

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

VLIV DRUHU A DÁVKY ROZPTÝLENÉ VÝZTUŽE NA VYBRANÉ VLASTNOSTI BETONU

EFFECT OF TYPE AND DOSE OF SCATTERED REINFORCEMENT ON SELECTED PROPERTIES OF
CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUCIE ŽÁČKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROMÍR LÁNÍK

BRNO 2013

ZADÁNÍ

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na výzkum vlivu množství a typu rozptýlené výztuže v referenčním betonu na fyzikálně mechanické parametry výsledného kompozitu. Mezi zkoumané vlastnosti kompozitu patří pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a v příčném tahu, statický modul pružnosti v tlaku, dynamický modul pružnosti určený pomocí NDT zkoušek. Referenční betonová směs je certifikovaná jako konstrukční beton dané třídy, která se běžně používá na stavbách.

Abstract

The Master's thesis is focused on the research influence the dose and type of scattered reinforcement in a reference concrete on physical and mechanical properties of the resulting composite. The investigated properties of composite belongs compressive strength, tensile strength in the flexural and tensile strength in the transverse, static modulus of elasticity in compressive strength, dynamic modulus of elasticity determined using NDT tests. The reference concrete mixture is certified as structural concrete of the class, which is commonly used on construction sites.

Klíčová slova

Vláknobeton, pevnost, modul pružnosti, kamenivo, čtyřbodový ohyb, TP FC 1-1

Keywords

Fibre concrete, strenght, modulus of elasticity, gravel, four-point bending, TP FC 1-1

Bibliografická citace VŠKP

ŽÁČKOVÁ, Lucie Bc. *Vliv druhu a dávky rozptýlené výztuže na vybrané vlastnosti betonu: diplomová práce*. Brno, 2013. 118s., 18 s. příl. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce: Ing. Jaromír Láník

Prohlašuji, že jsem celou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Jaromíra Láníka s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 5. ledna 2013

.....

Lucie Žáčková

Děkuji vedoucímu práce Ing. Jaromírovi Láníkovi za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval v průběhu tvorby celé diplomové práce. Další díky patří zaměstnancům firmy Cemex s.r.o. za pomoc při výrobě zkušebních těles a poskytnutí technického zázemí.

OBSAH

ÚVOD.....	8
TEORETICKÁ ČÁST	10
1 SLOŽKY BETONU.....	10
1.1 CEMENT.....	10
1.2 KAMENIVO	11
1.3 VODA.....	13
1.4 PŘÍSADY	13
1.5 PŘÍMĚSI	17
2 DRÁTKOBETONOVÁ SMĚS A JEJÍ SLOŽKY	19
2.1 POŽADAVKY NA KAMENIVO.....	19
2.2 POŽADAVKY NA VODU, CEMENT A PŘÍSADY	19
2.3 POUŽÍVANÁ VLÁKNA	20
2.4 OBJEMOVÝ STUPEŇ ZTUŽENÍ	22
2.5 VÝROBA VLÁKNOBETONU	23
2.6 MOŽNOSTI VYUŽITÍ.....	24
2.7 POROVNÁNÍ PROSTÉHO BETONU S VLÁKNOBETONEM	25
2.8 KOROZE OCELI V BETONU	26
3 ZKOUŠENÍ KONSTRUKČNÍHO VLÁKNOBETONU.....	27
3.1 ZKOUŠKY ČERSTVÉHO VLÁKNOBETONU	27
3.2 KONTROLA MNOŽSTVÍ VLÁKEN	27
3.3 ZKOUŠKY ZTVRDLÉHO VLÁKNOBETONU	28
CÍLE PRÁCE	31
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
1 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE.....	32
2 POUŽITÉ SUROVINY.....	34
2.1 CEMENT.....	34
2.2 KAMENIVO	34
2.3 POPÍLEK.....	35
2.4 DRÁTKY.....	36
2.5 KARI síť	36
3 POUŽITÉ RECEPTURY	37
4 ZKOUŠENÍ ČERSTVÉHO BETONU	38
4.1 ZKOUŠKA ROZLITÍM.....	38

4.2	ZKOUŠKA SEDNUTÍ KUŽELE (ABRAMSŮV KUŽEL)	39
4.3	STANOVENÍ OBSAHU VZDUCHU – TLAKOVÁ METODA	40
5	PEVNOST V TLAKU	41
6	PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU	45
7	HRANOLOVÁ PEVNOST	48
8	DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI	50
8.1	VŠEOBECNÉ ÚDAJE	50
8.2	METODIKA ZKOUŠEK	50
9	DYNAMICKÝ POISSONŮV KOEFICIENT	53
10	STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI V TLAKU	54
11	PEVNOST V TAHU OHYBEM	56
11.1	PRACOVNÍ POSTUP	56
11.2	VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH SAD	58
11.3	SPECIFICKÁ LOMOVÁ ENERGIE	84
11.4	POROVNÁNÍ PEVNOSTÍ V TAHU ZA OHYBU	85
11.5	OZNAČOVÁNÍ TŘÍD VLÁKNOBETONU DLE TP FC 1 – 1	86
12	VYHODNOCENÍ TRÁMCŮ S KARI SÍTÍ	87
	STATICKÁ ČÁST	90
1	DIAGRAMY ODOLNOSTI NORMOVÝCH ZKUŠEBNÍCH TRÁMKŮ	90
2	VYHODNOCENÍ CHAR. DIAGRAMU ODOLNOSTI $(F_R - \Delta_T)_K$	94
3	ODVOZENÍ CHARAKTERISTICKÉHO PRACOVNÍHO DIAGRAMU VLÁKNOBETONU	100
	EKONOMICKÉ ZOHLEDNĚNÍ	102
	ZÁVĚR	103
	POUŽITÁ LITERATURA	105
	POUŽITÉ NORMY	106
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	108
	SEZNAM OBRÁZKŮ	111
	SEZNAM TABULEK	112
	SEZNAM GRAFŮ	115
	SEZNAM PŘÍLOH	118

ÚVOD

Historie betonu sahá až 3600 let př. n. l., kdy se v Egyptě stavěly sloupy z umělého kamene. Z tohoto hlediska lze hledat předchůdce všech nám dnes známých vláken užitých ve vláknobetonových směsích již asi 3000 let př. n. l. u starověkých Sumerů, kteří jako vodoodpudivý materiál používali asfalt ve směsi s hlínou a slámou.

V době 1000 př. n. l. stavěli Fénicičané v Jeruzalémě velké vodní cisterny a přivaděče na bázi hydraulických pojiv, předchůdce cementu, lze jim tak připisovat objev hydraulických vlastností směsí vápna a sopečného tufu.

Ve druhém století př. n. l. navazovali Řekové právě na znalosti Fénicičanů a začali používat novou zdící techniku, kdy byly masivní zdi tvořeny dvěma lícovými stěnami z tesaného kamene, různě široká mezera mezi nimi pak byla vyplňována litou maltou, prokládanou lomovým kamenem. Tento druh zdiva, Řeky nazývaný emplekton, de facto zavedl systém ztraceného bednění. I staří Římané považovaní za velmi zdatné stavitele používali k vyztužování malt mnoho organických látek, běžně dostupných z přírodních zdrojů. Zde však tyto látky sloužily však spíše k regulaci vlastností stavebních materiálů, můžeme se o nich dočíst v proslulé encyklopedii *De architectura libri X* Marca Vitruvia Pollia, Caesarova vojenského stavitele, z prvního století př. n. l. Jednalo se zejména o materiály s pucolánovými či hydraulickými vlastnostmi.

Převzali od Řeků emplekton, dále jej propracovali a rozvinuli a nazývali jej caementum. Ač tento termín mnohokrát změnil svůj významový smysl, dnes názvem cement označujeme novodobá hydraulická pojiva.

V Asii se dále používaly boby, květiny, dužiny z ovoce, různé druhy listů a jiné vláknité rostlinné materiály či zvířecí chlupy, zejména koňské nebo kozí.

Ve středověku došlo naopak k velkému úpadku používání pojiv a výztuží, které se začali znovu užívat teprve ve 12. století. Jednalo se zde zejména o slámu, piliny a dále již zmiňovaná zvířecí chlupy.

Počátky moderního betonu jsou spjaty s poznáním technologie výroby hydraulických pojiv, zejména cementu. V roce 1824 získal britský zedník Joseph Aspdin patent na portlandský cement, jehož název odvozujeme od podobnosti s portlandským vápencem, který se těží v Dorsetu na ostrově Isle of Portland v kanálu La Manche.

Roku 1855 na světové výstavě v Paříži Francois Coignet vystavuje některé betonové konstrukční prvky a získává bronzovou medaili. Jeho patent z téhož roku shrnuje nejdůležitější zásady, jejichž realizace umožnila zprůmyslnění výroby betonu a jeho konkurence schopnost mezi ostatní stavební materiály. Významným historickým milníkem by mohl také být rok 1867, kdy si pařížský zahradník Joseph Monier nechal patentovat železový beton.

Dále bychom neměli opomenout slangový výraz ROXOR, v současné době sloužící jako obecné označení všech betonářských výztuží, který původně označoval pouze jeden typ profilu betonářské výztuže používaný od 30. do 50. let minulého století. Uvedený typ svařitelné výztuže ROXOR 10 512 či 10 513, poprvé použitý v roce 1933, byl snadno rozpoznatelný dle čtyřlístkového průřezu s příčným uspořádáním žebírek na tyči.

Potřeba najít náhradu za karcinogenní azbest, užívaný v 50. letech 20. století, vedla ke zkoušení nových materiálů. A od té doby se výzkum nových vláken nezastavil. Vláknobeton se u nás dostal do povědomí širší technické veřejnosti až v 90. letech minulého století, kde se, se vstupem zahraničních firem na náš trh, začaly v širokém měřítku realizovat betonové podlahy průmyslových hal bez klasického vyztužení, ale s příměsí drátků. Světově označovaný SFRC (steel fibre reinforced concrete – beton vyztužený ocelovými vlákny) se u nás vžil pod názvem drátkobeton.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Složky betonu

Základní složky betonu jsou kamenivo, cement a voda. Doplnkové složky tvoří přísady a příměsi. Vyztužený beton dále obsahuje betonářskou ocel (železobeton), předpínací ocel (předpjatý beton), rozptýlenou výztuž (vlákna nebo drátky).

