti na rychlosti plnění bedně a pro třídy konzistence v době ztuhnutí  $t_E = 20$  hodin



#### Legenda

- 1- Hydrostatický tlak do doby  $t_E$   
 $t_E = 20$  h  
 $\gamma_c = 25$  kN/m<sup>3</sup>  
 $v$  = rychlost ukládání v m/h  
 $h_s$  = maximální hydrostatická výška  
 Platí pro třídy konzistence F1 až F4, betonované úseky o výšce do 10m

[ČSN 73 0042, B.5]

## 4 **Bednění:**

Bednění je forma, do které se ukládá čerstvá betonová směs. Jedná se dočasnou konstrukci, která se po dostatečném vytvrzení betonové směsi odstraní. Bednění po dobu betonáže musí držet v požadovaném tvaru a odolávat hydrostatickým tlakům, které vznikají od čerstvé betonové směsi. Požadované únosnosti se určí výpočtem v závislosti na typu konstrukce, tvaru a výšce. Proces odstranění bednění se nazývá odbedňování.

Z historického hlediska byly bednicí a odbedňovací procesy značně nákladné a to jak finančně, tak pracně. V dnešní době se používají systémově prvky, které lze opakovaně použít. Díky systémovým prvkům dochází také ke značné časové úspoře. V případě atypických konstrukcí (např. kopule) je potřeba přistupovat k vyhotovení formy tradičním způsobem, tedy „na míru“ dané konstrukci. [2]

Bednění můžeme dělit na několik částí:

- Forma (u systémových prvků nejčastěji ocelový rám s voděodolnou překližkou), která vytváří požadovaný tvar monolitu.
- Opěrné, kotvicí a podpěrné systémy.
- Spojovací prvky.
- Pracovní lávky, žebříky a plošiny pro pohyb pracovníků. [2]

### ***Forma***

Formu u systémových prvků nejčastěji tvoří ocelový rám s voděodolnou překližkou, která vytváří požadovaný tvar monolitu. Forma je přímo ve styku s budoucí pohledovou částí monolitické konstrukce. Při působení různých tlaků při ukládce, vibrování a samotné betonové směsi nesmí docházet ke kroucení, nebo boulení formy, protože jakékoliv větší odchylky jsou po odbednění patrné na povrchu zhotovené konstrukce. Pro omezení tlaků je konstrukce vhodně vyztužena. Deskový materiál ve styku se dřevem bývá ve většině případů z dřevěné, voděodolné (foliované) překližky, tloušťky 20 až 30 mm. Dále se používá materiály z ocelových plechů, laminátů, plastů a pogumovaného textilu. Formu je třeba stabilizovat z vnějšku i vnitřku a to pomocí táhel a rozpěrek. Jako táhla bývají často používány ocelové tyče průměru 15 mm (v praxi schwupp tyče, nebo spínací tyče) se závitěm, uložená v plastové chrániče, aby bylo možné po zatvrdnutí betonové směsi tyč odstranit. Jako rozpěry mohou sloužit dřevěné hranoly nebo kovové trubky. Prvky vnějšího ztužení přenáší zatížení do podpěrného systému. [2]

### ***Opěrné, kotvicí a podpěrné systémy.***

Funkcí opěrného systému je zajistit stabilitu polohy formy v prostoru a přenesení sil do terénu, nebo nosných částí konstrukce. Je tvořen oporami, táhly a vzpěrami. Používá se zejména při provádění stěn, opěrných stěn, sloupů a pilířů.

Podpěrné systémy se používají zejména při provádění stropů, trámů, průvlaků. Je tvořen vodorovnými nosníky případně rošty, které jsou vynášeny svislými stojkami a dalšími prvky pro zajištění tuhosti ve vodorovném směru (zavětrování). [2]

#### ***Spojovací prvky:***

Slouží ke spojení jednotlivých konstrukčních částí bednicí formy. Používají se ocelové klíny, šrouby, tyče se závity a speciální matky. [2]

### **4.1 Základní požadavky**

Bedněni jako celek je potřeba navrhovat a zhotovit tak, aby:

- Jeho tuhost byla dostatečná ve všech směrech a nebyly překročeny předepsané tolerance, tedy tvarové svislé a vodorovné odchylky.
- Tvar a funkce konstrukce nesmí být narušena, zhoršena ani poškozena montáží bednicí formy, nebo jejím odbedněním.
- Bednicí forma nebo konstrukce musí vyhovovat všem příslušným normám a požadavkům
- Bedněni musí bezpečně odolávat všem účinkům, kterým bude během montáže, betonáže a následnému odbedňování na stavbě vystaveno.

Bedněni a jeho spoje musí být dostatečně těsné, aby nedocházelo k odplavování jemných částic. Povrch ve styku s betonem musí být čistý. V případě užití pro pohledový beton, musí být úprava taková, aby se dosáhlo požadovaného výsledku. Bedněni, které může absorbovat poměrné množství vody z betonové směsi, nebo umožňuje odpařování vody je potřeba přiměřeně vlhčit.

Plochy ve styku s betonovou směsí se pro snadnější odbedňování musejí ošetřovat odbedňovacím přípravkem, který musí být volen tak, aby nepůsobil negativně na beton. Obzvláště v případě pohledových betonů, ale měl by být i šetrný k životnímu prostředí a samotnému bedněni. Odbedňovací prostředky se nanášejí na povrch bedněni válečkem, štětcem, nebo stříkáním před prováděním vyvázání a ukládky výztuže. [2]

### **4.2 Druhy Bedněni**

Bedněni můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

- Bedněni pro jednorázové použití
  - o Tesařské bedněni, speciální pro jedno použití, trvale zabudované.
- Bedněni pro vícenásobné použití
  - o Dílcové panelové, systémové, speciální [2]

#### 4.2.1 Jednorázové použití

*Tesařské bedněni* se dnes používá spíše pro bedněni, kde je potřeba zhotovit složitější tvary, kde nelze použít „typizované“ systémové bedněni. Vyrábí se přímo na stavbě ze smrkových desek, nebo hranolů. Při užívání dřeva, které není ošetřeno proti absorpci vody je potřeba počítat po nasáknutí se zvýšením objemu o 4-5%.

*Speciální bedněni* jsou například papírové tuby, které se používají zejména pro kruhové sloupy. Jedná se o lepenku stlačenou do trouby pro požadovaný průměr. Vnitřek tuby je potažen folií, která zamezuje průsaku vody. Při odbedňování je tuba rozříznuta a odstraněna. Dojde tím k definitivnímu zničení formy.

*Trvale zabudované bedněni*, také označované jako ztracené bedněni zůstává po vybetonování součástí monolitické konstrukce. Může plnit funkci pohledovou, nosnou, ale i jako ochrana proti vnikání vody. Používá se například v případech, kdy není možný přístup ke konstrukci pro odbedněni. Druhy ztraceného bedněni jsou: Keramické, betonové dílce, profilované plechy, železobetonové tenkostěnné desky, ocelové trouby, dílce a tvárnice, které po vyplnění betonovou směsí vytvářejí sendvičové konstrukce. [2]

#### 4.2.2 Bedněni pro vícenásobné použití

*Dílcové – panelové bedněni*. Elementárním prvkem jsou dílce, tabule z voděodolné překližky, která je zasazena do ocelového vyztuženého rámu z úhelníků, nebo hranolů. Základní rozměry jsou 600 mm x 1 200 mm. Větší formáty většinou jejich násobky. Jednotlivé dílce se spojují do větších ploch podle požadovaného rozměru prováděné konstrukce a to pomocí dřevěných hranolů, nebo fošen spojených za pomoci svorníků.

*Systémové bedněni* dílensky vyráběné prvky a dílce včetně opěrných, podpěrných a kotvicích prvků a spojovacích systému včetně lávek a lešení komplexně jako celek dodávány na stavbu pro daný typ konstrukce s montážními plány a představuje prvkovou stavebnici. Základní prvek je dílec z foliované překližky, která je zasazena do ocelových, nebo hliníkových profilů. Tvar těchto profilů je upraven tak, aby bylo možné rychlé spojení s dalšími panely pomocí rychleupínacích spojek. Na jednotlivých panelech jsou místa pro spojení s opěrným, nebo podpěrným systémem. Podpěrné systémy tvoří příhradové nosníky, stojky a vzpěry z kovu. Oba systémy jsou vybaveny rektifikačními prvky pro nastavení přesné požadované polohy, nebo výšky bednicí konstrukce. [2]

Výhody systémového bedněni:

- Vysoká pevnost a tuhost
- Univerzálnost a variabilita užití
- Opakovatelnost použití
- Rozměrová přesnost
- Kvalita povrchu výsledného betonu
- Malá staveništní pracnost

Nevýhody systémového bedněni:

- Vysoké pořizovací náklady
- Přísné dodržování montážních postupů
- Nutná pečlivá údržba jednotlivých prvků
- Prostorová náročnost na skladování [2]

### 4.2.3 Speciální bedněni

Pro zvláštní, atypické betonové konstrukce například bedněni tunelové, posuvné, šplhavé, pojízdné a nafukovací. [2]

*Tunelové bedněni* – prostorová konstrukce, která umožňuje současné provádění stěn i stropu tunelu. Po dokončení konstrukce se nerozebírá, ale provede se popuštění pomocí rektifikačních prvků o několik desítek milimetrů od betonových ploch. Celá konstrukce se poté přesune na další takt betonáže. [2]

*Posuvné bedněni* – užívané u vysokých konstrukcí například pilíře, komíny. Je skládané ze závěsného a zvedacího zařízení, pracovní plošiny a vykonzolovaného lešení. Forma bedněni se smontuje na ploše, ze které začíná betonáž. Zpravidla se forma směrem dolů mírně rozšiřuje, aby došlo ke zmírnění tření. Závěsné zatížení přenáší zatížení rovnou na nově budovanou konstrukci. Proto musí rychlost betonáže zvolena v souladu s dostatečným zráním betonu, na který je bedněni upevněno. To tvoří stolice osazená přibližně po 2 m na vodicích ocelových tyčích, které jsou umístěny uvnitř konstrukce. Hydraulické lisy po těchto tyčích pomalu vyzvedávají bednicí konstrukci předepsanou rychlostí. [2]

*Šplhavé bedněni* – Pro betonáž vysokých konstrukcí s měnícím se průřezem (chladicí věže). Betonáž pokračuje vždy po dostatečném vytvrdnutí betonu. Poté se změni tvar bedněni podle požadovaného průřezu a pokračuje se s betonáží dalšího taktu. [2]

*Pojízdné bedněni* – Pro konstrukce vodorovné stálého průřezu. Bednicí forma je umístěna na pohyblivém podvozku, který se podle potřeby a vytvrdnutí betonu posouvá mechanicky, nebo hydraulicky. [2]

*Nafukovací bedněni* – nafukovací vložka válcového tvaru z pogumovaného textilu. Pro zhotovení kanalizačních stok a šachet, kopulí. Výhodou je nízká hmotnost a hladký povrch betonu. Nevýhodou jsou nižší únosnosti. [2]



### 4.3 Vhodnost druhu bedněni

Každá monolitická konstrukce může být svým způsobem specifická a pro volbu druhu bedněni jsou stěžejní následující faktory:

- Tvar konstrukce
- Potřeba různé rychlosti betonáže
- Je-li omezený přístup ke konstrukci
- Hmotnost bednicí konstrukce a s tím související potřeba těžké mechanizace
- Požadavek na pohledovost betonu
- Požadavky na úpravu spínacích míst a prostupů
- Tlak čerstvé betonové směsi
- Hustota výztuže konstrukce
- Manipulace s dílci ve stísněných prostorech

Bedněni se zhotovuje podle výrobně technické dokumentace (VTD), kterou zpracovává dodavatel bedněni s kompletním výpisem prvků, montážními plány a statickým posudkem. Případně výrobně technickou dokumentace zajišťuje samotný dodavatel díla. Výrobně technická dokumentace se vyhotovuje ve fázi přípravy stavby s příslušnými technologickými postupy a s plány bezpečnosti organizace práce. Technologický postup určuje počet taktů, rychlost betonáže, upřesňuje umístění a provedení dilatačních spár a smršťovacích spár. Samotnou montáž na stavbě podle montážních plánů a technologických postupů sestavují specializované pracovní čety. Systémové bedněni se většinou sestavuje na místě přilehlém těsně ke stavbě a celé, nebo části předmotovaných prvků se osazují na požadovaná místa pomocí mechanizace (jeřábů), kde se přesně usadí, případně do sestaví do požadované polohy. [2]

Tesařské bedněni se zhotovuje přesně v místě budoucí monolitické konstrukce. V tom případě musí být vyčleněn prostor pro materiál a nástroje k jeho opracování přímo ve staveništi. To může vést ke zpoždění ostatních profesí.

### 4.4 Odbedňování

Probíhá až po době, kdy betonová směs uložená v bedněni dosáhne dostatečné pevnosti, tak aby zhotovený monolitický prvek byl schopen přenést všechna zatížení, která na něj budou působit v průběhu další výstavby a tím nešlo k jeho poškození, deformacím a případným odchylkám v rámci stanovených tolerancí. [2]

Odbedňování se dá rozdělit na dvě fáze. První je uvolnění (popuštění) a poté následuje rozebrání jednotlivých prvků, nebo dílců. Práce na odbedňování musejí probíhat šetrně, aby nedocházelo k poškození monolitické konstrukce, hlavně oděrům a to hlavně u pohledových betonů. Musí být také zajištěna stabilita bedněni v případě, kdy se bedněni dá dělit na horní a dolní části. Nesmí být narušena stabilita spodní části při rozebírání vršku, aby nedošlo k ohrožení bezpečnosti a ochrany zdraví osob pohybujících se na staveništi. Při vyhotovení technologických postupů musí být dbáno i na postupy při rozebírání.

Doba od vybetonování konstrukce až po její odbednění závisí nejvíce na ročním období a to tedy na teplotách a nárůstu pevnosti. Svisle nosné konstrukce – stěny a sloupky se odbedňují zhruba po 3 dnech. U stropní konstrukce probíhá odbednění postupně v závislosti na pokračující výstavbě (přesun materiálů, pohyb pracovníků, případně techniky), kde se v závislosti na zrání betonu postupně redukuje stojky. Jejich postupnou redukci lze započít zhruba po 14 dnech. Technologické přestávky podle DIN 1045 (tab. 4.4.1) závisí na použitém cementu. [2]

Tabulka 4.4.1 – Technologické přestávky pro odbedňování podle DIN 1045

Cement	Nenosné bočnice trámů a bednění stěn a sloupů	Bednění stropní desky	Podpěry trámů, průvlaků a desek o velkém rozpětí
	dny	dny	dny
CEM II 32,5	4	10	28
CEM I 32,5	3	8	20
CEM I 32,5 R CEM I 42,5	2	5	10
CEM I 42,5 R CEM I 52,5	1	3	6

## **5 Výroba, doprava, zpracování a tvrdnutí betonu**

Výrobu, zpracování a dopravu by měli zajišťovat vyškolení pracovníci s odpovídajícími zkušenostmi. Ti by měli být přítomní po celou dobu těchto procesů. Také musí být určen pracovník, který je zodpovědný za kontrolu s odpovídající znalostí technologií betonů (výrobní i zkušební). [1]

### **5.1 Výroba čerstvého betonu**

Výroba probíhá v centrálních betonárnách a na stavenišť se distribuuje jako transport beton. Míchání jednotlivých složek betonové směsi probíhá v míchačkách. Jejím základním prvkem je buben, do kterého se v daných poměrech podle požadované směsi nadávají jednotlivé složky. Smísením této budoucí homogenní směsi a intenzivním promícháním přes lopatky umístěné v bubnu vznikne čerstvá betonová směs. Při míchání je nezbytné všechny složky dokonale promíchat, aby při dávkování bylo v každé jednotce objemu rovnoměrné zastoupení všech míchaných složek podle požadovaných poměrů. Výrobu můžeme rozdělit do dvou hlavních procesů a to *odměřování* jednotlivých složek (cement, kamenivo, voda, ostatní přísady) a samotné míchání (homogenizace).

Dávkování kameniva, vody a cementu probíhá s přesností okolo 3%. Ostatní přísady do 5%. Míchačky dělíme na Gravitační – Spádové (složky padají samospádem od lopatek), které je vhodnější pro hrubozrnné betony (menší obsah jemných částic) a nucené míchání, kde je veškeré mísení jednotlivých složek způsobováno pouze lopatkami, které je vhodné pro betony s větším obsahem menších částic (drobné kamenivo a cement s menším obsahem vody). [2]

## 5.2 Doprava betonu

Transportbeton je zamíchaný na betonárně a automíchači dopraven na stavbu. Normou daná maximální doba uložení betonu do bedněni od namíchání je 90 minut při zhruba 20°C referenční teploty betonu, aby nedošlo k ovlivnění některých vlastností výsledného betonu. Proto je doporučená maximální vzdálenost určena na 25-30 km. Při vyšší distanci staveniště je potřeba užití dalších přísad pro zpomalení tuhnutí.

Staveništní přeprava betonových hmot lze provádět:

- Samospádem pomocí žlabů, koryt do sklonu 45°
- Pásovými přepravíky
- Čerpadla hydraulická, rotační, pístová a potrubí o průměrech 100,125 mm, dosah výložníků čerpadel se odvíjí od použitého typu od 20m do 40 m výšky a 15-30 m do dálky.

Stanovený čas pro dobu dovezení směsi na stavbu by podle tabulky 5.2.1, podle typu cementu neměl překročit dobu[2]:

Tabulka 5.2.1 – Maximální doba dopravy čerstvého betonu na stavbu

Čerství beton z cementu:	Teplota prostředí[°C]	Čas dopravy [min]
<i>Nižší než třídy 42,5</i>		
CEM I (portlandský)	0 až 25	90
CEM II (struskoportlandský)	>25	40
CEM III (vysokopecní)	<0	45
<i>Třídy 4235 a vyšší</i>		
CEM I (portlandský)	0 až 25	60
CEM II (struskoportlandský)	>25	30
CEM III (vysokopecní)	<0	45

[Tab. 2.10 - Technologie Staveb I, Doc. Ing. Karel Dočkal, CSc., 2005]

### 5.3 Zpracování betonu

*Ukládka betonu* – před ukládkou je potřebná důsledná kontrola tuhosti bedně, pevnosti spojů a provést jeho zaměření s vyhodnocením svislých, vodorovných odchylek. Dále kontrola výztuže, její rozmístění, spoje, polohy dilatačních a distančních tělísek. [2]

Podle bedně a hustoty výztuže se volí i složení betonové směsi, tedy zrnitost, objem cementu, vodní součinitel a je potřeba dodržovat výšku ukládání betonu z maximálně 1,5 m výšky aby nedocházelo k rozmělnění jednotlivých částic. [2]

*Zhutňování betonu* – pomocí vibrací, kdy na beton působí kmitavý pohyb, kterým se uvedou do pohybu částice betonu. Tím dochází k jinému uspořádání jednotlivých částic zrn kameniva, zrn a vzniká hutnější struktura betonové směsi. Vytváří i lepší pohledovost, zamezuje vniku hnízd. [2]

*Vibrace* – rozlišujeme na přímé, kdy je vibrátor přímo ve styku s betonovou směsí (ponorná nebo povrchová) a nepřímé, kdy na čerstvý beton působí kmitání bednicí formy (příložný vibrátor, vibrační stůl). [2]

Hutnění betonu v závislosti na konzistenci betonu:

Tuhá směs (C1) – Dusání

Málo měkká (S1-S2) – Povrchová vibrace

Měkká (S2) – Ponorná vibrace – vpichování

Velmi měkká až měkká (S2-S3) – Příložná vibrace

Velmi měkká (S4,F4) – propichování

*Ponorná vibrace* – používají se vibrátory o průměrech 30-100 mm, vzdálenost jednotlivých vpichů nesmí přesáhnout 1,5 násobek poloměru zvoleného vibračního tělesa. Ponoření vibrátoru nesmí přesáhnout 300 až 500 mm, aby nezasahovalo a neoživovalo již zhutněnou tuhnoucí vrstvu. Vzdálenost od bednicí formy by měla být větší než 200 mm. Při užití na příliš tuhé konzistenci se otvory vytvořené vibrátorem nemusí zacelovat. Naopak při užití na příliš měkké konzistenci dojde k rozmíšení jemných částic a může dojít k nasávání vzduchu. [1]

*Povrchová vibrace* – za použití vibračních lišt po povrchu uloženého betonu. Lze použít na konzistence S1-S2. Vibrační latě pracují za obvyklé frekvence 50-100 Hz. Doba zhutnění obvykle za 60 s. Posouvání vibrátoru po povrchu zhruba 0,5-5 m/s. [1]

*Příložná horizontální vibrace* – Vibrátor a bednicí forma mohou tvořit jeden celek o dostatečné prostorové tuhosti. Rozmístění vibrátorů po formě po 1,5 – 2,5 m. Maximální doba hutnění 5 minut. [1]

*Vertikální spodní vibrace* – Dílce na podložkách. Použitelné pouze pro málo měkké betony. Frekvence 25-250 Hz. Doba hutnění od 10 do 100 s. [1]

*Propichování* – Pouze pro měkké a tekuté směsi. Provádí se za pomoci tyčí o průměru 15-25 mm.

*Dusání* – Pro tuhý a zavlhlý beton. Maximální tloušťka uložené vrstvy 100 až 150 mm. Doba dusání by neměla překračovat 2 minuty. Minimální krytí výztuže 50 mm. [1]

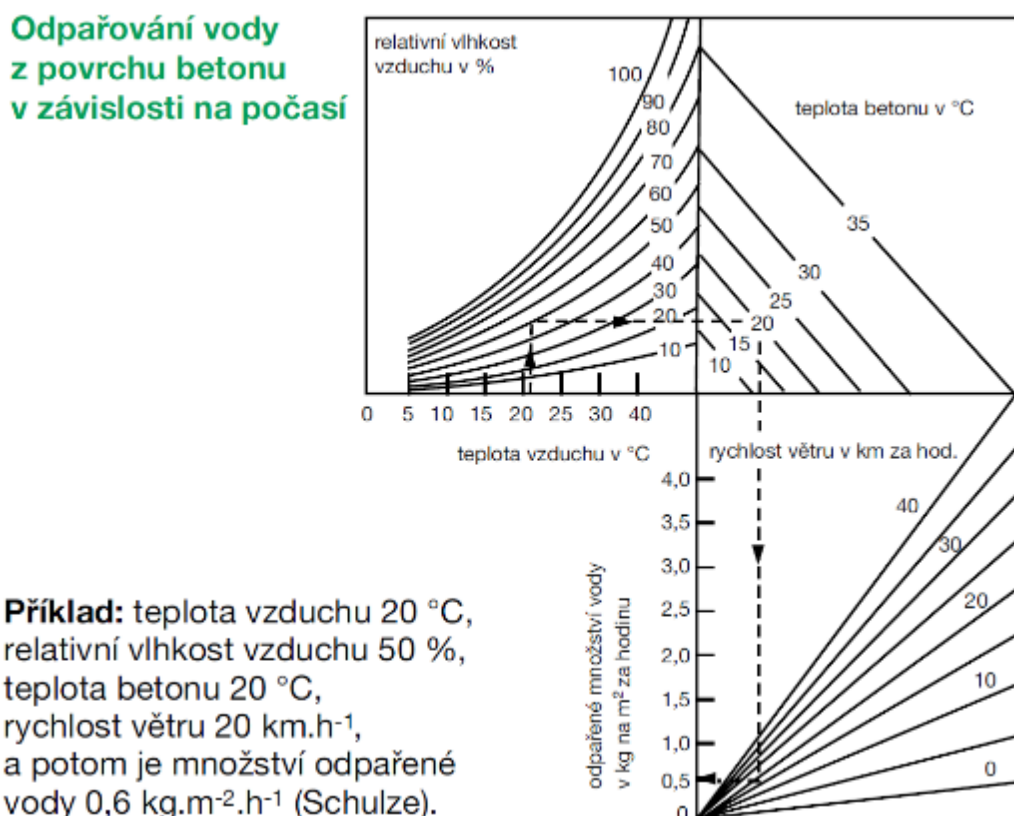
## 5.4 Ošetřování betonu

Způsob ošetřování uložené směsi může značně ovlivnit výslednou pevnost betonu. Konkrétně hydratace cementu značně ovlivňuje tento proces. Při rychlém vysoušení povrchu díky rozdílným teplotám uvnitř a na povrchu betonové směsi nebo promrzáním mohou vznikat nežádoucí tahová, nebo tlaková napětí, které je potřeba eliminovat. Tyto jevy mohou vést ke zhoršení povrchové struktury, popraskání nebo zhoršení únosnosti celé konstrukce. Proto je potřeba s ošetřováním začít co nejdříve po vybetonování a ošetřování také ukončit co nejdříve v 28 denním procesu zrání betonu. [1]

Zajišťováním neustále hydratace betonu, tedy vlhkého prostředí a zajištění proti odpařování vody se snižují procesy dotvarování (deformace), smršťování (vznik trhlin) a dochází k navyšování celkové pevnosti a tím i životnosti betonové konstrukce. Ochrana betonového povrchu se provádí například pozdějším odbedněním konstrukce (převážně v letních měsících), kropením vodou v pravidelných intervalech v závislosti na teplotě a počasí, překrytím povrchu (folie nebo vlhčená geotextilie), případně nástřiky pro vytvoření ochranných filmů. [1]

V závislosti na povětrnostních podmínkách (teplota, počasí – déšť, sucho, vítr) se odpařuje určité množství vody z provedené konstrukce. Viz. normogram odpařování vody. [1]

Obrázek 11 - odpařování vody z povrchu betonu



[Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s.]

Minimální doba ošetřování pro betony se stupněm vlivu prostředí XC1,X0 Požadují normy ČSN minimální dobu ošetřování 12 hodin při teplotách + 5 °C. Ideálně ovšem do té doby, než beton dosáhne 50 % své předepsané pevnosti v tlaku.

Tabulka 5.4.1 – doba ošetřování betonu

Teplota povrchu betonu (t) ve °C	Nejkratší doba ošetřování ve dnech <sup>1),2)</sup>			
	vývoj pevnosti betonu ( $f_{cm2}/f_{cm28}$ ) <sup>4)</sup>			
	rychlý $r \geq 0,5$	střední $r = 0,30$	pomalý $r = 0,15$	velmi pomalý $r < 0,15$
$t \geq 25$	1	1,5	2	3
$25 > t \geq 15$	1	2	3	5
$15 > t \geq 10$	2	4	7	10
$10 > t \geq 5$	3	6	10	15

<sup>1)</sup> Doba tuhnutí přesahující 5 hodin.

<sup>2)</sup> Mezi hodnotami lze interpolovat

<sup>3)</sup> Pro teploty nižší než 5 °C se může doba prodloužit

<sup>4)</sup> Vývoj pevnosti betonu podle ČSN EN 206-1

[ČSN EN 13670]

## 5.5 Tvrdnutí betonu

Tvrdnutí betonové směsi lze rozdělit na tři různé rychlosti náběhu pevnosti v počátcích tvrdnutí.

*Normové podmínky* – tvrdnutí nastává při 20 +/- 2 °C, Relativní vlhkost nesmí překročit 90 %.