1.1 Cement

Cement je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě.

Pro cementy platí evropská norma ČSN EN 197 – 1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Suroviny pro výrobu cementu rozdělujeme na tři složky

- **Základní suroviny** – do této složky patří vápenec CaCO_3 , který by měl být znečištěný hydraulickými oxidy, a zeminy, což jsou horniny obsahující jílové minerály (břidlice, spraše, jíly, hlíny).
- **Korigující suroviny** – přidávají se, pokud chybí některý ze základních oxidů (CaO , SiO_2 – křemičitý písek, Al_2O_3 – bauxit).
- **Zušlechťující přísady** – patří sem intenzifikátory – látky, jejichž působením se snižuje viskozita kapalné fáze a je možné snížit teplotu výpalu až o $100\text{ }^\circ\text{C}$ (např. Na_2SiF_6), mineralizátory – látky, jejichž působením se upřednostňuje tvorba jednoho slínkového minerálu na úkor druhého (např. sádrovec, Na_2SiF_6) a legující přísady – látky, jejichž působením se usnadňuje melitelnost vypáleného slínku (např. sádrovec, apalit).

1.1.1 Chemické složení cementu

Čtyři hlavní složky:

- **Trikalciumsilikát – alit C_3S** - podílí se nejvyšší mírou na vzrůstu pevnosti do 28 dnů a to tím, že se rychle slučuje s vodou, a uvolňuje tak větší

hydratační teplo. Běžně je ho v cementu obsaženo méně než 60 %. Cementy obsahující více jak 60 % alitu mají vysokou počáteční pevnost.

- **Dikalciumsilikát – belit C_2S** - uvolňuje polovinu méně hydratačního tepla než alit, pomalu hydratuje, ale konečná pevnost cementu je jen o málo menší než u cementů obsahujících alit. Běžně je ho v cementu obsaženo mezi 25 % a 40 %. Belitové cementy tuhnou a tvrdnou pomaleji. U portlandských cementů se množství alitu a belitu pohybuje okolo 75-86 %.
- **Tetrakalciumaluminátferrit – celit C_4AF** - je důležitý pro objemovou stálost. Přispívá ke vzrůstu pevnosti i po 28 dnech, ale pouze na suchu. Pod vodou netuhne. Běžně je ho v cementu cca 10 %.
- **Trialkciumaluminát C_3A** - prudce hydratuje, čímž vyvíjí přibližně 2krát větší hydratační teplo než alit. Hydratuje okamžitě po přidání vody za vzniku kalciumalumináthydrátů, z toho důvodu se ke slínku přidává ještě sádrovec, který mění chemickou podstatu hydratace trialkciumaluminátu a oddaluje tak tuhnutí. Celitu bývá max. 10 %, u cementů s velkou počáteční pevností max. 15 % a pro masivní konstrukce max. 8 %. [3]

1.2 Kamenivo

Kamenivo zaujímá 75-80 % objemu betonu a jeho hlavní funkcí je vytvoření pevné kostry v betonu s minimální mezerovitostí, proto obsahuje různě velká zrna ve vhodném poměru. Kamenivo je přírodní nebo umělá, převážně anorganická, zrnitá látka určená pro stavební účely do velikosti zrna 125 mm.

V současné době platí ČSN EN 12620 Kamenivo do betonu.

Kamenivo můžeme rozdělit:

A. Podle velikosti zrn a jejich skladby:

- hrubé kamenivo s velikostí zrn 4 – 125 mm (šterk, drť);
- drobné kamenivo s velikostí zrn do 4 mm (písek);
- jemné kamenivo do velikosti zrn 0,25 mm nebo 0,125 mm (moučka, filler);
- šterkopísek - směs přírodního těžného hrubého a drobného kameniva, omezená největším zrnem;
- šterkodrt' - směs drceného přírodního kameniva hrubého i drobného, omezená největším zrnem.

B. Podle objemové hmotnosti:

- lehké (pórovité) – do 2000 kg.m^{-3} (liapor, experlit);
- hutné – $2000\text{-}3000 \text{ kg.m}^{-3}$ (rula, diorit, amfibolit);
- těžké – nad 3000 kg.m^{-3} (barit, krevel, limonit).

C. Podle původu:

- přírodní, které dále dělíme na těžené a drcené;
- umělé;
- z druhotných surovin. [3]

1.2.1 Technologické požadavky na kamenivo do betonu

Je třeba kontrolovat faktory, které mohou ovlivnit vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. Mezi tyto faktory patří zejména:

A. Vliv jemných částic – jsou to práškové látky o velikosti zrn do 0,25 mm, vhodnější je však omezení velikostí zrn cementu, tj. do 0,125 mm. Jemné částice lze považovat za neškodné, pokud je splněna jedna z níže popsaných podmínek:

- celkový obsah jemných částic je menší než 3 % z celkového množství kameniva;
- hodnota ekvivalentu písku dle EN 933 – 8 je větší než specifikovaná spodní mez;
- hodnota methylenové modře zjištěná zkouškou dle EN 933 – 9 je menší než specifikovaná spodní mez;
- pokud je potvrzeno vyhovující provedení se známým kamenivem, nebo kde je důkaz o vyhovujícím používání s dobrými zkušenostmi bez problémů.

B. Organické látky – sledujeme humusovitost drobného kameniva, bobtnající organické látky (max. v písku 0,5 % hm. a v hrubém kamenivu do 0,1 % hm.), obsah uhlíku (max. 0,5 % hm.) a v neposlední řadě organické látky ovlivňující tvrdnutí betonu (musí být vymezeny tak, aby srovnatelnými zkouškami betonu nesnížily pevnost o více než 15 %).

C. Sloučeniny síry – limitující hodnota je max. 1 % hm. stanovené jako SO_3 (např. sádra, alkalické sulfáty), respektive max. 0,2 % hm. stanovené jako obsah síranů rozpustných v kyselině.

D. Sloučeniny způsobující korozi výztuže betonu – jedná se zejména o chloridy, také dusičnany a ostatní halogenidy, kromě fluoru.

- kamenivo pro železobeton max. 0,4 % Cl-;
- kamenivo pro předpjatý beton max. 0,02 % Cl-;
- pro nevyztužené betony se připouští 0,1 % Cl-.

E. Sloučeniny způsobující alkalicko - křemičitou reakci – s alkáliemi vzniká nežádoucí alkalicko – křemičitá reakce, která je doprovázena dlouhodobými objemovými změnami. V ČR se vyskytuje ojediněle. Nežádoucí reaktivní látky jsou například opál, chalcedon, cristobalit. [3]

1.3 Voda

Všechna voda použitá pro přípravu betonu dle ČSN EN 206 - 1 vyhovuje, je-li v souladu s požadavky ČSN EN 1008 Záměsová voda do betonu – specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci na betonárně, jako záměsové vody do betonu.

Voda má v čerstvém betonu dvě funkce:

- hydratační - voda podmiňuje hydrataci cementu, a tak spolu s cementem vytváří strukturu cementového kamene. Minimální spotřeba vody na hydrataci cementu je přibližně 23-25 % hmotnosti cementu;
- reologickou - voda umožňuje vytvoření tvárného čerstvého betonu ve spojení s jeho složkami. Kapilárními silami je zajišťována koheze čerstvého betonu a viskozitou jeho plastičnost.

Technologicky rozdělujeme vodu na:

- záměsovou - dávkovaná při míchání čerstvého betonu;
- ošetřovací - dodávaná po zatvrdnutí betonu z důvodu udržení betonu ve vlhkém stavu proto, aby všechny reakce proběhly bezproblémově a nedocházelo k defektům betonu. [7]

1.4 Přísady

Přísady jsou chemické sloučeniny, které se přidávají během míchání do betonu v množství od 0,2 % do 5 % hmotnosti cementu za účelem modifikace vlastností čerstvého nebo tvrdnoucího betonu.

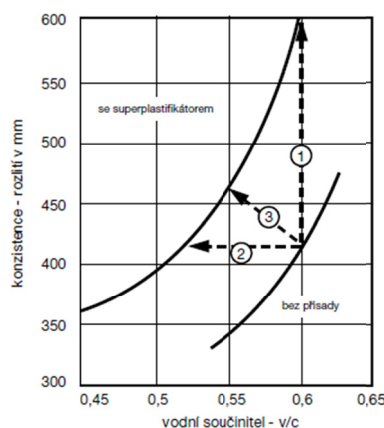
Rozdělení přísad dle ČSN EN 934 – 2: 2002 Přísady do betonu, malty a injektážní malty. Část 2. Přísady do betonu – definice, specifikace a kritéria shody:

- plastifikační / vodoredukující přísady;
- superplastifikační / silně vodoredukující přísady;
- stabilizační (zadržující vodu) přísady;
- provzdušňující přísady;
- přísady zpomalující tuhnutí;
- přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí;
- těsnící (hydrofobizační, odpuzující vodu) přísady.

1.4.1 Plastifikační přísady

Tyto přísady jsou nejvíce rozšířeny a používají se ve všech oblastech výroby betonu a betonových výrobků. Plastifikační přísady snižují povrchové napětí vody a zvyšují smáčecí schopnost záměsové vody, čímž dochází ke zlepšení zpracovatelnosti betonové směsi. Pokud ponecháme zpracovatelnost betonové směsi na původní úrovni, umožní plastifikační přísady snížit množství záměsové vody, a tím tak umožní dosáhnout vyšší pevnosti betonu nebo snížení dávky cementu. Dobré plastifikační přísady umožňují snížit dávku záměsové vody až o 15 %.

Plastifikační přísady ovlivňují kromě zpracovatelnosti betonové směsi i vlastnosti zatvrdlého betonu. Snížením vnitřního tření mezi částicemi betonové směsi a disperzním účinkem na jemné částice umožňují tyto přísady dosáhnout hutnějšího betonu, čímž dojde k urychlení hydratačního procesu, ke snížení nasákavosti betonu, ke zvýšení pevnosti betonu a ke zvýšení odolnosti betonu.