*Zpomalené tvrdnutí* – za použití retardačních přísad, nebo teploty menší než 15 °C

*Urychlené tvrdnutí* – Zvýšená teplota betonu, použití chemických přísad, cementy s označením R, složení betonu (nízký vodní součinitel) [1]

Tabulka 5.5.1 - Doporučená složení betonu pro vývoj pevnosti betonu

Vývoj pevnosti	Vodní součinitel	Druh cementu
Rychlý	< 0,5	42,5 R, 52,5 N/R
Střední	0,5-0,6 < 0,5	42,5 R, 32,5 R, 42,5
pomalý	Vše ostatní	Ostatní

[Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s. ]

Tabulka 5.5.3 Průběh nárůstu pevnosti betonu při 20°C

Průběh nárůstu pevnosti	Předpokládaný pevnostní součinitel $f_{cm,2}/f_{cm,28}$
Rychlý	$\geq 0,5$
Střední	$\geq 0,3$ až $< 0,5$
Pomalý	$\geq 0,15$ až $< 0,3$
Velmi pomalý	$< 0,15$

[Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s. ]

Nárůst pevnosti je v tabulce 5.5.3 vyjádřen poměrem pevnosti betonu po dvou dnech ku pevnosti betonu po osmadvaceti dnech. Pevnosti se stanoví při průkazných zkouškách. Zkoušky, odběry a jejich postupy jsou stanoveny příslušnými normami ČSN EN 12350-1, ČSN EN 12390-3, ČSN EN 12390-2, ČSN EN 12390-1. [1]

### 5.5.1 Proteptování betonu

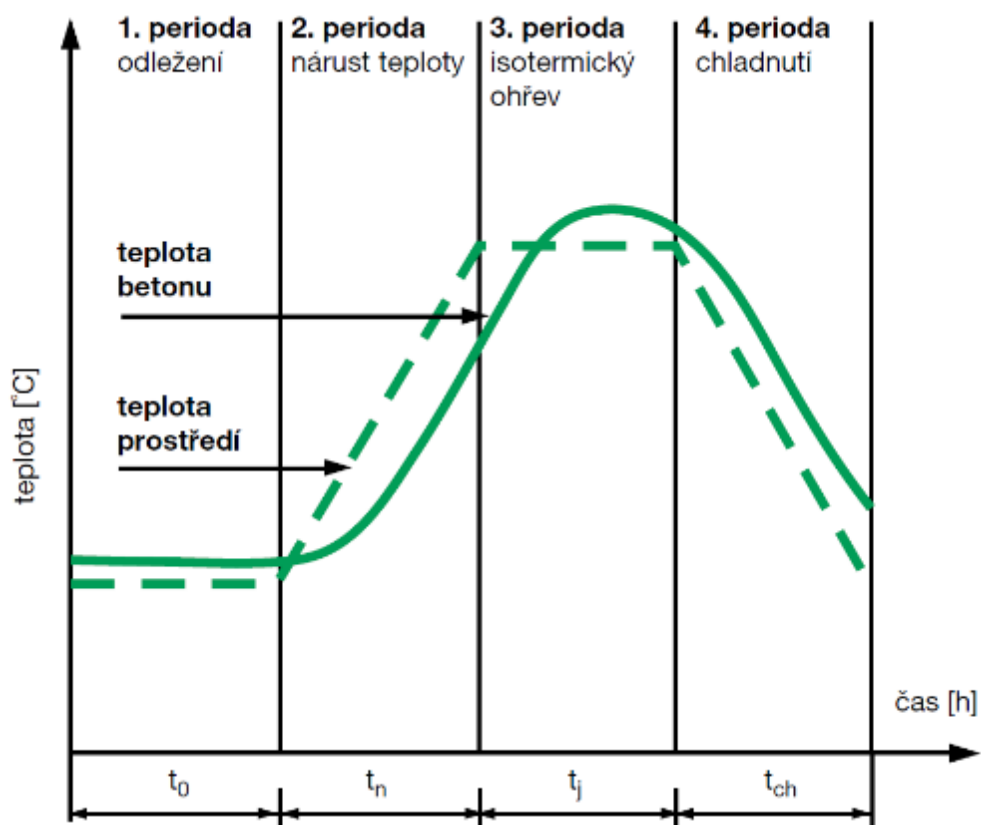
Velkou roli při nárůstu pevnosti má teplota. Vyšší teploty (30°C a více) mohou citelně urychlovat proces tvrdnutí hlavně v počáteční fázi tvrdnutí betonu. Vyšší teploty jsou velmi využívány při výrobě prefabrikovaných prvků. Vyšší teploty významně urychlují hydrataci pojiva neboli cementu, která závisí na obsahu vzduchu a vody. Tyto dva prvky mají různé roztažnosti a proces ohřívání nebo ochlazování je doprovázen teplotní roztažností, která ovlivňuje výsledný vzhled, strukturu a pevnost betonu. [1]

Proto při řízeném proteptování je potřeba výše zmíněné aspekty brát v úvahu. Proti betonu tuhnucímu v normálních podmínkách definovaných výše v textu, dochází ke snížení pevnosti a to výrazněji v tahu než v tlaku. Při proteptování nad 80°C se tyto rozdíly v pevnostech výrazněji navyšují. Normativně daným režimem při proteptování platí:

- 3 hodiny od namíchání směsi nesmí teplota překročit 30 °C.
- 4 hodiny od namíchání směsi nesmí teplota překročit 40 °C.
- Teplota betonové směsi při prohřevu nesmí překročit 60 °C.
- Hodinový nárůst teploty při prohřevu maximálně 20 °C.
- Hodinový pokles teploty směsi maximálně 10 °C. [1]



Obrázek 12 – Proteplování betonu



Závislost regulované teploty betonové směsi v čase, rozdělená do čtyř period definovaných teplotou  $T [^{\circ}C]$

[Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s. ]

### 5.5.2 Betonování za vyšších teplot v letním počasí

Teplota ukládané betonové směsi nesmí překročit 27°C. Při letních teplotách dochází k nežádoucímu urychlení hydratačního procesu betonové směsi a tím se zvyšuje pravděpodobnost vzniku trhlinek v betonu, také z důvodu odpařování vody. Doba pro zpracování čerstvé betonové směsi se také výrazně zkracuje. Přidávání většího množství vody do čerstvé betonové směsi je nepřijatelné a to z důvodů výrazného snížení vlastností výsledné směsi. [1]

Tabulka 5.5.4 - Doporučená doba zpracování betonu při vyšších teplotách v minutách

Teplota [°C]	konzistence		
	velmi tuhá C1	tuhá až měkká S2-S3	tekutá S5/ F4
20	35	50	35
30	30	40	30
45	25	30	25
60	20	25	20

[Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s. ]

Opatření vhodná pro betonování v letních měsících:

- Zakrytí kameniva před přímým slunečním zářením a jeho případné ochlazení před použitím do betonové směsi.
- Zakrytí strojních zařízení (pro míchání, přepravu), ale i samotného betonu před přímým slunečním zářením.
- Čas ukládání betonové směsi posunout na noční, nebo ranní hodiny, kdy teploty nedosahují vysokých hodnot.

Nelze-li se vyhnout vysokým teplotám nad 30 °C a přímému záření. Je potřeba nutnost betonáže přehodnotit a případně přesunout na den s vhodnějšími podmínkami. Pro zamezení škod technicky nezajištěné betonáže.

V porovnání jednotlivých složek betonové směsi má největší vliv na snížení celkové teploty jednoznačně kamenivo. K dosažení nižších teplot postačuje snížit teplotu kameniva o 1°C, ale u vody bylo potřeba ochladit o 8°C, stejně tak cement o 8°C. Popílek o více než 45°C. [1]

Tabulka 5.5.5- Vliv jednotlivých složek a celkovou teplotu betonu

Složka	dávka receptury [kg.m <sup>-3</sup> ]	skutečná dávka [kg.m <sup>-3</sup> ]	měrná tepelná kapacita [kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>1</sup> ]	Teplota [°C]	$\chi^1$ [°C]	$1/\chi^2$ [°C]
cement	360	360	0,92	45	0,12	8,3
kamenivo	1699	1750			0,66	1,5
drobné	850	892	0,96	25	0,36	2,8
hrubé	850	858	0,92	25	0,3	3,4
popílek	60	60	1,01	30	0,02	45,5
voda	132	81	4,184	15	0,12	8,1

<sup>1)</sup> Navýšení teploty bude-li teplota složky vyšší o 1 °C

<sup>2)</sup> Hodnota, o kterou je nutné ochladit složku, aby bylo dosaženo snížení teploty čerstvého betonu o 1 °C

[Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s. ]

### 5.5.3 Betonování za nižších teplot v zimním počasí

Při betonování za nižších teplot je velký problém s pomalým nárůstem pevnosti betonu. Jak počátečních pevností, tak celkových. Hydratační proces je v důsledku nízkých teplot výrazně zpomalen (při nižších teplotách než 5 °C, kolem 0 °C je hydratace v podstatě zastavena). Počasí se obecně definuje na silné mrazy (teploty klesají pod -10 °C), dlouhé mrazivé období a krátké mrazy (od 0 °C do - 10 °C). Způsoby ochrany se dělí na pasivní a aktivní. Beton je třeba ochraňovat proti ztrátě hydratačního tepla. [1]

Tabulka 5.5.6 - Procentuální vývoj pevnosti betonu v 28 denní pevnosti

Pevnostní třída cementu	venkovní teplota +20 °C			venkovní teplota +5 °C		
	3d	7d	28d	3d	7d	28d
22,5	30-50	45-65	100	10-15	20-40	70-80
32,5	45-60	55-70	100	20-45	35-60	80-85
42,5	55-65	70-80	100	40-50	50-65	85-95

[Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s. ]

V raném stádiu tuhnutí betonu je potřeba beton důsledně ochraňovat proti promrznutí, alespoň dokud nedosahuje minimálních pevností označované jako „zmrazovací pevnost“ od 5 do 15 MPa. Voda při zámrazu nabývá svůj objem až o 10%.

Pokud je pevnost prvku menší než 0,1 MPa, tak hydratace ještě nezapočala a při teplotách kolem nuly hydratace ustává. V případě navýšení teploty o 5 °C, tak hydratace pokračuje bez porušení struktury betonové směsi a snížení konečných vlastností včetně pevností. [1]

V případě, že betonový prvek má pevnost větší než 0,1 MPa a působením záporných hodnot vzniká v betonové směsi led, tak nastává destrukce struktury, nastává vznik trhlinek, zhoršení vlastností, požadovaných odolností a výsledné pevnosti.

V případě pohybu narůstající pevnosti mezi 12-15 MPa může beton zmrznout bez porušení struktury a výraznějších důsledků na vlastnostech a pevnosti. Cyklus zmrazování a rozmrazování se nesmí vícekrát opakovat.

Pokud se v bedně nachází sníh, nebo dokonce led, je potřeba tyto prvky před započítáním betonáže odstranit a to nejlépe horkým vzduchem. Méně vhodné je užití horké vody, nebo páry. Výztuž a ostatní ocelové prvky je vhodné také očistit a zahřát na teplotu alespoň 0 °C. V případě pracovní spáry je naprosto nevhodné zahájit betonáž na promrzlou, nebo zledovatělou spáru. Maximální rozdíl teplot mezi vnějším krajem a vnitřkem konstrukce je 15 °C. Pokud je teplotní rozdíl těchto hodnot překročen, tak se výrazně zvyšuje pravděpodobnost poruch a znehodnocení betonu. [1]

Opatření vhodná pro betonování v zimních měsících:

- Snížení vodního součinitele pomocí plastifikačních přísad.
- Pro betonovou směs použít cementy vyšších pevností, nebo cementy s vyšším nárůstem pevnosti (42,5 R, 52,5 R)
- Zajistit opatření taková, aby teplota betonové směsi neklesla pod 5 °C a to 72 následujících hodin po betonáži.
- Teplota dodávaného betonu na stavbu by před ukládkou neměla klesnout pod 10 °C.
- Zajistit dostatečnou ochranu betonu proti promrznutí až do nárůstu pevnosti minimálně 15 MPa.
- Tepelně zaizolovat bednění proti úniku hydratačního tepla.
- Ohřevem bednicí formy. [1]

## 6 Pevnost betonu

Největší předností betonu je jeho schopnost odolávat velmi vysokým napětím v tlaku (sevřený, soustředěný). Mnohem menší jsou jeho odolnosti na tah (prostý, ohyb, příčný tah) a smyk (střih, kroucení).

Z empirických vztahů lze konstatovat, že pevnost v ohybu je rovna zhruba 1/8 pevnosti v tlaku a pevnost ve smyku je rovna 1/12 pevnosti v tahu.

Tyto poměry se s vyššími třídami betonu postupně snižují. Stejně tak se snižují i se stářím betonu.

Pevnosti v betonu v tlaku se uvádí v  $\text{N/mm}^2$  a značí se  $f_{c,cube}$  ( $R_B$ ). Pevnost se podle ČSN EN 206-1 zkouší na krychlich o rozměrech 150x150x150 mm norma ČSN EN 12390-1 definuje povolené mezní odchylky forem. [1]

Tabulka 6.1.1 - Vliv stáří betonu na jeho pevnosti (%) ve dnech.

Pevnosti třída cementu	3 dny	7 dnů	28 dnů	180 dnů	1 rok
32,5	45-65	60-75	100	105-125	105-130
42,5 a 52,5	55-70	70-80	100	105-115	105-130

[Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s.]

Výsledná pevnost betonu vypovídá o jeho kvalitě. Pevnost je výrazně ovlivněna poměrem vodního součinitele (více vody = nižší pevnost), množství cementového kamene, poměr cementu a kameniva (minimální poměr 1,05 a maximálně 1,5). Dále rozhodují teploty a vlhkost prostředí, do kterého je betonová směs uložena a následně zraje a tuhne. [1]

### 6.1 Zkoušky pevností betonu

Reprezentativní vzorky sestávají minimálně ze tří vzorků čerstvého betonu o objemu 0,02 m<sup>3</sup>. Používané formy musejí být vodotěsné a z materiálu, který nebude odsávat vodu ze vzorku. Zhutnění probíhá za pomoci vibrační desky o frekvenci 40 Hz. Vibruje se až po dobu, kdy se na povrchu vzorku neobjeví souvislá vrstva cementové kaše. Používá se pro konzistence S1, S2, V1, V2, C0, C1, C2.

Druhá možnost vibrování je za pomoci ponorného vibrátoru o frekvenci 120 Hz. Průměr vibrátoru musí být maximálně ¼ rozměru zkušební formy. Používá se pro konzistence S2, V2, C2. Lze použít i ruční propichování tyčí pro konzistence S3, S4, V3, V4, C3. Samozhutňující betony se ukládají do formy bez následného hutnění. [7]

Zkušební tělesa bezprostředně po odběru nelze přemísťovat, aby nedošlo k rozmísení jednotlivých složek směsi. Skladování zkušebních těles ve formě by mělo probíhat za teploty 20 °C (tolerance +/- 5 °C). Minimálně pro dostatečné vytvrdnutí vzorku ve formě (zhruba 16 hodin). Nejdéle však po dobu 36 hodin. Poté se zkušební vzorky vloží do kádě s vodou o stálé

teplotě 20 °C (tolerance  $\pm 2$  °C). Beton, který je uložen do prostředí 60 % vlhkosti z pravidla dosahuje jen 80-90% své pevnosti. [8]

Základní rozměry zkušebních těles jsou:

- Krychle 150x150x150 mm
- Válec  $d=150$  mm, Výška = 300 mm
- Hranoly (rámečky) 150x150x600 mm (testování v příčném tahu) [8]

*Pevnost v tlaku zkušebních těles:*

- Ověření rozměrů zkušebních těles s přesností na 1 mm. Rozměry musí vyhovovat ČSN EN 12390-1
- Působení zatěžovacího lisu 0,4-0,8 MPa/s
- Změření maximálního zatížení při porušení tělesa
- Stanovení pevnosti v tlaku (přesnost na 0,1 N.mm<sup>-2</sup>), kde  $f_c = F / A_c$
- Vyhodnocení způsobu porušení těles [9]

*Nedestruktivní metody:* Přesností nemohou nahradit zkoušky destruktivní, ale mohou udávat jistou představu o nárůstu pevnosti, která je odhadována mezi vztahy pevnosti a výslednými hodnotami z nedestruktivních metod, odečtení stupnice tvrdoměrů, nebo změření rychlosti impulsů ultrazvukových metod. Tvrdoměry, jako například Schmidtovo kladívko, jsou složeny z pružiny, která se natahuje a následně vymršťuje ocelový úderník proti povrchu testovaného místa na betonu. Velikost odrazu se odečítá ze stupnice na tvrdoměru. Pro jednotlivé pevnosti betonu existují i jednotlivé typy tvrdoměrů, které by před opakovaným používáním měly procházet pravidelnou kalibrací na kalibrační kovadlině.

Tvrdoměr se při zkoušce přikládá kolmo k testované ploše. Plynule se zvyšuje tlak na razník tvrdoměru, dokud k vystřelení úderníku. Na jedné ploše by takto mělo proběhnout minimálně devět zkoušek s minimálním rozptylem po 25 mm. Výsledná hodnota se průměruje podle počtu pokusů. Pokud více jak 1/5 hodnot se liší o více jak 6 jednotek od průměru, nedá se zkouška považovat za objektivní. [10]

U suchého betonu lze zaznamenat vyšší hodnoty tvrdosti u zkoušek s tvrdoměry, než u povrchů s vlhkým betonem. Stejně tak obroušený povrch betonu vykazuje vyšší tvrdost než povrchy nebroušené (po odstranění bedněni). Roli zde může hrát i teplota jak samotného tvrdoměru (nemá být vyšší než 10 °C). Teplota povrchu betonu od záporných hodnot do 0 °C může vykazovat vyšší hodnoty, než kterou ve skutečnosti beton dosahuje. Při porovnávání jednotlivých měření je potřeba užít stejný typ tvrdoměru. V opačném případě nejsou data relevantní, jelikož různé tvrdoměry vykazují rozdílné hodnoty. [1]

## 6.2 Deformace betonu

Deformace betonových konstrukcí můžeme dělit na elastické (vratné) a plastické (nevratné). Vratné deformace jsou ovlivněny modulem pružnosti a reologickými účinky (smrštění, dotvarování). Plastické deformace se odvíjí od velikosti zatížení a dotvarováním, ale i smrštěním konstrukce od karbonatace a hydratace.

Modul pružnosti je závislost mezi namáháním materiálu a jeho přetvořením. Z Hookova zákona je tato závislost mezi přetvořením a namáháním lineární pouze v počátcích zatěžování. Při vyšším napětí, které dosáhne hodnot k 30% zlomového napětí, dochází ke vzniku trhlinek (plastické deformace). Měření modulu pružnosti betonu probíhá destruktivními a nedestruktivními metodami. Přesné postupy definují příslušné normy a normalizační postupy. Modul pružnosti ovlivňuje také statické schéma uložení betonové konstrukce, stáří betonu, agresivita prostředí a přísady (kamenivo). Pružné materiály mají zpravidla nižší modul pružnosti než materiály tuhé. [1]

Složky ovlivňující dotvarování:

- Druh a obsah cementu
- Vodní součinitel
- Druh kameniva
- Pórovitost
- Způsob ošetřování betonu
- Doba a druh zatížení
- Velikost konstrukce [1]

### **6.3 Vodotěsnost betonu**

Otevřené kapiláry větší než  $10^{-7}$  m dovolují prostup tlakové vody. Menší póry průsak neumožňují.

Ke stanovení množství průsaku vody slouží podle ČSN EN 12390-8 zkouška průsaku tlakovou vodou. Provádí se na tělesech odebraných v průběhu betonáže do krychlových forem o délkách stran 150 mm, 200 mm, 300 mm, nebo z vývrtů. Stáří betonu nesmí být vyšší než 28 dní. Před zkouškou je potřeba stanovit objemovou hmotnost. Poté se zkušební vzorek umístí, do zařízení, kde je zatížen tlakem vody. Pokud se na nezatížené straně tlakem vody objeví mokrá skvrna, je tato skutečnost zaznamenána. Po provedení zkoušky se těleso rozlomí a zaznamená se nejvyšší hloubka průsaku. [11]

Odolnost betonu proti tlakové vodě lze navýšit:

- Dokonalým zhutněním betonu
- Nízkým vodním součinitelem
- Dlouhodobým ošetřováním betonu
- Užitím hydrofobizačních přísad
- Impregací betonu

[11]



## 7 Experimentální část

Obsahem experimentální části je testování cementových směsí za různých teplotních pomoci Vicatova přístroje viz. kapitola 2.1.1. Poměry množství cementu a vody, případně plastifikátoru jsou uvedeny spolu s jednotlivými časy. Protokoly zachycují narůstající odpor tuhnoucí směsi jednotlivými vpichy do cementové kaše. V případě naměření 0 mm nezapočalo tuhnutí směsi, neboť jehla projela celým prstencem bez většího odporu a zastavila se až o skleněnou destičku. V případě měření 3 mm je zaznamenán čas počátku doby tuhnutí. V případě měření 40 mm (výška prstencové formy) neprošla jehla ani 1 mm do vzorku a jedná se tedy o konec doby tuhnutí.

V další části experimentální části jsou naměřené hodnoty aplikovány přímo na konkrétní případ betonáže mostního pilíře D6.

### 7.1 Tuhnutí betonu



Obrázek 13 – Zkušební aparatura, Vicatův přístroj s nástavci (jehla, váleček), teploměrem a ztvrdlým zkušebním vzorkem

**Vzorek číslo 1.** (Vzorek nebyl použit do viz. vyhodnocení)

Cement: Cem I 42,5 R - Radotín

Množství cementu (C): 1080 g čas: 10:25

Množství vody (V): 450 g teplota: 6,5 °C

poměr (V/C): 0,42 Vlhkost: 87 %

Plastifikátor: - **Odpor směsi (zk. Válcem): 0 mm**

Tabulka 7.1 - přehled jednotlivých měření odporu směsi VI.

Č. MĚŘENÍ	ČAS	ČAS t+ [min]	Odečtená hodnota [mm]	Teplota [°C]	Nárůst
1	10:55	+30	0	8 °C	-
2	11:05	+40	0	7 °C	-
3	11:15	+50	0	7 °C	-
4	11:25	+60	0	7 °C	-
5	11:35	+70	0	7 °C	-
6	11:45	+80	0	8 °C	-
7	11:55	+90	0	8 °C	-
8	12:15	+110	0	8 °C	-
9	12:25	+120	0	8 °C	-
10	12:35	+130	0	7 °C	-
11	12:50	+145	0	6,5 °C	-
12	13:05	+160	0	7 °C	-
13	13:20	+175	0	7 °C	-
14	13:30	+185	0	7 °C	-
15	13:45	+200	0	7 °C	-
16	14:05	+220	0	7 °C	-
17	14:15	+230	0	7 °C	-
18	14:30	+245	0	7 °C	-
19	14:50	+265	0	7 °C	-
20	15:15	+290	0	7 °C	-
21	15:40	+315	0	7 °C	-
22	16:00	+335	0	7 °C	-
23	16:45	+380	0	7 °C	-

Vyhodnocení experimentu – Vzorek číslo 1:

K počátku doby tuhnutí došlo až po více než 500 minutách od doby smíchání vody s cementem. Byla namíchána příliš řídká konzistence cementové kaše a nebyla provedena zkouška normální hustoty hustoměrným válečkem, který se po uložení směsi do kruhové formy a uvolnění západky musí zastavit nad skleněnou destičkou 6 mm (+- 3 mm). U ostatních vzorků bude tato zkouška odporu směsi provedena.

**Vzorek číslo 2.**

Cement: Cem I 42,5 R - Radotín

Množství cementu (C): 934 g čas: 11:40

Množství vody (V): 272 g teplota: 8 °C

poměr (V/C): 0,29 Vlhkost: 83 %

Plastifikátor: - Odpor směsi (zk. Válcem): 7 mm

Tabulka 7.2 - přehled jednotlivých měření odporu směsi V2.

Č. MĚŘENÍ	ČAS	ČAS t+ [min]	Odečtená hodnota [mm]	Teplota [°C]	Nárůst
1	12:50	+70	0	8 °C	-
2	13:40	+120	0	8 °C	-
3	14:10	+150	0	9 °C	-
4	14:20	+160	0	9 °C	-
5	14:35	+175	0	8 °C	-
6	14:50	+200	0	8 °C	-
7	15:00	+210	0	9 °C	-
8	15:10	+220	0	9 °C	-
9	15:20	+230	0	9 °C	-
10	15:40	+250	0	9 °C	-
11	16:00	+270	1	9 °C	-
12	16:10	+280	1	9 °C	-
<b>13</b>	<b>16:20</b>	<b>+290</b>	3	9 °C	67%
14	16:30	+300	3	9 °C	0%
15	16:40	+310	7	9 °C	57%
16	16:50	+320	10	9 °C	30%
17	17:00	+330	10	9 °C	0%
18	17:10	+340	13	9 °C	23%
19	17:20	+350	15	9 °C	13%
20	17:30	+360	19	9 °C	21%
21	17:40	+370	23	9 °C	17%
22	17:50	+380	35	9 °C	34%
23	18:00	+390	36	9 °C	3%
<b>24</b>	<b>18:10</b>	<b>+400</b>	40	9 °C	10%

Vyhodnocení experimentu – Vzorek číslo 2:

Počátek doby tuhnutí: +290 minut od přidání vody.

Konec doby tuhnutí: + 400 minut od přidání vody.

Doba od počátku ke konci doby tuhnutí = 140 min.

**Vzorek číslo 3.**

Cement: Cem I 42,5 R - Radotín

Množství cementu (C): 931 g čas: 12:00

Množství vody (V): 335 g teplota: 16 °C

poměr (V/C): 0,35 Vlhkost: 85 %

Plastifikátor: - Odpor směsi (zk. Válcem): 4 mm

Tabulka 7.3 - přehled jednotlivých měření odporu směsi V3.

Č. MĚŘENÍ	ČAS	ČAS t+ [min]	Odečtená hodnota [mm]	Teplota [°C]	Nárůst tuhnutí směsi
1	12:30	+30	0	16 °C	-
2	13:00	+60	0	16 °C	-
3	13:30	+90	0	16 °C	-
4	14:00	+120	0	16 °C	-
5	14:20	+140	0	16 °C	-
6	14:40	+160	0	16 °C	-
7	14:50	+170	0	16 °C	-
8	15:00	+180	0	17 °C	-
9	15:10	+190	0	17 °C	-
10	15:20	+200	0	17 °C	-
11	15:30	+210	2	17 °C	-
<b>12</b>	<b>15:40</b>	<b>+220</b>	<b>3</b>	17 °C	33%
13	15:50	+230	8	17 °C	63%
14	16:00	+240	12	17 °C	33%
15	16:10	+250	16	17 °C	25%
16	16:20	+260	21	17 °C	24%
17	16:30	+270	27	17 °C	22%
<b>18</b>	<b>16:40</b>	<b>+280</b>	<b>40</b>	17 °C	33%
19					
20					
21					
22					
23					
24					

Vyhodnocení experimentu – Vzorek číslo 3:

Počátek doby tuhnutí: +220 minut od přidání vody.

Konec doby tuhnutí: + 280 minut od přidání vody.

Doba od počátku ke konci doby tuhnutí = 60 min.

**Vzorek číslo 4.**

Cement: Cem I 42,5 R - Radotín

Množství cementu (C): 931 g čas: 12:00

Množství vody (V): 335 g teplota: 25 °C

poměr (V/C): 0,35 Vlhkost: 85 %

Plastifikátor: - Odpor směsi (zk. Válcem): 4 mm

Tabulka 7.4 - přehled jednotlivých měření odporu směsi V4.