Obr. 1: Vodní součinitel

1.4.2 Stabilizační přísady

Tyto přísady redukují odmísení vody v suspenzi, které nastává sedimentací tuhých částic. Kromě obecných požadavků na stabilizační přísady se také požaduje, aby pevnost betonu s přísadou klesla nejvíce na 80% pevnosti betonu bez přísady, a současně musí být dosaženo nejméně 50% redukce odlučování vody.

Patří sem zejména:

- anorganické přísady a především příměsi, které zvětšují měrný povrch tuhých částic v jednotce objemu čerstvého betonu;
- organické a anorganické přísady, které v první fázi zvětšují měrný povrch tuhých částic a v druhé fázi reagují s volnou vodou a vážou ji fyzikálně nebo chemicky.

1.4.3 Ztekucující přísady

Ztekucující přísady jsou v podstatě vysoce účinné plastifikátory, které mají dvojnásobnou až trojnásobnou účinnost oproti běžným plastifikačním přísadám. Účinnost ztekucujících přísad je závislá na jejich dávce a na dobrém promíchání betonové směsi. S časem ztekucující účinek klesá. Běžné ztekucovače jsou účinné cca do 40 minut po vyrobení betonové směsi. Speciální ztekucovače jsou účinné až 2 hodiny. Ztekucující přísady jsou vyráběny na bázi polykondenzátu melamino - formaldehydové pryskyřice, či na bázi derivátů naphtalensulfonanů. Nejmodernější ztekucovače jsou vyráběny synteticky na bázi kombinace polymerů. Ztekucovače umožňují snížit dávku záměsové vody až o 50 % nebo umožňují vyrábět tekutý beton s nízkými nároky na hutnicí techniku. Ztekucovače jsou používány u betonů, na něž jsou kladeny zvláště vysoké nároky po stránce pevností, odolnosti a rychlosti nárůstu pevností.

1.4.4 Provzdušňující přísady

Provzdušňující přísady jsou používány u betonů, od nichž je očekávána vysoká odolnost proti mrazu a proti přímému působení chemických rozmrazovacích látek. Provzdušňující přísady vytváří v betonu uzavřené vzduchové bubliny o velikosti do 0,3 mm. Vzduchové bubliny přerušují kapiláry v zatvrdlém betonu a vytvářejí prostor pro nabývání mrznoucí vody v kapilárách. Vzduchové bubliny způsobují u čerstvého betonu lepší zpracovatelnost. Provzdušňující přísady mají tedy také

plastifikační účinky. Vzhledem k plastifikačním účinkům je možné snížit obsah jemných částic, tj. písku v betonu nebo použít provzdušňující přísadu u betonů s nízkým obsahem jemných částic v písku. Při návrhu složení provzdušněné betonové směsi je třeba mít na zřeteli, že provzdušnění snižuje pevnost betonu, 1 % obsahu vzduchu způsobí pokles pevnosti o cca 4 %. Provzdušnění betonu má také vliv na jeho tvrdnutí, protože vzduchové póry ho zpomalují.

1.4.5 Přísady zpomalující tuhnutí betonu

Tyto přísady jsou určeny k prodloužení zpracovatelnosti betonové směsi. Nejlepší výsledky mají zpomalovače na bázi fosfátů. Zpomalovače se dále vyrábějí na bázi kyseliny mravenčí a jejích solí a na bázi organických látek (například glukonáty). Zpomalovače v závislosti na jejich chemické povaze a na dávce po určitý čas brání tvoření roztoku gelů anebo vytvářejí na zrnech cementu film, který nedovolí přístup vody k cementu a tvoření gelů. Zpomalovače jsou vhodné při betonáži větších celků, protože umožní kontinuální betonáž bez spár. Snižují vývin hydratačního tepla, a tak jsou vhodné pro betonování za vyšších teplot.

1.4.6 Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu

Tyto přísady jsou určeny pro urychlení tuhnutí a tvrdnutí betonu, tj. pro dosažení vysokých pevností u mladého betonu. Vhodné jsou také při betonážích za nízkých teplot, protože umožní rychlé dosažení takové pevnosti betonu, aby u něj nedošlo k poškození mrazem. Nejběžnějšími a nejstaršími urychlovači jsou chloridy (chlorid vápenatý). Tyto urychlovače by se v dnešní době již neměly používat, protože chloridy nelze použít u vyztuženého betonu z důvodu způsobování koroze výztuže. U nevyztuženého betonu dále způsobují výkvěty solí na jeho povrchu. V dnešní době jsou pro běžné betonářské práce k dispozici urychlovače na bázi rhodanidu vápenatého, nebo mravenčanu vápenatého.

1.4.7 Utěsňující přísady

Tyto přísady se používají pro zabránění vnikání vody do betonu. Pro dobrou funkci utěsňujících přísad je nutné vhodné složení betonové směsi, protože tyto přísady pouze utěsňují kapiláry v betonu, nikoliv například písková nebo štěrková hnízda ani kaverny způsobené nevhodnou zrnitostí kameniva. Utěsňující přísady jsou látky, které reagují s hydratačními produkty a vytvářejí hydrosilikáty, které utěsňují kapiláry v betonu.

Utěšňující přísady se používají při stavbách nádrží, jímek, bazénů a jiných staveb, u nichž je nutné zabránit průniku vody betonem.

1.4.8 Ostatní přísady

Injektážní přísady – zlepšují tekutost injektážní malty, snižují potřebné množství vody, snižují smrštění malty. Docilují bobtnání injektážní malty. Používají se do injektážních malt pro dodatečně předpjaté betonové konstrukce. Také se používají do rozpínavých malt a betonů k vyplnění dutin v betonu, ve zdivu i v horninách a pro kotvení v tunelovém stavitelství.

Inhibitory koroze – vytváří pasivní povrch oceli proti korozivnímu prostředí, což je důležité při karbonataci betonu a při použití kyselých aktivačních přísad ($\text{CaCl}_2, \text{SO}_4^{2-}$). Inhibitory koroze podle dávky urychlují nebo zpomalují tuhnutí cementu a většinou neovlivňují reologické vlastnosti čerstvého betonu.

Biocidní přísady – omezují biologickou korozi betonu. Každé stavební dílo je osídleno mikroorganismy a ty potencionálně ohrožují trvanlivost betonu, pokud se vytvoří příznivé mikroklima pro šíření, rozmnožování a aktivitu mikroorganismů. [3]

1.5 Příměsi

Jsou většinou práškové látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo k docílení zvláštních vlastností. Podle ČSN EN 206 - 1 se dělí na dva typy.

- Příměsi druhu I – téměř inertní.
- Příměsi druhu II – pucolány (vázající volné vápno) nebo latentně hydraulické látky, které pozitivně ovlivňují především vlastnosti ztvrdlého betonu po delší době ošetřování.

1.5.1 Popílký

Ve funkci pucolánové příměsi do betonu jsou v ČR nejčastěji využívány křemičité popílký dle ČSN EN 450 - 1.

Přínosem popílků je především jejich pucolánová vlastnost, a tím i pokračující růst pevnosti po 28 dnech tvrdnutí. Dalším přínosem je jejich malá vodonáročnost, tzn. jejich příznivý vliv na vodonáročnost směsi cementu a popílků.

Hlavní nevýhodou popílku je jeho nepříznivý vliv na rychlost tvrdnutí. Další nevýhodou používání popílku může být jeho nepříznivý vliv na variabilitu pevností betonu vlivem kolísání jejich vlastností. Tento vliv lze omezit především volbou stálého a spolehlivého dodavatele.

1.5.2 Mleté granulované vysokopecní strusky

Granulovaná vysokopecní struska se uplatňuje především jako jedna z hlavních složek cementu. Pro některé specifické výhody, jako je možnost měnit podíl strusky k portlandskému slínku v závislosti na požadovaných vlastnostech betonu a možnost použití samostatně jemně mletých popílků, se za příznivých podmínek může kladně technicky a ekonomicky uplatnit i použití strusky ve funkci příměsi do betonu. Pro použití mleté vysokopecní strusky platí ČSN EN 15167 - 1.

1.5.3 Křemičité úlety (silika)

Tyto příměsi jsou využívány v souladu s ČSN EN 13236 – 1 Křemičitý úlet do betonu – Část 1: Definice, požadavky a kritéria shody.

Křemičité úlety jsou odpadem některých hutnických provozů. Vyznačují se mimořádně velkým měrným povrchem a dobrými pucolánovými vlastnostmi. Obsahují 80-98 % amorfního SiO_2 ve tvaru kulatých zrn o průměru asi 0,1–0,2 μm , při měrném povrchu 15000 až 30000 $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ a měrné hmotnosti 2120 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Důležitým přínosem těchto nejúčinnějších pucolánů je vázání volného vápna, a tím omezení jeho nežádoucích vlivů, hlavně na odolnost betonu proti vlivům prostředí. Nejde jen o nepatrný obsah volného vápna obsaženého v suchém cementu, ale i o jeho významný podíl vznikající v důsledku hydratace cementu; hmotnostní podíl hydroxidu vápenatého je směrně 24 % všech hydratačních produktů.

Dalším přínosem této jemně zrnité složky je její vliv na hutnost směsi pevných složek, a tím i na jakost pojivového tmelu obalujícího zrna kameniva. Důsledkem je významné zlepšení soudržnosti tmelů s kamenivem, a tím i zlepšení pevnosti v tahu. Výhodou jemnozrnnosti je i omezení odlučování vody; proto je křemičitý úlet využíván i ve stabilizačních přísadách. [3]

2 Drátkobetonová směs a její složky

Drátkobeton je termín pro kompozit s cementovou matricí ztuženou náhodně rozptýlenými ocelovými vlákny definovaných parametrů. Pro nosné konstrukce betonového stavitelství je třeba použít konstrukční drátkobeton, u kterého množství drátků na jednotku objemu betonu má pozitivní vliv na výchozí charakteristiky prostého betonu a to nejen z hlediska tahových pevností; před a po vzniku trhliny, ale též výrazného zvýšení meze vzniku trhliny a mezního přetvoření při porušení konstrukce.

2.1 Požadavky na kamenivo

Mají-li drátkobetony plnit funkci konstrukčního betonu, je nutné, aby jejich složení, zejména pokud jde o hrubou frakci kameniva, odpovídalo co nejvíce složení osvědčených konstrukčních betonů. Rovněž jakost kameniva by měla být alespoň taková jako v případě běžných konstrukčních betonů.