Č. MĚŘENÍ	ČAS	ČAS t+ [min]	Odečtená hodnota [mm]	Teplota [°C]	Nárůst tuhnutí směsi
1	12:30	+30	0	30°C	-
2	13:00	+60	0	30°C	-
3	13:30	+90	0	30°C	-
4	14:00	+120	0	32°C	-
5	14:20	+140	0	32°C	-
<b>6</b>	<b>14:40</b>	<b>+160</b>	<b>4</b>	32°C	-
7	14:50	+170	9	32°C	56%
8	15:00	+180	14	32°C	36%
9	15:10	+190	20	32°C	30%
<b>10</b>	<b>15:20</b>	<b>+200</b>	<b>40</b>	32°C	50%
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					

Vyhodnocení experimentu – Vzorek číslo 4:

Počátek doby tuhnutí: +160 minut od přidání vody.

Konec doby tuhnutí: + 200 minut od přidání vody.

Doba od počátku ke konci doby tuhnutí = 40 min.

**Vzorek číslo 5.**

Cement: Cem I 42,5 R - Radotín

Množství cementu (C): 845 g čas: 11:45

Množství vody (V): 240 g teplota: 6 °C

poměr (V/C): 0,28 Vlhkost: 85 %

Plastifikátor: 7,2 g (3%) Odpor směsi (zk. Válcem): 5 mm

Tabulka 7.5 - přehled jednotlivých měření odporu směsi V5.

Č. MĚŘENÍ	ČAS	ČAS t+ [min]	Odečtená hodnota [mm]	Teplota [°C]	Nárůst tuhnutí směsi
1	12:30	+45	0	8°C	-
2	13:20	+105	0	8°C	-
3	13:30	+110	0	8°C	
4	14:00	+140	0	8°C	
5	14:30	+170	0	8°C	
6	14:50	+190	0	8°C	
7	15:00	+200	0	8°C	
8	15:10	+210	0	8°C	
9	15:20	+220	1	8°C	
10	15:30	+230	1	8°C	0%
11	15:40	+240	2	8°C	50%
<b>12</b>	<b>15:50</b>	<b>+250</b>	<b>4</b>	8°C	50%
13	16:00	+260	4	8°C	0%
14	16:10	+270	7	8°C	43%
15	16:20	+280	7	8°C	0%
16	16:30	+290	10	8°C	30%
17	16:40	+300	11	8°C	9%
18	16:50	+310	13	8°C	15%
19	17:00	+320	24	8°C	46%
20	17:10	+330	29	8°C	17%
21	17:20	+340	32	8°C	9%
<b>22</b>	<b>17:30</b>	<b>+350</b>	<b>40</b>	8°C	20%
23					
24					

Vyhodnocení experimentu – Vzorek číslo 5:

Počátek doby tuhnutí: +250 minut od přidání vody.

Konec doby tuhnutí: + 350 minut od přidání vody.

Doba od počátku ke konci doby tuhnutí = 100 min.

Tabulka 7.6 – Výsledné doby počátku a konce tuhnutí jednotlivých vzorků

Vzorek	Průměrná teplota	Počátek doby tuhnutí [min]	Konec doby tuhnutí [min]	$t_E$ [hodin]	Porovnání počátku doby tuhnutí [%]	Porovnání konců doby tuhnutí [%]
V2 – CEM I 42,5 R	8,00 °C	+290	+400	< 7	100	100
V3 – CEM I 42,5 R	16,5 °C	+220	+280	< 5	75,86	70,00
V4 – CEM I 42,5 R	31,0 °C	+160	+200		72,73	50,00
V5 – CEM I 42,5 R (plastifikátor)	8,00 °C	+250	+350	< 7	86,21	87,50

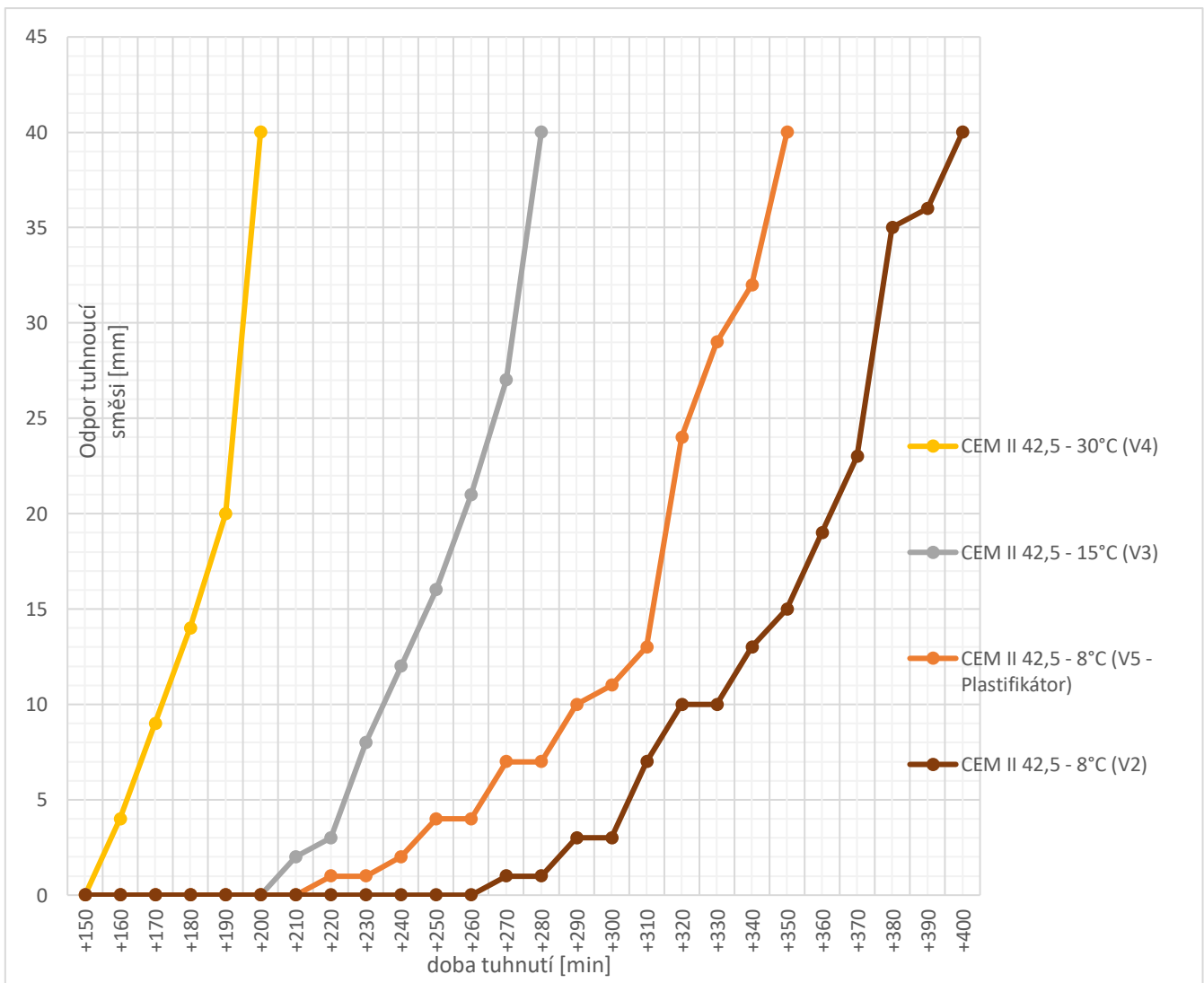
 $t_E$  - Doba tuhnutí

Pro srovnání naměřených hodnot z experimentu byly použity hodnoty z tabulky 7.7

Tabulka 7.7 – Průměrné doby tuhnutí podle typů cementu od zkušební laboratoře STACHEMA CZ s.r.o.

CEM I 42,5 R Radotín - období 12/19-05/20				
Počátek tuhnutí:	Ø (min)	201	max=239	min=174
Konec tuhnutí:	Ø (min)	289	max=326	min=251
CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R Čížkovice - období 07/19-12/19				
Počátek tuhnutí:	Ø (min)	176	max=225	min=152
Konec tuhnutí:	Ø (min)	x		
CEM I 42,5 R Radotín - období 12/19-05/20				
Počátek tuhnutí:	Ø (min)	196	max=229	min=173
Konec tuhnutí:	Ø (min)	278	max=315	min=249
CEM I 52,5 R (ra) Čížkovice - období 06/19-12/19				
Počátek tuhnutí:	Ø (min)	170	max=215	min=141
Konec tuhnutí:	Ø (min)	x		
CEM I 42,5 R Mokrý - období 01/20-06/20				
Počátek tuhnutí:	Ø (min)	196	max=220	min=165
Konec tuhnutí:	Ø (min)	263	max=286	min=225
CEM II/B-S 32,5 R Mokrý - období 01/20-06/20				
Počátek tuhnutí:	Ø (min)	234	max=260	min=213
Konec tuhnutí:	Ø (min)	306	max=333	min=275
CEM II/A-LL 42,5 R Hranice - období 03/20 - 08/20				
Počátek tuhnutí:	Ø (min)	158	max=188	min=136
Konec tuhnutí:	Ø (min)	x		
CEM I 42,5 R Hranice - období 10/19 - 03/20				
Počátek tuhnutí:	Ø (min)	163	max=312	min=136
Konec tuhnutí:	Ø (min)	x		

Graf č. 6 - Výsledné doby počátku a konce tuhnutí jednotlivých zkušebních vzorků z tab. 7.6



Z výsledných hodnot uvedených v grafu č. 6 lze pozorovat, že teplota značným způsobem ovlivňuje rychlost tuhnutí. Stejně tak je patrný i vliv urychlovače tuhnutí za působení stejné teploty, který nejen že zhruba o 10 % redukuje potřebu vody, ale zkrátí výslednou dobu tuhnutí stejné cementové směsi za stejných teplotních podmínek a to ze 400 na 350 minut. To je o 50 minut (13,5%) rychlejší proces tuhnutí.

V následujících tabulkách 7.8 až 7.12 jsou aplikovány výsledky experimentů pro určení rychlosti plnění bednění v závislosti na únosnosti bednicí konstrukce a konzistenci.



Tabulka 7.8 – rychlosti plnění bedně v závislosti na konzistenci betonové směsi pro únosnost bedně 40 kN/m<sup>2</sup>

Únosnost bednicí konstrukce	Typ cementu	Teplota prostředí / Vzorek	Konzistence [zk.rozlítím]	Rychlost plnění bedně [m/hod]
40 kN/m <sup>2</sup>	CEM II 42,5 R	30 °C (V4):	F1	3,8
		15 °C (V3):		2,76
		8 °C (V5 - plastifikátor):		2,55
		8 °C (V2):		2,36
		30 °C (V4):	F2	2,1
		15 °C (V3):		1,58
		8 °C (V5 - plastifikátor):		1,4
		8 °C (V2):		1,24
		30 °C (V4):	F3	1,57
		15 °C (V3):		1,2
		8 °C (V5 - plastifikátor):		1,02
		8 °C (V1):		0,87
		30 °C (V4):	F4	1,35
		15 °C (V3):		1,05
		8 °C (V5 - plastifikátor):		0,79
		8 °C (V2):		0,6
		30 °C (V4):	F5	1,36
		15 °C (V3):		0,23
		8 °C (V5 - plastifikátor):		-
		8 °C (V2):		-
		30 °C (V4):	F6	0,36
		15 °C (V3):		-
		8 °C (V5 - plastifikátor):		-
		8 °C (V2):		-

\* výsledky rychlostí ukládky betonové směsi lze interpolovat mezi tabulkami 7.8 – 7.12, ale pouze pro stejné konzistence!

\* v případě, že hodnota rychlosti plnění není vyplněna, tak byla překročena pro daný případ únosnost bedně.

Tabulka 7.9 – rychlosti plnění bedně v závislosti na konzistenci betonové směsi pro únosnost bedně 50 kN/m<sup>2</sup>

Únosnost bednicí konstrukce	Typ cementu	Teplota prostředí / Vzorek	Konzistence [zk.rozlítím]	Rychlost plnění bedně [m/hod]
50 kN/m <sup>2</sup>	CEM II 42,5 R	30 °C (V4):	F1	5,8
		15 °C (V3):		4,5
		8 °C (V5 - plastifikátor):		4,24
		8 °C (V2):		4
		30 °C (V4):	F2	3,1
		15 °C (V3):		2,45
		8 °C (V5 - plastifikátor):		2,23
		8 °C (V2):		2,03
		30 °C (V4):	F3	2,29
		15 °C (V3):		1,82
		8 °C (V5 - plastifikátor):		1,6
		8 °C (V2):		1,41
		30 °C (V4):	F4	1,94
		15 °C (V3):		1,56
		8 °C (V5 - plastifikátor):		1,24
		8 °C (V2):		1
		30 °C (V4):	F5	0,83
		15 °C (V3):		0,5
		8 °C (V5 - plastifikátor):		0,42
		8 °C (V2):		0,36
		30 °C (V4):	F6	0,66
		15 °C (V3):		0,39
		8 °C (V5 - plastifikátor):		0,33
		8 °C (V2):		0,28

\* výsledky rychlostí ukládky betonové směsi lze interpolovat mezi tabulkami 7.8 – 7.12, ale pouze pro stejné konzistence!