Samotné náhodně rozptýlené drátky jsou z pohledu výroby a zpracovatelnosti drátkobetonové směsi velmi nevýhodnou inertní složkou. Při užitých parametrech a jakosti drátků působí drátky na zrna hrubé frakce kameniva tím, že je oddalují; a brání tak jejich skloubení při zpracovávání směsi.

2.2 Požadavky na vodu, cement a přísady

Při návrhu je možno plně aplikovat všechny poznatky známé z oblasti navrhování a výroby obyčejných betonů. Jediné rozdíly se ukazují ve vodním součiniteli, tj. v poměru v/c . Pro drátkobetony vyhovuje nejlépe poměr kolem 0,4–0,5, který zajišťuje, že se drátky nebudou při výrobě, dopravě a zpracování drátkobetonové směsi ani oddělovat, ani shlukovat.

Pro zlepšení obtížné zpracovatelnosti drátkobetonové směsi se doporučuje užívat plastifikační nebo ztekucující přísady, které zvětšují pohyblivost směsi při její dopravě a zpracování. [4]

2.3 Používaná vlákna

Vlákna používaná pro výrobu vláknobetonu lze rozdělit dle materiálu použitého pro jejich výrobu na:

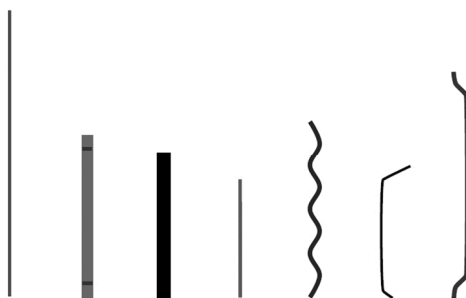
- ocelová vlákna;
- polymerová vlákna;
- skleněná vlákna;
- ostatní vlákna.

2.3.1 Ocelová vlákna

Ocelová vlákna dělíme do čtyř základních skupin dle použitého základního materiálu.

- Skupina I – za studena tažený drát.
- Skupina II – vlákna stříhaná z plechu.
- Skupina III – vlákna oddělovaná z taveniny.
- Skupina IV – vlákna protahovaná z drátu taženého za studena.
- Skupina V – vlákna frázovaná z ocelových bloků.

Dle tvaru se vlákna dále dělí na přímá a tvarovaná, přičemž výrobce musí deklarovat jejich tvar. Jsou-li vlákna dodávána s povrchovou úpravou, musí výrobce deklarovat druh povrchové úpravy a její množství v g.m^{-2} . [10]



Obr. 2: Různé druhy ocelových vláken

2.3.2 Polymerová vlákna

Jsou vlákna zhotovená z polymerních materiálů, jakými jsou např. polypropylen, polyethylen, polyester, nylon, PVA, polyakryl, aramid a jiné směsi.

Polymerová vlákna jsou klasifikována podle fyzického tvaru do tříd:

- Třída Ia – mikroválkna s průměrem $< 0,3$ mm; jednovlákná.
- Třída Ib – mikroválkna s průměrem $< 0,3$ mm; vláknitá (fibrolovaná).
- Třída II – makroválkna s průměrem $> 0,3$ mm.

Polypropylenová vlákna mohou výrazně snížit riziko vzniku prasklin způsobených předběžnou kontrakcí betonu. Adhezí vody k povrchu vláken bude proces schnutí opožděný a pevnost betonu se zvýší rychleji než pnutí vytvořené kontrakcí.

Přítomnost vláken navíc výrazně ovlivňuje složky betonu během požáru. Vláknata se vyznačují nízkou teplotou tání, což v případě požáru pevně objemově vyplní póry. Proto má v případě požáru fyzicky navázaná voda dostatečný prostor k vypaření.

Každé polypropylenové vlákno má přesně specifikované vlastnosti, od nichž je odvozena jeho účinnost ve výsledném betonu. Vláknata po dokonalém rozmístění vytvoří v betonu tzv. třídímenzionální strukturu. Tato struktura je potom základem pevnostního chování vláknobetonu. Polypropylenová vlákna, nejčastěji délky 12 mm, zabraňují vzniku trhlin v raném stadiu tuhnutí a tvrdnutí betonu. Po ztvrdnutí jeho vlastnosti už prakticky neovlivňují. Nejčastěji se používají u jemnozrnných potěrů a vodotěsných betonů. Dávkování se pohybuje v rozmezí $0,6-0,9 \text{ kg.m}^{-3}$. Vláknata jsou dodávána v rozpustných sáčkích a dávkuje se nejčastěji přímo do autodomíchávače. [10]



Obr. 3: Polypropylenové vlákna

2.3.3 Skelná vlákna

Vláknata jsou v betonu třídímenzionálně rozmístěna, čímž zlepšují jeho mechanicko-fyzikální vlastnosti a omezují vznik mikrotrhlin v první fázi tuhnutí a tvrdnutí betonu. Používají se do betonů, potěrů a samonivelačních stěrek. Pro vyztužení stěrek a potěrů je možné použít vlákna uspořádané do rohože, která je po instalaci následně

rozplavitelná. Dávkují se v množství 0,6–1,2 kg.m⁻³. Délka vláken je obvykle 12 mm. Hlavním problémem skelných vláken je jejich nízká odolnost proti alkáliím, což se řeší použitím cementu s jejich nízkým podílem, ale především použitím skel odolných proti nim. [10]

2.4 Objemový stupeň ztužení

Vlákna musí tvořit v objemové jednotce takový podíl, aby vznikl homogenní vláknobeton, který umožní zlepšit alespoň některou z fyzikálně mechanických vlastností původního prostého betonu.

Objemový stupeň ztužení $\rho_{v,f}$ obvykle uvedený v %, vyjadřuje u vláknobetonu podíl objemu vláken k objemu vláknobetonu podle vztahu:

$$\rho_{v,f} = V_f / V_{fc}$$

kde: V_f je objem vláken podle vztahu: $V_f = m_f / \rho_f$;

m_f hmotnost vláken (kg);

ρ_f objemová hmotnost vláken (kg/m³) v závislosti na použitém materiálu vláken;

V_{fc} objem vláknobetonu (m³).

Při návrhu složení vláknobetonu je nutné vždy uvážit jeho způsob výroby a postup při realizaci navržené vláknobetonové konstrukce. Užitá vlákna ovlivňují, stejně jako jeho celkové složení, i celou technologii výroby vláknobetonu a to zejména při požadovaných hmotnostních dávkách vláken nad 0,5 % objemového stupně jeho ztužení vlákny.

Výběr vláken i jejich hmotnostní dávky se řídí požadavky na vlastnosti vláknobetonu, potřebné pro navrhovanou vláknobetonovou konstrukci. Pro vlákna ocelová se doporučuje, aby minimální dávka odpovídala v procentech cca 0,5 % objemového stupně ztužení, což umožňuje zejména při užití ocelových vláken délek nad 35 mm výrobu homogenního drátkobetonu. [2]

2.5 Výroba vláknobetonu

Výroba vláknobetonu je doposud uskutečňována ve většině případů pomocí autodomíchávačů, což není optimální cesta. I když je splněna hlavní zásada pro užití ocelových vláken – ocelová vlákna dávkovat jako poslední složku, lze dosáhnout homogenity vláknobetonu obtížně za cenu prodloužení času míchání.

Dávkování je možné několika způsoby:

- manuálně;
- mechanicky (např. vibrační zařízení, pásový dopravník, korečkový výtah, pneumatický dávkovač) a to buď ve výrobně vláknobetonu přímo do míchačky, nebo na betonárně či stavbě do autodomíchávačů.

Pro všechny metody obecně platí, že dodatečné promíchání drátků s betonovou směsí by mělo trvat přibližně $1\text{ min}/\text{m}^3$ betonu.

Ke shlukování ocelových vláken do podoby suchých ježků dochází při jejich velmi nešetrném přidávání, kdy je do míchacího zařízení vhozeno jednorázově, v podobě velkého chomáče, značné množství vláken. Ocelová vlákna by měla být dávkována tak, aby na povrch betonové směsi dopadala ve formě deště jednotlivých vláken.

Nebezpečí vzniku mokrých ježků hrozí v případě, kdy je dávkováno nadměrné množství relativně tenkých vláken, nebo vznikají při dlouhé době promíchávání drátkobetonu s vysokým podílem velké frakce kameniva. [10]



Obr. 4: Nesprávný způsob promíchání

2.6 Možnosti využití

Přítomnost vláken je mimořádně účinná v případech složitých konstrukčních detailů, kdy je konvenční výztuž obtížně proveditelná, případně je potřeba ji úplně vynechat. Ocelová vlákna mohou v určitých případech úplně nahradit smykovou výztuž (třmínky) nebo omezit výztuž v místech, kde její kumulace ohrožuje zdárné probetonování prvku. Pozitivní účinky přítomnosti vláken v betonu jsou prokázány i v případech seismického namáhání. [4]

2.6.1 Nenosné prvky

Vláknobeton pro nenosné prvky se používá zpravidla tam, kde hlavní funkce původní prutové výztuže sloužila k získání duktility, k omezení vzniku trhlin, případně byla-li výztuž určena na základě konstrukčních zásad ke zvýšení odolnosti a trvanlivosti prvku. Vláknobeton se používá pro prefabrikované roury včetně tlakových všude tam, kde je vyloučeno ohrožení lidských životů, dále v železniční dopravě pro výrobu pražců, kde hlavní problém spočívá v únavě způsobené cyklickým namáháním a vlákna tvoří doplňkovou výztuž k běžné betonářské nebo předpjaté výztuži, a úspěšně v podzemních stavbách jako stříkaný beton.

2.6.2 Nosné prvky

V oblasti nosných konstrukcí je nejčastější použití v panelech užívaných v průmyslové výstavbě. Další aplikací je užití stříkaného drátkobetonu na ostění, které se často využívá při stavbách tunelů v zemích severní Evropy, kde horninové prostředí dosahuje vysoké kvality. Mezi další výhody patří odstranění armovacích prací, omezení smršťovacích trhlin, a tím zvýšení vodonepropustnosti.