\* v případě, že hodnota rychlosti plnění není vyplněna, tak byla překročena pro daný případ únosnost bedně

Tabulka 7.10 – rychlosti plnění bedněni v závislosti na konzistenci betonové směsi pro únosnost bedněni 60 kN/m<sup>2</sup>

Únosnost bednicí konstrukce	Typ cementu	Teplota prostředí / Vzorek	Konzistence [zk.rozlítím]	Rychlost plnění bedněni [m/hod]
60 kN/m <sup>2</sup>	CEM II 42,5 R	30 °C (V4):	F1	7,8
		15 °C (V3):		6,23
		8 °C (V5 - plastifikátor):		5,93
		8 °C (V2):		5,64
		30 °C (V4):	F2	4,1
		15 °C (V3):		3,32
		8 °C (V5 - plastifikátor):		3,05
		8 °C (V2):		2,82
		30 °C (V4):	F3	3
		15 °C (V3):		2,24
		8 °C (V5 - plastifikátor):		2,17
		8 °C (V2):		1,94
		30 °C (V4):	F4	2,53
		15 °C (V3):		2,07
		8 °C (V5 - plastifikátor):		1,69
		8 °C (V2):		1,4
		30 °C (V4):	F5	1,17
		15 °C (V3):		0,77
		8 °C (V5 - plastifikátor):		0,64
		8 °C (V2):		0,55
		30 °C (V4):	F6	0,92
		15 °C (V3):		0,61
		8 °C (V5 - plastifikátor):		0,5
		8 °C (V2):		0,43

\* výsledky rychlostí ukládky betonové směsi lze interpolovat mezi tabulkami 7.8 – 7.12, ale pouze pro stejné konzistence!

\* v případě, že hodnota rychlosti plnění není vyplněna, tak byla překročena pro daný případ únosnost bedněni

Tabulka 7.11 – rychlosti plnění bedně v závislosti na konzistenci betonové směsi pro únosnost bedně 70 kN/m<sup>2</sup>

Únosnost bednicí konstrukce	Typ cementu	Teplota prostředí / Vzorek	Konzistence [zk.rozlítím]	Rychlost plnění bedně [m/hod]
70 kN/m <sup>2</sup>	CEM II 42,5 R	30 °C (V4):	F1	9,8
		15 °C (V3):		7,97
		8 °C (V5 - plastifikátor):		7,62
		8 °C (V2):		7,28
		30 °C (V4):	F2	5,1
		15 °C (V3):		4,19
		8 °C (V5 - plastifikátor):		3,88
		8 °C (V2):		3,6
		30 °C (V4):	F3	3,71
		15 °C (V3):		3,06
		8 °C (V5 - plastifikátor):		2,75
		8 °C (V2):		2,48
		30 °C (V4):	F4	3,12
		15 °C (V3):		2,58
		8 °C (V5 - plastifikátor):		2,14
		8 °C (V2):		1,8
		30 °C (V4):	F5	1,5
		15 °C (V3):		1,03
		8 °C (V5 - plastifikátor):		0,86
		8 °C (V2):		0,74
		30 °C (V4):	F6	1,18
		15 °C (V3):		0,82
		8 °C (V5 - plastifikátor):		0,68
		8 °C (V2):		0,58

\* výsledky rychlostí ukládky betonové směsi lze interpolovat mezi tabulkami 7.8 – 7.12, ale pouze pro stejné konzistence!

\* v případě, že hodnota rychlosti plnění není vyplněna, tak byla překročena pro daný případ únosnost bedně

Tabulka 7.12 – rychlosti plnění bedně v závislosti na konzistenci betonové směsi pro únosnost bedně 80 kN/m<sup>2</sup>

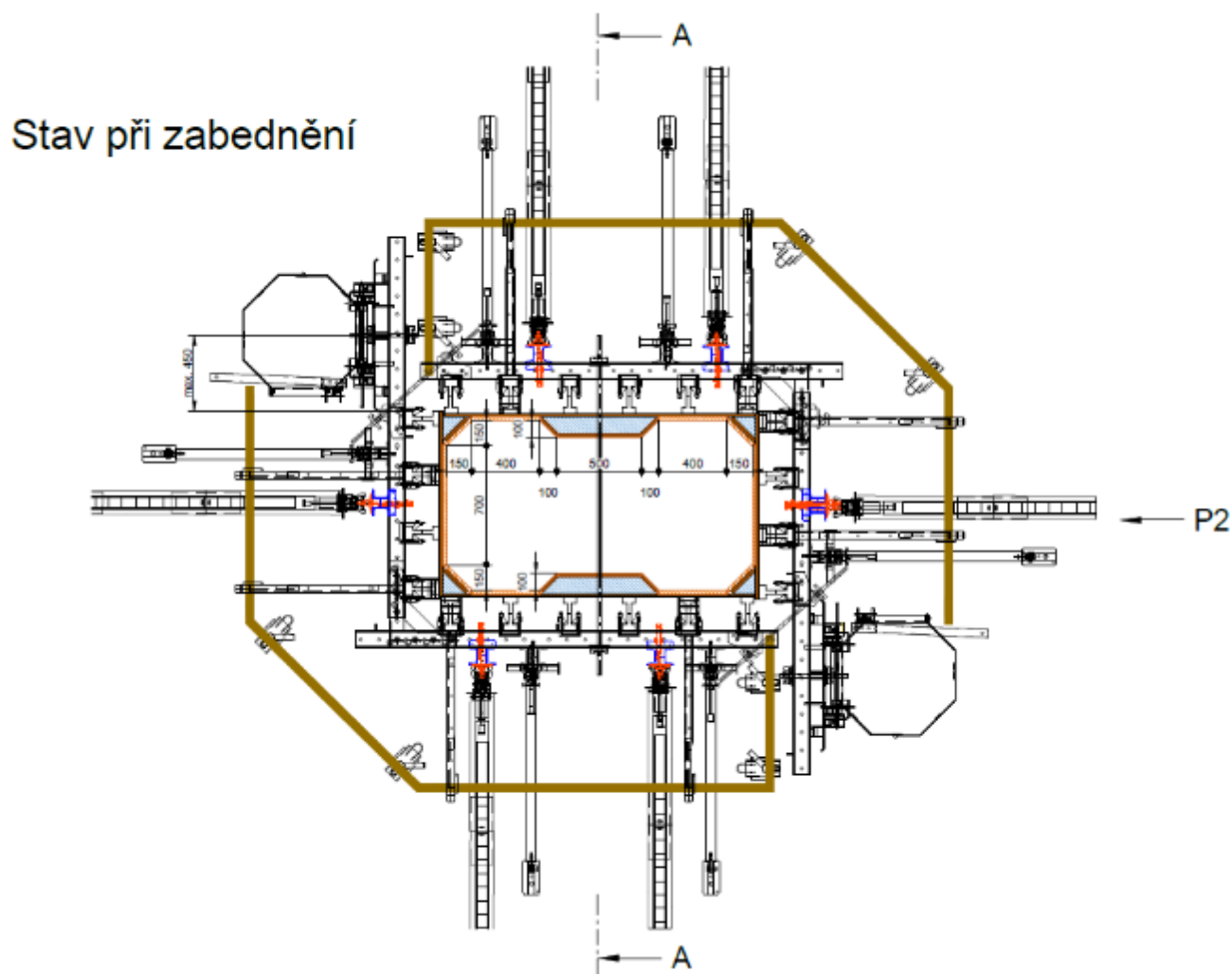
Únosnost bednicí konstrukce	Typ cementu	Teplota prostředí / Vzorek	Konzistence [zk.rozlítím]	Rychlost plnění bedně [m/hod]
80 kN/m <sup>2</sup>	CEM II 42,5 R	30 °C (V4):	F1	11,8
		15 °C (V3):		9,71
		8 °C (V5 - plastifikátor):		9,31
		8 °C (V2):		8,93
		30 °C (V4):	F2	6,1
		15 °C (V3):		5,06
		8 °C (V5 - plastifikátor):		4,71
		8 °C (V2):		4,39
		30 °C (V4):	F3	4,43
		15 °C (V3):		3,68
		8 °C (V5 - plastifikátor):		3,33
		8 °C (V2):		3,02
		30 °C (V4):	F4	3,71
		15 °C (V3):		3,09
		8 °C (V5 - plastifikátor):		2,59
		8 °C (V2):		2,2
		30 °C (V4):	F5	1,83
		15 °C (V3):		1,3
		8 °C (V5 - plastifikátor):		1,08
		8 °C (V2):		0,93
		30 °C (V4):	F6	1,45
		15 °C (V3):		1,03
		8 °C (V5 - plastifikátor):		0,86
		8 °C (V2):		0,73

\* výsledky rychlostí ukládky betonové směsi lze interpolovat mezi tabulkami 7.8 – 7.12, ale pouze pro stejné konzistence!

\* v případě, že hodnota rychlosti plnění není vyplněna, tak byla překročena pro daný případ únosnost bedně

## **Stanovení rychlosti plnění na bednicí konstrukci pilíře R6.(D6) Nové Strašecí – Řevničov.**

Z tabulky 7.6 jsme získali doby jednotlivých konců dob tuhnutí. Pro stanovení rychlosti plnění bednicí konstrukce potřebujeme znát její únosnost proti hydrostatickému tlaku. K tomu bude použit příklad realizované bednicí konstrukce pilíře, mostního objektu na dálnici D6. Betonáž probíhala v lednu za nízkých venkovních teplot průměrně o 8 °C, proto budou k porovnání použity vzorky V5 a V2, které byly na tuhnutí testovány za stejné teploty.



Obrázek 13 – Půdorys bednění pilíře mostního objektu

[Česká Doka bednicí technika spol. s.r.o. ]





*Obrázek 15 – Foto bednění pilíře (Česká Doka) mostního objektu a předchozího provedeného, již odbedněného mostního pilíře.*

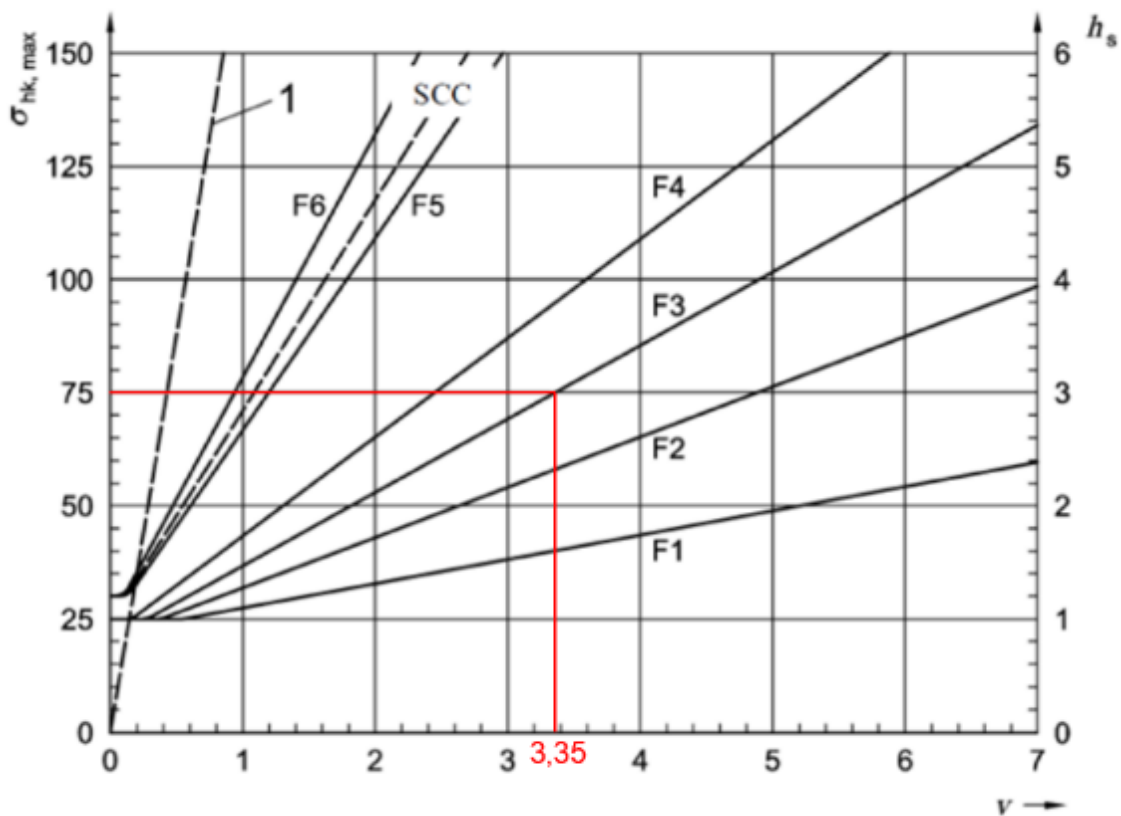
Únosnost 9 m vysokého, systémového bednění po dodatečném vyztužení byla stanovena dodavatelem bednicího systému na  $75 \text{ kN/m}^2$ . Třída použité konzistence byla použita F3.

Rychlost plnění bednění byla zvolena  $4 \text{ m}^3/\text{hod}$ . To je při půdorysné ploše bedněné konstrukce  $1,8 \text{ m}^2$  výsledná rychlost plnění 2,2 m.



Pro stanovení rychlosti plnění použijeme graf z kapitoly 3.3, konkrétně graf pro dobu tuhnutí 7 hodin, jelikož u vzorků V2 a V5, které byly testovány za stejné teploty jako probíhala betonáž pilíře, byla dle tab. 7.6 doba tuhnutí stanovena do 7 hodin.

Graf č. 7 - stanovení rychlosti plnění bedně v závislosti na maximální únosnosti bedně při tuhnutí betonové směsi  $t_E = 7$  hodin



$$t_E = 7 \text{ h}$$

$v =$  rychlost ukládání v m/h

$$\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$$

$h_s =$  maximální hydrostatická výška

U vzorku V2, při únosnosti bedně 75 kN/m<sup>2</sup> a konzistenci betonu F3, vychází rychlost plnění 3,35 m/hod. (6 m<sup>3</sup>/hod).

Při užití plastifikátoru, tedy vzorku V5 se teoreticky rychlost plnění zvýší na 3,65 m/hod. (6,5 m<sup>3</sup>/hod).