Využití drátkobetonu při realizaci prefabrikovaných segmentů má řadu výhod:

- zvýšení odolnosti vůči agresivitě prostředí (odpadá nebezpečí koroze výztuže);
- zvýšení požární odolnosti (vliv polypropylenových vláken);
- prodloužení životnosti (až 120 let);
- snížení nebezpečí poškození hran segmentů při manipulaci;
- snížení nároků na opravu při výstavbě a na údržbu během doby životnosti;
- zjednodušení a zrychlení výroby;
- snížení nároků na prostor při výrobě;
- významná úspora oceli (až 60 kg.m^{-3});

- úspora energie a omezení produkce CO₂ (méně oceli);
- snížení nároků na lidské zdroje.

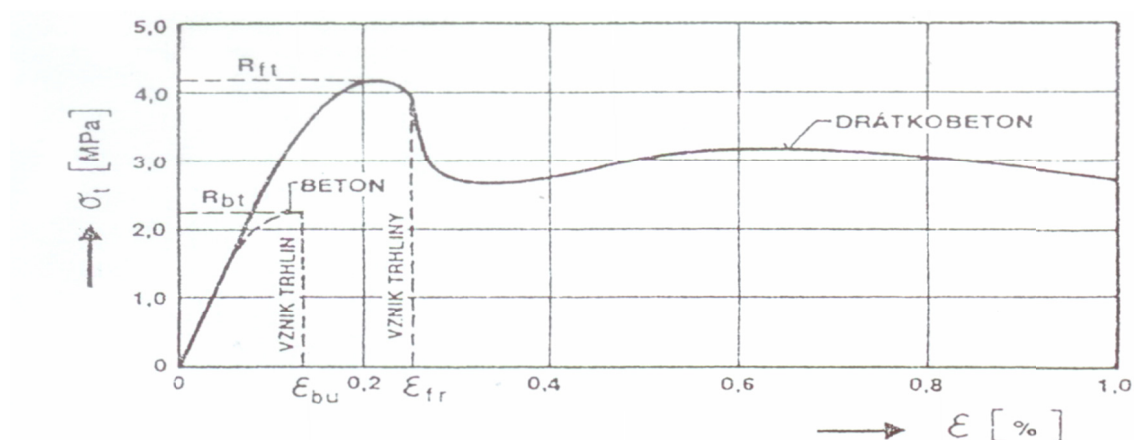
Použití vláknové výztuže jako částečné nebo plné náhrady klasické výztuže je výhodné tam, kde jsou vyšší náklady na materiál kompenzovány snížením pracnosti, odstraněním nedostatků brzdících rychlejší nebo kvalitnější produkci, a které vede v důsledku zavedení vláknobetonu k dalším úsporám, např. k omezení velkých ploch nutných pro skladování původní prutové výztuže.

Prvky z vláknobetonu jsou subtilnější, čímž se sníží přepravní náklady a náklady na energeticky náročné materiály.

Platí, že ocelová vlákna přispívají ke zvýšení únosnosti a polymerní vlákna např. polypropylénová, k vyšší požární odolnosti, oba typy zvyšují houževnatost materiálu.

2.7 Porovnání prostého betonu s vláknobetonem

- Na realizaci podlah, základových desek, základových pásů, atd. se ve většině případů používá beton pevnostní třídy C16/20, C20/25 a C25/30, kdy se konstrukce vyztužuje použitím KARI sítí (pevná výztuž). Tuto výztuž lze nahradit pomocí rozptýlené ocelové výztuže, která je používána nejčastěji v dávce 20, 25 a 30 kg. Dávkování je zcela závislé na únosnosti podloží a výsledném zatížení (stálé zatížení, užitné zatížení, mimořádné zatížení).
- Ocelová výztuž přenáší tahové napětí, po vzniku trhliny nenastane destrukce konstrukce jako u nevyztuženého betonu, ale trhlina je překlenuta ocelovou výztuží.



Obr. 5: Pracovní diagram vláknobetonu ve srovnání s prostým betonem

2.8 Koroze oceli v betonu

V betonu je povrch oceli obalen cementovým kamenem, jehož pórová voda obsahuje nasycený roztok $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s $\text{pH} = 12,6$. Tato vysoká alkalita zajišťuje pasivitu povrchu oceli ochrannou vrstvou, pokud nepůsobí jiné agresivní ionty (např. Cl^-).

Koroze oceli v betonu nastává snížením koncentrace iontů OH^- ($\text{pH} < 11,5$) nebo působením chloridových iontů. Koroze oceli probíhá pouze za přítomnosti vody, nebo ve vlhkém vzduchu s relativní vlhkostí větší jak 65%, ovšem voda je v cementovém kameni vždy absorbována v gelových pórech.

Ocel v betonu je vystavena korozi v těchto případech:

- snížením hodnoty pH pod 11,5 působením kyselého prostředí, vyluhováním minerálů, karbonací povrchových vrstev betonu;
- působením chloridových iontů.

Opatření ke snížení možnosti koroze ocel v betonu jsou:

- snížení pórovitosti;
- nízký vodní součinitel;
- dostatečná tloušťka krycí vrstvy betonu;
- omezení vzniku trhlinek, zejména širších jak 0,1 mm.

3 Zkoušení konstrukčního vláknobetonu

Zkoušení vláknobetonu je možné provádět stejnými postupy jako u obyčejného betonu s tím, že vláknobeton je v podstatě dalším kompozitním materiálem se širokou řadou modifikací. Vyznačuje se rozdílnými vlastnostmi, které je třeba prokázat zkouškami, ze kterých by se daly potřebné charakteristiky přímo odvodit. [11]

3.1 Zkoušky čerstvého vláknobetonu

Vlastnosti čerstvého vláknobetonu se ověřují standardizovanými zkušebními postupy shodnými pro zkoušky obyčejného čerstvého betonu, tedy dle souboru norem ČSN EN 12350. Ze standardizovaných metod bude pravděpodobně nejvhodnější metoda dle ČSN EN 12350 – 5 „Zkouška rozlitím“. Vyplývá to z působení vláken ve struktuře betonu, která ji stabilizují a brání přirozenému tečení, s kterým se počítá při zkoušce sednutím kužele. [11]

3.2 Kontrola množství vláken

Důležitou kontrolou čerstvého vláknobetonu je navíc kontrola obsahu vláken v betonu, kterou lze do jisté míry popsat jeho homogenitu. Obvyklé dávkování drátků ve vybraných typech konstrukcí je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 1: Dávkování drátků ve vybraných konstrukcích (zdroj: Podlahy 2008)

Typ konstrukce	dávkování drátků	
Průmyslové podlahy s řezanými spárami	20-25	kg/m ³
Průmyslové podlahy bezesparé	35-45	
Stříkaný drátkobeton	30-50	
Základové konstrukce	40-60	
Stropní desky z drátkobetonu	80-100	

Kontrola správného dávkování drátků a jejich rovnoměrného rozmístění se v praxi provádí spíše výjimečně, a to zpravidla pouze na několika málo vzorcích, jejichž objem je často nedostatečný.

Zkoušku obsahu vláken v betonu lze provádět rozplavením definovaného množství čerstvého vláknobetonu, extrakcí vláken, jejich vysušením a následným zvážením. V případě použití ocelových vláken je pak možné zkoušku s výhodou urychlit extrakcí vláken pomocí magnetu – Dozometru. V praxi se nejvíce osvědčil odběr tří vzorků z jednoho autodomíchávače, nejlépe na počátku, uprostřed a na konci jeho

vyprazdňování. Tímto způsobem je možné posoudit, zda byla do betonové směsi nasypána předepsaná dávka drátků a rovněž zda se drátky během míchání rozptýlily dostatečně. Optimální objem jednoho vzorku je 10 litrů. Odběr a vyhodnocení tří vzorků je možné provést během 10 – 15 minut. Tato doba umožňuje pružně reagovat na případné nedostatky a upravit recepturu betonové směsi, způsob jejího míchání, či dávkování drátků. [11]

3.3 Zkoušky ztvrdlého vláknobetonu

Zkoušky ztvrdlého vláknobetonu se provádějí rovněž standardizovanými postupy dle norem řady ČSN EN 12390.

3.3.1 Pevnost v tlaku

Zkouška pevnosti betonu v tlaku se provádí dle ČSN EN 12390 – 3 na zkušební krychli, nebo zkušebním válci. Třída betonu se proto označuje oběma charakteristickými hodnotami těchto pevností (např. C25/30).

Pro obvyklé betony byl zaveden poměr mezi charakteristickými hodnotami pevností získaných z měření na válcích a na krychlích $\alpha_{fc} = f_{c,cyl} / f_{c,cub} = 0,8$. V tom je zahrnuta i skutečnost, že při zkoušce je válec zatěžován ve směru hutnění betonu a krychle kolmo na směr hutnění. Z dlouhodobého hlediska se ukazuje, že pro konstrukční vláknobetony s ocelovými vlákny lze tento poměr změnit na poměr $\alpha_{fc} = f_{c,cyl} / f_{c,cub} = 0,9$.

3.3.2 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu má pro chování vláknobetonových prvků podstatně větší význam.

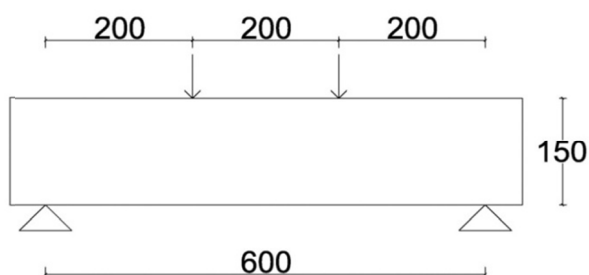
Pro vzájemný vztah pevností je třeba odvodit experimentálně poměry α_f mezi osovou pevností v tahu $f_{t,ax}$ a příslušnou pevností v tahu: pro příčný tah $\alpha_{t,sp} = f_{t,ax} / f_{t,sp} = 0,85$ a pro tah za ohybu $\alpha_{t,fl} = f_{a,ax} / f_{t,fl} = 0,7$.

Zkouška v příčném tahu je zkouškou poměrně jednoduchou a rychlou. Jejím nedostatkem je, že pevnost je prokazována v předem stanoveném průřezu. Proto by její využití mělo sloužit při návrzích složení vláknobetonových směsí a na stavbě k orientačnímu posouzení shody.