Z výsledných hodnot rychlosti plnění podle grafu č. 7 bylo provedeno cenové porovnání nákladů podle standardního ceníku za dodávku betonových směsí 2020. Jednotlivé náklady v souvislosti s rychlostí ukládky betonové směsi uvádí tabulka 7.13.

Tabulka 7.13 - Porovnání nákladů při rozdílných rychlostech plnění

Položka	Cena	mj	Stanová rychlost 4 m <sup>3</sup> /hod		rychlost 6 m <sup>3</sup> /hod (V2)		rychlost 6,5 m <sup>3</sup> /hod (V5)	
			počet mj	Cena	počet mj	Cena	počet mj	Cena
Beton čerpadlo M36	520	Kč/ 15 min	36,36	18 909,09 Kč	23,88	12 417,91 Kč	21,92	11 397,26 Kč
Přečerpané množství	35	Kč/ m <sup>3</sup>	20,00	700,00 Kč	20,00	700,00 Kč	20,00	700,00 Kč
Beton C30/37 XF2, XD1, XC3	2750	Kč/ m <sup>3</sup>	20,00	55 000,00 Kč	20,00	55 000,00 Kč	20,00	55 000,00 Kč
Doprava nad 5 m <sup>3</sup>	395	Kč/ m <sup>3</sup>	-		3,33	1 316,67 Kč	3,08	1 215,38 Kč
Doprava do 5 m <sup>3</sup>	1975	Kč/ m <sup>3</sup>	5,00	9 875,00 Kč	-		-	
Prostoj mixu	250	Kč/ 15 min	20,00	5 000,00 Kč	13,33	3 333,33 Kč	12,31	3 076,92 Kč
Zimní náklady zaměstnanci	110	Kč/ m <sup>3</sup>	20,00	2 200,00 Kč	20,00	2 200,00 Kč	20	2 200,00 Kč
	250	Kč/hod	25,00	6 250,00 Kč	16,67	4 166,67 Kč	15,38	3 846,15 Kč
Cena celkem pro 1x pilíř:				91 684,09 Kč		74 967,91 Kč		73 589,57 Kč
Cena pro 12x pilířů:				1 100 209,09 Kč		899 614,93 Kč		883 074,82 Kč
Úspora:						200 594,17 Kč		217 134,28 Kč

Rychlost plnění oproti variantě zvolené stavbou tedy 4 m<sup>3</sup> za hodinu, bylo možné navýšit na 6 m<sup>3</sup> za hodinu. Za použití plastifikátoru na 6,5 m<sup>3</sup> za hodinu. Z cenového porovnání je patrný finanční rozdíl nákladů mezi rychlostí 4 m<sup>3</sup>/hod a vzorkem V2 6 m<sup>3</sup>/hod 16 716,18 Kč.

V tomto konkrétním případě bylo identickou betonovou formou zhotoveno 12 kusů betonových pilířů. Celkové finanční úspory při navýšení rychlosti u vzorku V2 jsou 200 594,17 Kč a u vzorku V5 - 217 134,28 Kč.

Existují mosty, kde v některých případech může být i 72 ks mostních pilířů a v těchto případech může zrychlení betonáže o 1 m za hodinu vést k finanční úspoře i v řádech milionů korun.

## **7.2 Zkoušky pevnosti betonu, průsaku a CHRL**

V rámci betonáže mostního pilíře bylo odebráno 8 ks zkušebních těles pro stanovení vývoje pevnosti v tlaku po 6 dnech a 28 denní pevnosti na tlak. Zkouška průsaku a odolnost proti promrzání a chemickým vlivům.



*Obrázek 16 – část odebraných vzorků na zkoušky pevnosti a odolnosti*



*Obrázek 17 – zkouška pevnosti tělesa v tlaku*

**Zpráva o zkouškách vlastností betonu:**

Stavba: D6 – Nové Strašecí – Řevničov

Objekt: SO 1 201

Konstrukce: Pilíř P3 – Levý most

Místo výroby těles: stavba

Třída betonu: C30/37 XF2, XD1, XC3

Označení receptury: 60961643/378446

Výrobna: ČMB – Kladno

**Charakteristika zkoušky:**

Zkouška provedena podle:

ČSN EN 12350-1 Zkoušení čerstvého betonu – Část 1: Odběr vzorků

ČSN EN 12350-2 Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím

ČSN EN 12350-6 Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost

ČSN EN 12350-7 Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody

Druh vzorku: lokální Metoda hutnění vzorku: propichovací tyčí

Datum: 6.12.2019 Metoda a postup zk.: tlakoměrná

Zkušební zařízení: Abramsův kužel, svinovací metr, zařízení na měření vzduchu čerstvého betonu, nádoba na objemovou hmotnost čerstvé směsi, váhy Mettler (35 000/5g)

Tabulka 7.14 – Záznam o odběru zkušebních těles a výsledcích zkoušky

Číslo odběru	SPZ auta	Číslo dodacího listu	Čas odběru	Konzistence (mm)	obsah vzduchu (%)	teplota čerstvého betonu (°C)	způsob sednutí	objemová hmotnost (kg.m <sup>-3</sup> )	počet vyrobených zkušebních těles
1	2S9 2502	83506505	10:00	160	4,2	9,6	Správně	2320	1 x krychle 150 mm (tlak)
2	3SB 6858	83506513	11:15	170	4,0	10,9	Správně	2320	3 x krychle 150 mm (3x tlak)
3	4AS 2744	83506517	13:00	170	4,1	14,5	Správně	2340	2 x krychle 150 mm (2x tlak)
4	2S9 2502	83506525	14:50	160	6,0	13,8	Správně	2300	1 x krychle 150 mm (1x hl. průsaku)
5	4AS 2744	83506528	17:00	170	4,2	14,1	Správně	2310	1 x válec Ø 150 mm (1 x CHRL)
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Zpráva o zkoušce pevnosti v tlaku na betonových krychlích:**

Stavba:	D6 – Nové Strašecí – Řevničov		
Objekt:	SO 1 201		
Konstrukce:	Pilíř P3 – Levý most		
Místo výroby těles:	stavba	Datum zhotovení těles:	6.12.2019
Účel zkoušky:	kontrolní	Dodání do zkušebny:	7.12.2019
Označení těles:	6/12/0	Počet zk. těles:	1 krychle

**Charakteristika vzorkování:**

Vzorkování bylo provedeno postupem dle ČSN EN 12350 – 1

**Charakteristika zkoušeného betonu:**

Tř. betonu:	C30/37 XF2, XD1, XC3	Konzistence čerst. betonu:	230 mm s.k
Ozn. receptury:	60961643/378446	Obsah vzduchu:	4,2 %
Výrobna:	ČMB – Kladno	Způsob hutnění:	propichování

**Charakteristika zkoušky:**

Zkouška provedena podle:

ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu- Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles

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

Datum zkoušky: 12.12.2019

Stav povrchu při zkoušení: nasycené vodou Stáří těles: 6 dnů

Úprava povrchu tlačných ploch: bez úprav

*Tabulka 7.15 – Zkouška pevnosti těles v tlaku (šesti denní)*

Číslo vzorku	hmotnost (kg)	Výška (mm)	šířka (mm)	Délka (mm)	objemová hmotnost (kg.m <sup>-3</sup> )	Tlačená plocha (mm <sup>2</sup> )	max. dosažená síla (kN)	pevnost v tlaku jednotlivě (Mpa)	Pevnost v tlaku průměrná (MPa)
1	7,900	150	150	150	2330	22650	899	39,7	39,7
2	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	-	-	-	-	-	-	-	-	

Prohlášení: Zkouška provedena v souladu s normou ČSN EN 12390-3

**Zhodnocení: Krychelná pevnost betonu v tlaku po 6 dnech je 39,7 MPa**

**Zpráva o zkoušce pevnosti v tlaku na betonových krychlich:**

Stavba:	D6 – Nové Strašecí – Řevničov		
Objekt:	SO 1 201		
Konstrukce:	Pilíř P3 – Levý most		
Místo výroby těles:	stavba	Datum zhotovení těles:	6.12.2019
Účel zkoušky:	kontrolní	Dodání do zkušebny:	7.12.2019
Označení těles:	6/12/2	Počet zk. těles:	3 krychle

**Charakteristika vzorkování:**

Vzorkování bylo provedeno postupem dle ČSN EN 12350 – 1

**Charakteristika zkoušeného betonu:**

Tř. betonu:	C30/37 XF2, XD1, XC3	Konzistence čerst. betonu:	170 mm s.k
Ozn. receptury:	60961643/378446	Obsah vzduchu:	4,0 %
Výrobna:	ČMB – Kladno	Způsob hutnění:	propichování

**Charakteristika zkoušky:**

Zkouška provedena podle:

ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu- Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles

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

Datum zkoušky: 3.1.2020

Stav povrchu při zkoušení: nasycené vodou Stáří těles: 28 dnů

Úprava povrchu tlačných ploch: bez úprav

*Tabulka 7.16 – Zkouška pevnosti těles v tlaku (28 denní)*

Číslo vzorku	hmotnost (kg)	Výška (mm)	šířka (mm)	Délka (mm)	objemová hmotnost (kg.m <sup>-3</sup> )	Tlačná plocha (mm <sup>2</sup> )	max. dosažená síla (kN)	pevnost v tlaku jednotlivě (Mpa)	Pevnost v tlaku průměrná (MPa)
1	7,940	150	150	150	2340	22650	1051	39,7	48,6
2	8,010	150	150	150	2360	22650	1141	50,4	
3	7,940	150	150	150	2340	22650	1111	49,1	

Prohlášení: Zkouška provedena v souladu s normou ČSN EN 12390-3

**Zhodnocení: Krychelná pevnost betonu v tlaku po 6 dnech je 48,6 MPa**

**Zpráva o zkoušce pevnosti v tlaku na betonových krychlích:**

Stavba:	D6 – Nové Strašecí – Řevničov		
Objekt:	SO 1 201		
Konstrukce:	Pilíř P3 – Levý most		
Místo výroby těles:	stavba	Datum zhotovení těles:	6.12.2019
Účel zkoušky:	kontrolní	Dodání do zkušebny:	7.12.2019
Označení těles:	6/12/3	Počet zk. těles:	3 krychle

**Charakteristika vzorkování:**

Vzorkování bylo provedeno postupem dle ČSN EN 12350 – 1

**Charakteristika zkoušeného betonu:**

Tř. betonu:	C30/37 XF2, XD1, XC3	Konzistence čerst. betonu:	170 mm s.k
Ozn. receptury:	60961643/378446	Obsah vzduchu:	4,1 %
Výrobna:	ČMB – Kladno	Způsob hutnění:	propichování

**Charakteristika zkoušky:**

Zkouška provedena podle:

ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu- Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles

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

Datum zkoušky: 3.1.2020

Stav povrchu při zkoušení: nasycené vodou Stáří těles: 28 dnů

Úprava povrchu tlačných ploch: bez úprav

*Tabulka 7.17 – Zkouška pevnosti těles v tlaku (28 denní)*

Číslo vzorku	hmotnost (kg)	Výška (mm)	šířka (mm)	Délka (mm)	objemová hmotnost (kg.m <sup>-3</sup> )	Tlačná plocha (mm <sup>2</sup> )	max. dosažená síla (kN)	pevnost v tlaku jednotlivě (Mpa)	Pevnost v tlaku průměrná (MPa)
1	8,060	150	150	150	2370	22650	991	43,8	43,4
2	7,930	150	150	150	2330	22650	971	43,0	
3	-	-	-	-	-	-	-	-	

Prohlášení: Zkouška provedena v souladu s normou ČSN EN 12390-3

**Zhodnocení: Krychelná pevnost betonu v tlaku po 6 dnech je 43,4 MPa**

**Zpráva o zkoušce průsaku tlakové vody ve ztvrdlém betonu:**

Stavba:	D6 – Nové Strašecí – Řevničov		
Objekt:	SO 1 201		
Konstrukce:	Pilíř P3 – Levý most		
Místo výroby těles:	stavba	Datum zhotovení těles:	6.12.2019
Účel zkoušky:	kontrolní	Dodání do zkušebny:	7.12.2019
Označení těles:	6/12/4	Počet zk. těles:	1 krychle

**Charakteristika vzorkování:**

Vzorkování bylo provedeno postupem dle ČSN EN 12350 – 1

**Charakteristika zkoušeného betonu:**

Tř. betonu:	C30/37 XF2, XD1, XC3	Konzistence čerst. betonu:	160 mm s.k
Ozn. receptury:	60961643/378446	Obsah vzduchu:	6,0 %
Výrobna:	ČMB – Kladno	Způsob hutnění:	propichování

**Charakteristika zkoušky:**

Zkouška provedena podle:

ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu- Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles

Datum zkoušky: 3.1.2020

Maximální tlak vody: 0,5 MPa      Stáří těles: 28 dnů

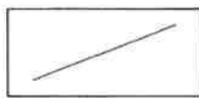
Prosak povrchem:      žádný      Směr působení vody: na boční část zkušebního tělesa

*Tabulka 7.18 – Zkouška průsaku tlakové vody na ztvrdlý beton*

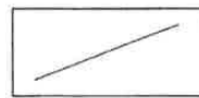
Číslo vzorku	hmotnost (kg)	Výška (mm)	šířka (mm)	Délka (mm)	objemová hmotnost (kg.m <sup>-3</sup> )	hodnota průsaku (mm)	Max. hodnota průsaku (mm)
1	7,840	150	150	150	2320	34	34
2	-	-	-	-	-	-	
3	-	-	-	-	-	-	



vzorek č. 1



vzorek č. 2



vzorek č. 3

Prohlášení: Zkouška provedena v souladu s normou ČSN EN 12390-8

**Zhodnocení: Zkouškou byla stanovena maximální hloubka průsaku 34 mm.**



**Zpráva o zkoušce odolnosti povrchu cementového betonu automatickou metodou (metoda C) – automatické cyklování**

Stavba:	D6 – Nové Strašecí – Řevničov		
Objekt:	SO 1 201		
Konstrukce:	Pilíř P3 – Levý most		
Místo výroby těles:	stavba	Datum zhotovení těles:	6.12.2019
Účel zkoušky:	kontrolní	Dodání do zkušebny:	8.12.2019
Označení těles:	6/12/5	Počet zk. těles:	1 válec

**Charakteristika vzorkování:**

Vzorkování bylo provedeno postupem dle ČSN EN 12350 – 1

**Charakteristika zkoušeného betonu:**

Tř. betonu:	C30/37 XF2, XD1, XC3	Konzistence čerst. betonu:	170 mm s.k
Ozn. receptury:	60961643/378446	Obsah vzduchu:	4,2 %
Výrobna:	ČMB – Kladno	Způsob hutnění:	propichování

**Charakteristika zkoušky:**

Zkouška provedena podle:	ČSN 73 1326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (metoda C – II)
Počet cyklů:	75
Zahájení zkoušky:	3.1.2020
Ukončení zkoušky:	26.1.2020

Zkušební zařízení: automatické mrazící zařízení, teplotní čidla, váhy, teploměr, laboratorní sušárna, vysoušecí misky, stříčky

Tabulka 7.19 – Zkouška odolnosti povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Vzorek číslo		1	2	3	průměr	
rozměry vzorků:	průměr [mm]	150	-	-	150	
	výška [mm]	50	-	-	50	
plocha zkušebních vzorků:		[m <sup>2</sup> ]	0,018	-	-	0,018
objem zkušebních vzorků:		[m <sup>3</sup> ]	0,001	-	-	0,001
hmotnost s přirozenou vlhkostí:		[kg]	2,04	-	-	2,04
odpad po cyklech na vzorku: (g)	25	2,8	-	-	2,8	
	50	5,3	-	-	5,3	
	75	7,7	-	-	7,7	
	100	-	-	-	-	
	125	-	-	-	-	
	150	-	-	-	-	
odpad po cyklech na vzorku : g.m <sup>-2</sup>	25	158,4	-	-	158,4	
	50	299,9	-	-	299,9	
	75	435,7	-	-	435,7	
	100	-	-	-	-	
	125	-	-	-	-	
	150	-	-	-	-	

Vyhodnocení zkoušky:

Průměrný odpad po provedení 75 cyklů byl stanoven na 373,5 g.m<sup>-2</sup>.

## **Závěr:**

Hlavním cílem teoretické části diplomové práce bylo seznámit čtenáře se složením betonu a prvky, které ovlivňují jeho tuhnutí se zaměřením převážně na cement a popis vývoje hydrostatického tlaku v závislosti na výšce a rychlosti tuhnutí betonové směsi.

Dále byla zevrubně popsána metoda zkoušení tuhnutí cementu s užitím Vicatova přístroje, s jehož pomocí byla provedena experimentální část, tedy laboratorní testy a byl zkoumán výsledný vliv teplot a plastifikačních přísad na dobu tuhnutí cementové směsi s označením Cem I 42,5 R – Radotín.

Z výsledných hodnot byl potvrzen vysoký vliv teploty na rychlost tuhnutí. Na identické cementové směsi za působení stejných podmínek s účinky urychlovače tuhnutí bylo vyhodnocené 13,5 % urychlení doby tuhnutí oproti směsi bez účinků urychlovacích přísad.

Na teoretickém příkladu byly určeny rychlosti plnění za aplikace výsledných hodnot z experimentu a při daném maximálním zatížení bednicí formy. V následující experimentální části bylo provedeno porovnání s praxí a posouzení, zda stanovená rychlost plnění při realizaci pilíře na stavbě mostního objektu D6. Nové Strašecí – Řevničov odpovídá naměřeným poznatkům z experimentu. Na daném případě mostního pilíře bylo také zalkulováno, do jaké míry může rychlost plnění ovlivnit stavební náklady provozu stavby.

**Seznam literatury a informačních zdrojů:**

- [1] Příručka technologa – Beton: Suroviny – Výroba – Vlastnosti 2005, ID 117911, Českomoravský beton, a.s.
- [2] Technologie Staveb I, Doc. Ing. Karel Dočkal, CSc., Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. Brno, 2005.
- [3] ČSN EN 13670(73 2400) – Provádění betonových konstrukcí, Český normalizační institut, 2010.
- [4] ČSN EN 934-2 – Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem, Český normalizační institut, 2010.
- [5] ČSN EN 196-3 Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti, Český normalizační institut, 2017.
- [6] ČSN 73 0042 – Tlaky čerstvého betonu na svislé konstrukce bedně, Český normalizační institut, 2012.
- [7] ČSN EN 12390-1 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební těla a formy, Český Úřad pro technickou normalizaci, 2013.
- [8] ČSN EN 12390-2 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti, Česká agentura pro standardizaci 2020.
- [9] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část: Pevnost v tlaku zkušebních těles, Česká agentura pro standardizaci 2020.
- [10] ČSN EN 12390-3 Zkoušení betonových konstrukcí – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem, Česká agentura pro standardizaci 2020.
- [11] ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou, Česká agentura pro standardizaci 2020.

## **Seznam použitého software:**

- Microsoft Office Word 2016
- Microsoft Office Excel 2016

**Seznam tabulek:**

Tabulka 1.2 –	Stupně vlivu prostředí	16
Tabulka 1.2.2 –	Mezní hodnoty pro stupně chemického působení rostlé zeminy a podzemní vody	18
Tabulka 1.2.3 –	Určení konzistence podle rozlití kužele	19
Tabulka 1.2.4 –	Určení konzistence podle sednutí kužele	20
Tabulka 1.2.5 –	Určení konzistence samozhutnitelného betonu podle rozlití kužele	21
Tabulka 1.2.6 –	Klasifikace přeformování Vebe	21
Tabulka 1.2.7 –	Klasifikace přeformování Vebe	22
Tabulka 1.2.8 –	Pevnostní třídy betonu	23
Tabulka 1.2.9 –	Porovnání pevností podle ČSN EN 206-1 a ČSN 73 2400-	23
Tabulka 1.2.10 –	Fyzikální a mechanické vlastnosti betonu	24
Tabulka 1.3.1 –	Použitelnost typů vod do betonu	26
Tabulka 1.3.2 –	Popis charakteru tuhnutí betonu	27
Tabulka 2.2.1 –	Popis charakteru tuhnutí betonu	34
Tabulka 3.3.1 –	Charakteristické hodnoty maximálního vodorovného tlaku čerstvého betonu (beton se ukládá proti směru výstavby)	39
Tabulka 3.3.2 –	Součinitelé způsobu tuhnutí K1	40
Tabulka 4.4.1 –	Technologické přestávky pro odbedňování podle DIN 1045	50
Tabulka 5.2.1 –	Maximální doba dopravy čerstvého betonu na stavbu	51
Tabulka 5.4.1 –	Doba ošetřování betonu	55
Tabulka 5.5 –	Doporučená složení betonu pro vývoj pevnosti betonu	55
Tabulka 5.5.3 –	Průběh nárůstu pevnosti betonu při 20°C	56
Tabulka 5.5.4 –	Doporučená doba zpracování betonu při vyšších teplotách v minutách	58
Tabulka 5.5.5 –	Vliv jednotlivých složek a celkovou teplotu betonu	59
Tabulka 5.5.6 –	Procentuální vývoj pevnosti betonu v 28 denní pevnosti	59
Tabulka 6.1.1 –	Vliv stáří betonu na jeho pevnosti (%) ve dnech.	61
Tabulka 7.1 –	Jednotlivých měření odporu směsi V1.	66
Tabulka 7.2 –	Jednotlivých měření odporu směsi V2.	67
Tabulka 7.3 –	Přehled jednotlivých měření odporu směsi V3.	68

Tabulka 7.4 –	Přehled jednotlivých měření odporu směsi V4.	69
Tabulka 7.5 –	Přehled jednotlivých měření odporu směsi V5.	70
Tabulka 7.6 –	Výsledné doby počátku a konce tuhnutí jednotlivých vzorků.	71
Tabulka 7.7 –	Průměrné doby tuhnutí podle typů cementu od zkušební laboratoře STACHEMA CZ s.r.o.	71
Tabulka 7.8 –	Rychlosti plnění bedně v závislosti na konzistenci betonové směsi pro únosnost bedně 40 kN/m <sup>2</sup>	73
Tabulka 7.9 –	Rychlosti plnění bedně v závislosti na konzistenci betonové směsi pro únosnost bedně 50 kN/m <sup>2</sup>	74
Tabulka 7.10 –	Rychlosti plnění bedně v závislosti na konzistenci betonové směsi pro únosnost bedně 60 kN/m <sup>2</sup>	75
Tabulka 7.11 –	Rychlosti plnění bedně v závislosti na konzistenci betonové směsi pro únosnost bedně 70 kN/m <sup>2</sup>	76
Tabulka 7.12 –	Rychlosti plnění bedně v závislosti na konzistenci betonové směsi pro únosnost bedně 80 kN/m <sup>2</sup>	77
Tabulka 7.13 –	Porovnání nákladů při rozdílných rychlostech plnění	82
Tabulka 7.14 –	Záznam o odběru zkušebních těles a výsledcích zkoušky	84
Tabulka 7.15 –	Zkouška pevnosti těles v tlaku (šesti denní)	85
Tabulka 7.16 –	Zkouška pevnosti těles v tlaku (28 denní)	86
Tabulka 7.17 –	Zkouška pevnosti těles v tlaku (28 denní)	87
Tabulka 7.18 –	Zkouška průsaku tlakové vody na ztvrdlý beton	88

**Seznam obrázků:**

Obrázek 1 – Zkušební postup rozliti kužele	19
Obrázek 2 – Sednutí kužele, značení S = Slumptest	20
Obrázek 3 – Rozliti kužele samozhutnitelný beton, značení SF = Slump-flow	20
Obrázek 4 – Přeformování Vebe, V = Vebe test	21
Obrázek. 5 – Přeformování Vebe, V = Vebe test	22
Obrázek 6 – Rozdělení tlaku čerstvého betonu po výšce bedněni	29
Obrázek 7 – Vicatův přístroj	31
Obrázek 8 – Vlevo jehla Vicatova přístroje s nástavcem pro stanovení konce tuhnutí. Vpravo jehla Vicatova přístroje pro stanovení doby počátku tuhnutí	32
Obrázek 9 – Rozdělení tlaku čerstvého betonu po výšce bedněni	35
Obrázek 10 – Diagram spojitého nerovnoměrného zatížení při betonování podle Ertinghausena vs normový vodorovný tlak.	36
Obrázek 11 – Odpařování vody z povrchu betonu	54
Obrázek 12 – Proteplování betonu	56
Obrázek 13 – Zkušební aparatura, Vicatův přístroj s nástavci (jehla, váleček), teploměrem a ztvrdlým zkušebním vzorkem	65
Obrázek 13 – Půdorys bedněni pilíře mostního objektu	78
Obrázek 14 – Pohled P2 bedněni pilíře mostního objektu	79
Obrázek 15 – Foto bedněni pilíře mostního objektu a předchozího provedeného, již odbedněného mostního pilíře.	80
Obrázek 16 – Část odebraných vzorků na zkoušky pevnosti a odolnosti	83
Obrázek 17 – Zkouška pevnosti tělesa v tlaku	83



**Seznam grafů:**

Graf č. 1 –	Pro stanovení tlaku čerstvého betonu $\sigma_{hk,max}$ v závislosti na rychlosti plnění bedně a pro třídy konzistence v době ztuhnutí $t_E = 5$ hodin	40
Graf č. 2 –	Pro stanovení tlaku čerstvého betonu $\sigma_{hk,max}$ v závislosti na rychlosti plnění bedně a pro třídy konzistence v době ztuhnutí $t_E = 7$ hodin	41
Graf č. 3 –	Pro stanovení tlaku čerstvého betonu $\sigma_{hk,max}$ v závislosti na rychlosti plnění bedně a pro třídy konzistence v době ztuhnutí $t_E = 10$ hodin	42
Graf č. 4 –	Pro stanovení tlaku čerstvého betonu $\sigma_{hk,max}$ v závislosti na rychlosti plnění bedně a pro třídy konzistence v době ztuhnutí $t_E = 15$ hodin	43
Graf č. 5 –	Pro stanovení tlaku čerstvého betonu $\sigma_{hk,max}$ v závislosti na rychlosti plnění bedně a pro třídy konzistence v době ztuhnutí $t_E = 20$ hodin	44
Graf č. 6 –	Výsledné doby počátku a konce tuhnutí jednotlivých vzorků	72
Graf č. 7 –	Stanovení rychlosti plnění bedně v závislosti na maximální únosnosti bedně při tuhnutí betonové směsi $t_E = 7$ hodin	81

**Seznam použitých symbolů a zkratk:**

$t_E$	Doba tuhnutí
$t_{E,knead}$	Časový interval v minutách od přidání vody do betonové směsi
$\varepsilon$	Smrštění
$E$	Modul pružnosti
$V/C$	Vodní součinitel ku poměru cementu
$A$	Plocha
$\gamma_F$	Násobek hydrostatického tlaku čerstvého betonu
$\sigma_{hk,max}$	Charakteristická hodnota vodorovného tlaku od čerstvého betonu
$\sigma_{hd,max}$	Návrhová hodnota vodorovného tlaku od čerstvého betonu
$\sigma_h$	Vodorovný tlak od čerstvého betonu
$h_E$	Výška betonu při ukončení doby tuhnutí $t_E$
$h_s$	Hydrostatická výška
$v$	Rychlost ukládání
$f_c$	Pevnost v tlaku
s.k.	Sednutí kužele