Pro zkoušení vláknobetonů ohybem jsou užívány tři varianty sestavy zkoušek. Rovněž je používán odlišný postup zatěžování zkušebního tělesa od postupu zatěžování obvyklého betonu dle ČSN EN 12390 – 5. V případě zkoušky obvyklého betonu je

zatěžování břemenem řízeno plynulým přírůstkem síly, která má vyvíjet v betonu konstantní přírůstek napětí v tahu v rozsahu $0,04-0,06 \text{ N.mm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ až do porušení. Při zkoušení vláknobetonu ohybem je naopak zatěžování břemenem proměnné a je řízeno rychlostí průhybu tělesa. Typ zkoušky ovlivňuje hodnotu $\alpha_{t,fl}$ a nedosahuje vždy stejných výsledků pro pevnost v tahu za ohybu při vzniku trhliny $f_{t,tl}$.

Při čtyřbodovém zatěžování trámku není předem určen kritický průřez, ve kterém vznikne ohybová trhlina.



Obr. 6: čtyřbodové zatěžování trámku

Pro zkoušení vláknobetonu v tahu ohybem dle této varianty jsou dostupné čtyři postupy:

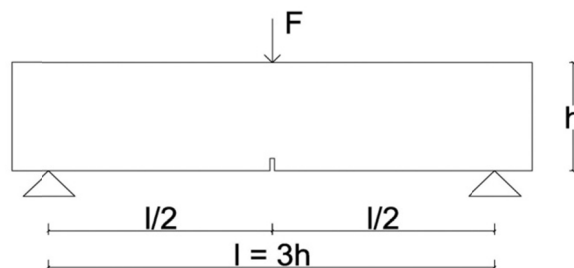
- v ČR dle TP FC 1-1;
- v Rakousku dle Richtlinie Faserbeton;
- v SRN dle DVB Merkblatt;
- v Evropě pro zkoušení pouze stříkaného vláknobetonu dle ČSN EN 14488 - 3

Uvedené postupy se liší ve velikosti zkušebního tělesa, vzdálenosti podpor, vzdálenosti břemen F a rychlosti zatěžování.

Tab. 2: Porovnání odlišností zkoušek (zdroj: Beton 2/2010)

	rozměry těles	vzdálenost podpor	vzdálenost břemen	rychlost zatěžování
	b x h x l	l [mm]	h [mm]	[mm průhybu/min]
TP FC 1-1	150x150x700	600	200	0,01 do průhybu 0,2 mm
				0,2 do přírůstku průhybu 6 mm
				0,5 do přírůstku průhybu 10 mm
				nebo alternativně průměrně $0,2 \pm 0,05$
Richtlinie Faserbeton	150x150x600 až700	450	150	$0,2 \pm 0,03$
DBV Merkblatt	150x150x700	600	200	průměrně 0,2
ČSN EN 14488 - 3	75x125x500 a více	375	125	$0,25 \pm 0,05$ do průhybu 0,5 mm
				dále do průhybu 4 mm nebo do zlomení

Další zkouška je tříbodový ohyb dle ČSN EN 14845 – 2.



Obr. 7: Tříbodové zatěžování trámku se zářezem

Předmětem této normy je však zkušební metoda pro stanovení vlivu ocelových nebo polymerových vláken na zbytkovou pevnost v tahu ohybem referenčního betonu. Dle této normy se zkouší několik záměsů referenčního betonu s různými dávkami stejných vláken, aby bylo možno stanovit obsah vláken, který je potřebný k dosažení zbytkové pevnosti v tahu ohybem min. 1,5 MPa a při šířce rozevření trhliny (CMOD) 0,5 mm (odpovídá středovému průhybu 0,47mm) a průměrné zbytkové pevnosti v tahu ohybem min 1 MPa při šířce rozevření trhliny 3,5 mm (odpovídá středovému průhybu 3,02mm). Norma je určena pro zkoušení vláken a jejich minimální množství ve vláknobetonu, aby bylo dosaženo uvedených hodnot pevností a průhybu. Zkouška nemůže sloužit pro zjišťování charakteristik vláknobetonu různého složení (cement, kamenivo, přísady, příměsi atd.) potřebných pro návrh konkrétních vláknobetonů pro konkrétní konstrukci a to ani z důvodu způsobu jejího vyhodnocení. Dále je pro zkoušku tříbodovým ohybem vydána evropská norma ČSN EN 14651+A1, která stanovuje zkušební metodu pro určení meze úměrnosti a hodnoty zbytkové pevnosti v tahu za ohybu u betonu vyztuženého kovovými vlákny do délky 60 mm a u betonu s kovovými vlákny kombinovanými s jinými vlákny.

Výsledky potřebného počtu zkoušek vláknobetonu jsou následně použity k zatřídění vláknobetonu dle:

- pevnostní třídy vláknobetonu v tlaku;
- pevnostní třídy vláknobetonu v tahu na mezi vzniku makrotrhliny;
- pevnostní třídy vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny.

[11]

CÍLE PRÁCE

Tato práce je primárně zaměřena na ověření vlivu typu a množství drátků a druhu kameniva na požadované vlastnosti betonu. Hlavní cíle lze rozdělit na teoretické, praktické a statické následovně:

A. Teoretická část:

- složení a vlastnosti betonu;
- výroba a možnosti využití různých typů vláken;
- porovnání prostého betonu s vláknobetonem;
- zkoušení konstrukčního vláknobetonu.

B. Praktická část:

- vyhodnocení nedestruktivního zkoušení drátkobetonu;
- vyhodnocení dynamického a statického modulu pružnosti;
- praktické ověření vlivu na pevnost v tlaku;
- praktické ověření na pevnost v příčném tahu a na hranolovou pevnost;
- praktické ověření vlivu na pevnost v tahu za ohybu.

C. Statická část:

- vytvoření diagramů odolnosti normových zkušebních trámců;
- vyhodnocení charakteristického diagramu odolnosti;
- odvození charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu.

D. Ekonomická část:

- porovnání jednotkové ceny prostého betonu, vláknobetonu a betonu vyztuženého KARI sítí.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1 Metodika experimentální práce

Cílem experimentální práce bylo na základě zjištěných poznatků navrhnout a ověřit recepturu s co nejlepšími vlastnostmi, zejména co se týče pevnosti v tahu ohybem.

Beton byl připravován v laboratoři Cemex s.r.o. Z důvodu časové náročnosti a kapacity chladicího zařízení, do kterého byly zkušební tělesa po odformování ukládány, se muselo betonovat celkem v 17 etapách (celkem se připravilo 33 různých typů záměsí). Při každé z etap bylo vyrobeno 8 krychlí 150 x 150 x 150 mm, 8 zkušebních trámců 100 x 100 x 400 mm a 6 zkušebních trámců 150 x 150 x 700 mm. Seznam všech typů záměsí je následující:

Těžené kamenivo:

- C 16/20
- C 16/20 + 20(25, 30)kg drátků DE 50/1,0 N
- C 20/25
- C 20/25 + 20(25, 30)kg drátků DE 50/1,0 N
- C 25/30
- C 25/30 + 20(25, 30)kg drátků DE 50/1,0 N
- C 30/37
- C 30/37 + 20(25, 30)kg drátků DE 50/1,0 N
- C 16/20 + 20(25, 30)kg drátků DE 50/1,0 M
- C 20/25 + 20(25, 30)kg drátků DE 50/1,0 M
- C 25/30 + 20(25, 30)kg drátků DE 50/1,0 M
- C 30/37 + 20(25, 30)kg drátků DE 50/1,0 M

Drcené kamenivo:

- C 25/30
- C 25/30 + 20(25, 30)kg drátků DE 50/1,0 N
- C 25/30 + 20(25, 30)kg drátků DE 50/1,0 M

Pro porovnání pevnosti v tahu ohybem drátkobetonu byly na závěr ještě vybetonovány tři sady trámců s KARI sítí.

KARI síť byly nařezány na pásy o rozměrech 140 x 690 mm. Abychom zajistili dostatečné krytí betonu, byly použity distanční podložky zajišťující krytí 30 mm.

Po přesném navážení jednotlivých složek betonu do připravovaných nádob byl beton míchán v laboratorní míchačce podle následujícího postupu:

- 2 min – míchání (všechno kamenivo + $\frac{1}{2}$ záměsové vody);
- 2 min – klid;
- 30 sec – přidání cementu a příměsí;
- 30 sec – přidání zbývající záměsové vody a přísad;
- 2 min – míchání.

U každé receptury byly po jejím zamíchání provedeny zkoušky měření konzistence metodou sednutí kužele a zkouškou rozlitím a dále byl změřen obsah vzduchu. Po provedení těchto zkoušek byla vyrobena následující zkušební tělesa:

- 4 krychle o rozměrech 150 x 150 x 150 mm na zkoušky pevnosti v tlaku a pevnosti v příčném tahu;
- 4 trámce o rozměrech 100 x 100 x 400 mm na zkoušky hranolové pevnosti a určení statického modulu pružnosti;
- 3 trámce o rozměrech 150 x 150 x 700 mm na zkoušku pevnosti v tahu za ohybu.

Tato zkušební tělesa byla po odformování uložena ve vodním prostředí. Veškeré zkoušky na vzorcích byly prováděny ve stáří betonu 28 dní.

Naměřené hodnoty a výsledky byly následně porovnány a vyhodnoceny. Z důvodu velkého množství dat jsou v této části diplomové práce vyhodnoceny jen sady pevnostní třídy C 25/30. Ostatní výsledky jsou uvedeny v příloze diplomové práce.

2 Použité suroviny

2.1 Cement

Pro všechny receptury byl použit cement CEM I 42,5 R z produkce Cemex s.r.o. z cementárny Dětmarovice. Portlandský cement obsahuje pouze portlandský slínek, může obsahovat maximálně 5 % doplňujících složek.

Cement je vyráběn v souladu s evropskou normou ČSN EN 197 –1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití.

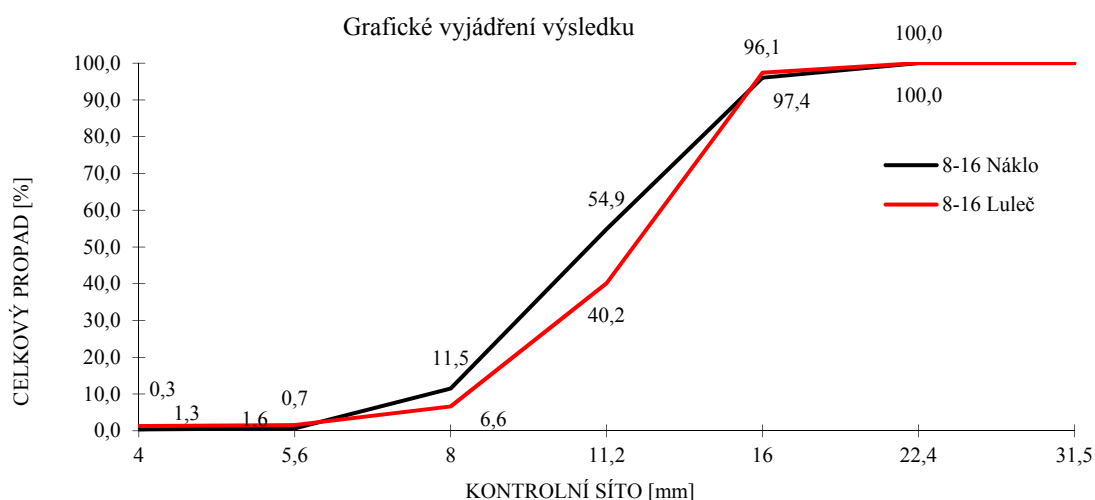
2.2 Kamenivo

Na výrobu zkušebních vzorků byly použity tři frakce kameniva. Frakce 0-4 byla vždy z pískovny Zaječí. Frakce 8-16 a frakce 11-22 byly ze štěrkovny Náкло pro zkoušení vlastností těžného kameniva, pro zkoušení vlastností kameniva drceného bylo použito materiálu z kamenolomu Luleč.

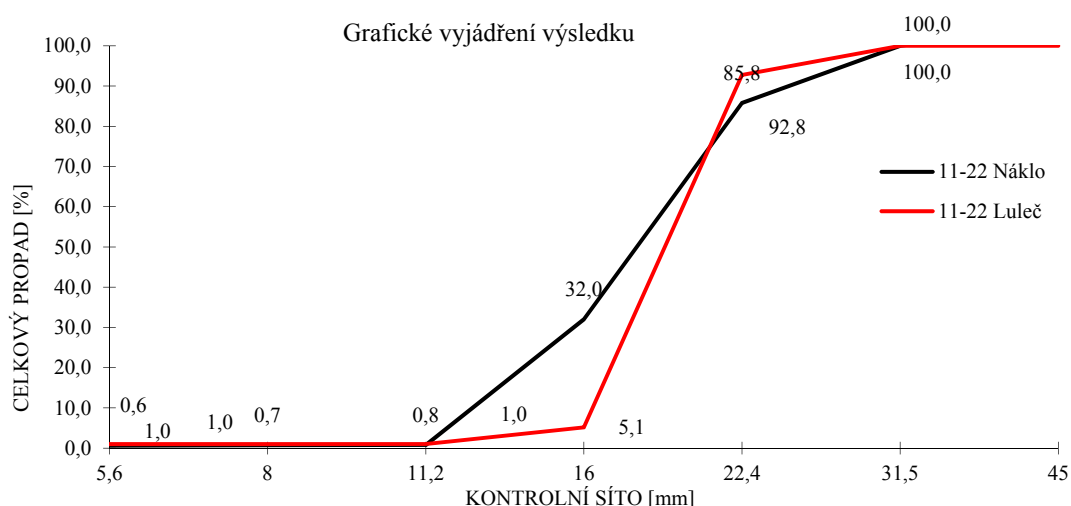
Kamenivo je vyráběno v souladu s evropskou normou ČSN EN 12 620 Kamenivo do betonu.

Na všech frakcích kameniva byl proveden síťový rozbor dle ČSN EN 933 - 1, určena vlhkost dle ČSN EN 1097 - 5, tvarový index dle ČSN EN 933 - 4 a objemová hmotnost dle ČSN EN 1097 - 6.

Protokoly o zkouškách kameniva jsou v příloze diplomové práce.



Graf 1: Porovnání křivek zrnitosti (těžené x drcené kamenivo)



Graf 2: Porovnání křivky zrnitosti (těžené x drcené kamenivo)

2.3 Popílek

Na výrobu zkušebních těles byl použit popílek z elektrárny Dětmorovice. Elektrárna Dětmorovice je součástí elektrárenské společnosti ČEZ, a.s. Spalováním směsi černouhelného a hnědouhelného prachu vyrábí jako vedlejší produkt popílek pro stavební účely v objemu cca 200 000 t ročně a strusku v objemu cca 20 000 t ročně.

Popílký produkované ČEZ, a.s. jsou certifikovanými stavebními výrobky pro následující způsob použití, pro který jsou garantovány následující vlastnosti:

Popílek do betonu dle ČSN EN 450 - 1:

Tab. 3: Vlastnosti použitého popílku

vlastnost	
ztráta žíháním	max. 5 % hm.
obsah chloridů	max. 0,1 % hm.
obsah oxidu sírového	max. 3 % hm.
obsah volného oxidu vápenatého	max. 2,5 % hm.
aktivní oxid vápenatý	max. 10 % hm.
jemnost (zbytek na síť 0,045 mm)	max. 40 %
index účinnosti po 28 dnech	min. 75 %
index účinnosti po 90 dnech	min. 85 %
měrná hmotnost	$\pm 200 \text{ kg/m}^3$
objemová stálost	max. 10 mm
hmotnostní aktivita Ra_{226}	max. 300 Bq/kg
index hmotnostní aktivity	max. 2,0

2.4 Drátky

Ve všech recepturách byly použity drátky německé firmy KrampeHarex s.r.o. Zadavatel diplomové práce uvedl požadavek maximálního množství drátků z důvodu čerpatelnosti betonu. Dávkování bylo tedy zvoleno 20 kg – 25 kg – 30 kg.

Tab. 4: Vybrané vlastnosti typů drátků

označení	délka	průměr	materiál	Pevnost v tahu
DE 50/1,0 N	50 ± 10%	1,00 ± 10%	C7D	1100 ± 15%
DE 50/1,0 M			C9D	1400 ± 15%



Obr. 8: použité drátky DE 50/1,0 N

2.5 KARI síť

Pro experimentální porovnání pevností v tahu ohybem byly použity svařované sítě od společnosti Feron a.s. Použité sítě do betonu odpovídají dávkování 20 – 25 – 30 kg vláken:

- svařovaná síť z ocel. drátů žebírkových tvářených za studena, typ KA16, KARI 4 mm, oko 100x100 mm;
- svařovaná síť z ocel. drátů žebírkových tvářených za studena, typ KD35, KARI 5 mm, oko 100x100 mm;
- svařovaná síť z ocel. drátů žebírkových tvářených za studena, typ KH30, KARI 6 mm, oko 100x100 mm.



Obr. 9: příprava zkušebních těles

3 Použité receptury

Pro experimentální testování byly použity tyto dvě následující referenční receptury:

Tab. 5: Referenční receptura na m³ betonu

třída betonu	CEM I 42,5 R	JMS	popílek	DTK 0-4	typ kameniva	HDK 8-16	HDK 11-22	příísada	voda
C 25/30	260	50	30	860,2	drcené	536,4	425	2,64	178
C 25/30	260	50	30	860,2	těžené	521,2	409,9	2,64	178

Referenční betonová směs je certifikována jako konstrukční beton dané třídy, který se běžně používá na stavbách.

Další receptury měly stejný obsah JMS a popílku, ostatní použité suroviny se měnily v závislosti na množství použitých drátků a na typu kameniva.

Tab. 6: Receptura obsahující drcené kamenivo na m³ betonu (drátky typu N i M)

třída betonu	množství drátků	CEM I 42,5 R	JMS	popílek	DTK 0-4	HDK 8-16	HDK 11-22	příísada	voda
C 16/20	20	220	50	30	890	530	425	2,30	180
	25						420		181
	30						415		182
C 20/25	20	240	50	30	870	530	425	2,47	181
	25						420		182
	30						415		183
C 25/30	20	260	50	30	850	530	425	2,64	182
	25						420		183
	30						415		184
C 30/37	20	280	50	30	845	540	435	2,23	174
	25						430		175
	30						425		176

Tab. 7: Receptura obsahující těžené kamenivo na m³ betonu

třída betonu	množství drátků	CEM I 42,5 R	JMS	popílek	DTK 0-4	HDK 8-16	HDK 11-22	příísada	voda
C 25/30 typ N	20	260	50	30	850	515	410	2,64	182
	25						405		183
	30						400		184
C 25/30 typ M	20	260	50	30	850	515	410	2,64	182
	25						405		183
	30						400		184

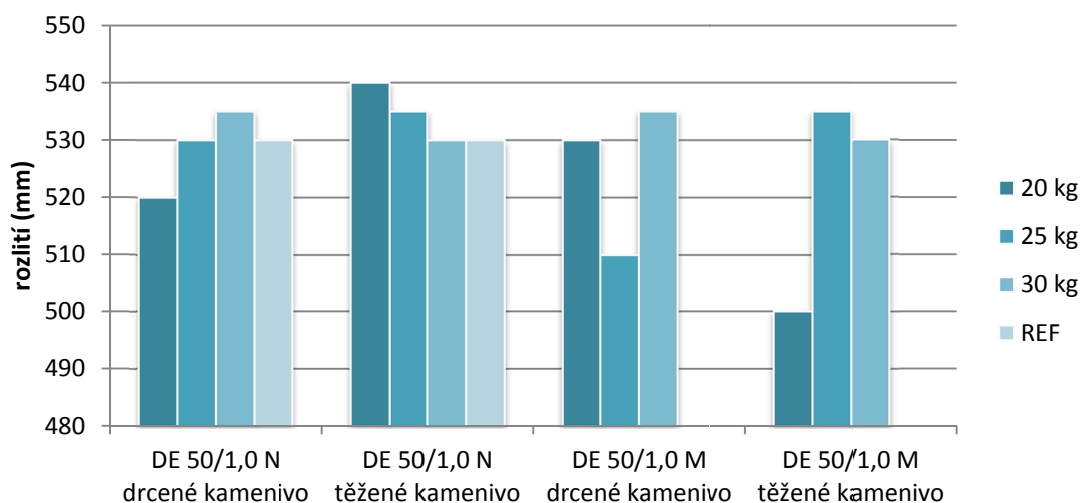
4 Zkoušení čerstvého betonu

4.1 Zkouška rozlitím

Střásací stolek je nutné umístit na vodorovnou plochu. Na vlhký podklad střásacího stolku se postaví zevnitř zvlhčená forma kužele. Forma se postupně naplní 2 vrstvami čerstvého betonu. Každá z nich se vyrovná desetinásobným dusáním předepsaným dusadlem. Jeho pomocí se poté srovná povrch betonu s hranou formy. Z povrchu stolku se odstraní zbytky betonu a forma se po 30 sekundách vyzdvihne. Vzniklý kužel se volným pádem pohyblivé části střásacího stolku rozlévá. Volný pád horní desky je dán vzdáleností dvou zarážek (40 mm) a opakuje se 15krát s frekvencí 2-5 sekund. Průměr rozlití betonu se měří ve dvou na sobě kolmých směrech. Naměřená hodnota se zaokrouhlí na 10 mm. Na rozlitém betonu se též posuzuje případná segregace. [6]

Tab. 8: rozlití čerstvého betonu

třída betonu	drátky	rozlití (mm)
C 25/30 drcené kamenivo drátky typu N	20	520
	25	530
	30	535
	REF	550
C 25/30 drcené kamenivo drátky typu M	20	540
	25	535
	30	530
C 25/30 těžené kamenivo drátky typu N	20	530
	25	510
	30	535
	REF	530
C 25/30 těžené kamenivo drátky typu M	20	500
	25	535
	30	530



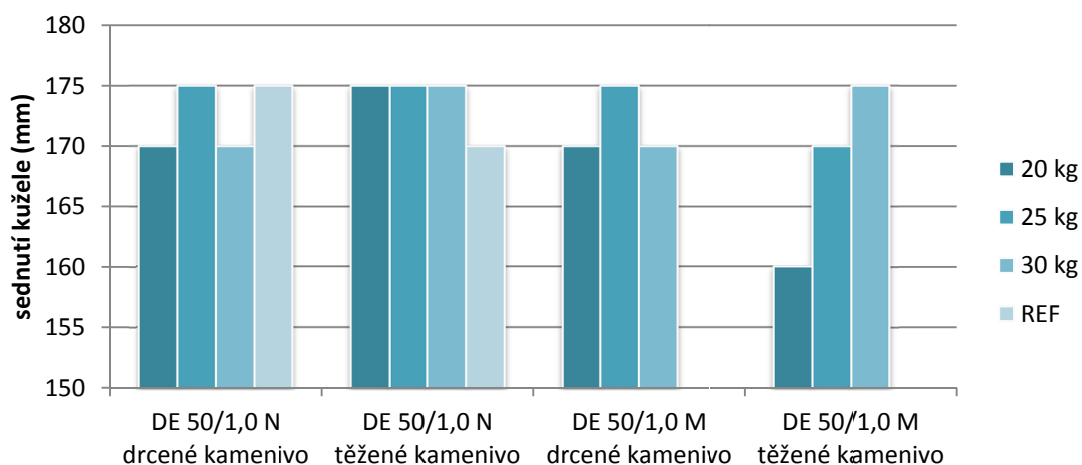
Graf 3: Porovnání výsledků zkoušky rozlitím

4.2 Zkouška sednutí kužele (Abramsův kužel)

Na vlhkou podložku se postaví zevnitř zvlhčená forma kužele. Forma se postupně naplní třemi vrstvami čerstvého betonu. Každá z nich se hutní 25 vpichy propichovací tyčí. Poté se odstraní přebytek betonu a povrch se srovná do roviny s formou valovým pohybem propichovací tyče. Z podložky se odstraní zbytky betonu. Forma se vyzdvihne tak, aby nebyla ovlivněna zkouška. Forma se nesmí v průběhu zdvihání nikterak usměrňovat, případně podpírat sesedající beton vně formy. Výsledkem zkoušky je rozdíl výšky sednutého kužele betonu měřeného v nejvyšším bodě oproti výšce formy kužele. Vhodnost metody sednutí je dána tvarem sednutého kužele po zkoušce. Pokud je část betonu kužele usmýknutá, je třeba zkoušku opakovat z jiného vzorku, případně zvolit jinou metodu zkoušení konzistence. [6]

Tab. 9: Výsledky zkoušky sednutí čerstvého betonu

třída betonu	drátky	sednutí (mm)
C 25/30 drcené kamenivo drátky typu N	20	170
	25	175
	30	170
	REF	175
C 25/30 drcené kamenivo drátky typu M	20	175
	25	175
	30	175
C 25/30 těžené kamenivo drátky typu N	20	170
	25	165
	30	175
	REF	170
C 25/30 těžené kamenivo drátky typu M	20	160
	25	170
	30	175



Graf 4: Vyhodnocení zkoušky sednutí čerstvého betonu

4.3 Stanovení obsahu vzduchu – tlaková metoda

Nádoba na vzorek se zcela naplní betonem ve čtyřech stejných vrstvách, z nichž každá se zhutní 10 krátkými údery dusadla. Povrch se zarovná s horním okrajem nádoby. Vnější část nádoby na vzorek se očistí a osuší a víko se pomocí svorek dobře připevní k nádobě. Vyrovnávací ventil mezi vzduchovou komorou a nádobou se uzavře. Prostor pod víkem a nad betonem se naplní vodou, dokud se nevytlačí všechn vzduch, což poznáme tak, že druhým ventilem začne vytékat voda. Do připojené vzduchové komory se natlačí vzduch, oba ventily se uzavřou a otevře se vyrovnávací ventil mezi vzduchovou komorou a nádobou na vzorek. Po dosažení rovnovážného stavu se z kalibrovaného tlakoměru odečte obsah vzduchu. [6]

Tab. 10: Výsledky zkoušek čerstvého betonu

třída betonu	drátky	obsah vzduchu (%)
drcené kamenivo DE 50/1,0 N	30 kg	2,7
	REF	2,4
drcené kamenivo DE 50/1,0 M	30 kg	1,8
těžené kamenivo DE 50/1,0 N	30 kg	2,6
	REF	2,4
těžené kamenivo DE 50/1,0 M	30 kg	2,3

5 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je stanovena na tělesech tvaru krychle o velikosti hrany 150 mm. Velikost krychle ovlivňuje hodnotu pevnosti. Čím větší je zkušební těleso, tím je stanovena hodnota pevnosti menší.

Těleso musí být uloženo do zkušebního lisu tak, aby tlak zkušebního zařízení působil kolmo na směr hutnění.

Výsledek zkoušky je významně ovlivněn třením ve styčné spáře mezi zkušebním tělesem a tlačnou plochou zkušebního lisu. Třecí síla brání možnosti volné příčné deformace ve směru kolmém na působící tlakovou sílu. Působí tedy jako síla, která zpevňuje oblast zkušebního tělesa v dotyku s čelistmi lisu. Tato okolnost je příčinou cca 20–30% nárůstu pevnosti oproti takovému uspořádání zkoušky, při kterém by bylo tření ve styčné ploše eliminováno. Rovněž geometrický tvar plochy porušení se značně mění, je-li tření odstraněno. Krychle se při klasickém uspořádání poruší ve tvaru dvoukruželové či dvou jehlanové plochy, zatímco při vyloučení třecí síly se tatáž krychle poruší osnovou prakticky svislých trhlin.

Za krychelnou pevnost se dle ČSN EN 206 - 1 považuje hodnota tlakového napětí odvozená z velikosti maximální síly zaznamenané při zkoušce ve zkušebním lisu a velikosti vodorovného řezu krychle při jejím zkoušení. [3]

Pro informativní výpočet pevnosti hutného betonu potřebujeme rychlost šíření ultrazvuku z trojrozměrného prostředí. Informativní pevnost betonu vypočteme jako

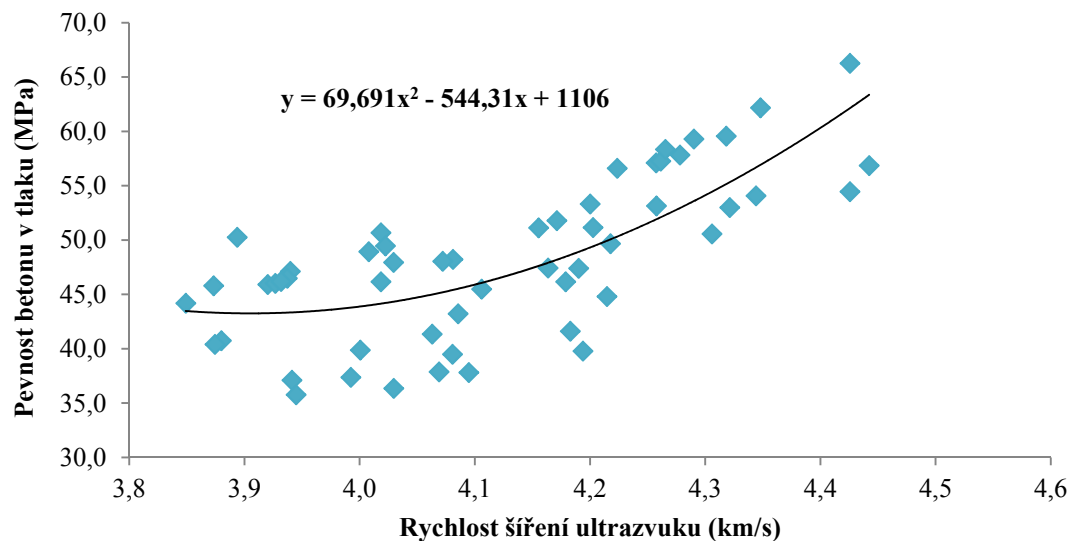
$$R_{be}=9,9.v_{13}^2-56.v_{13}+87,8$$

kde R_{be} je pevnost betonu;

v_{13} je rychlost šíření ultrazvuku v trojrozměrném prostředí.

Tento vzorec pro výpočet informativní pevnosti betonu v tlaku z ČSN 73 1371 byl vytvořen přibližně před 30 lety, pevnost v tlaku již neodpovídá současným betonům, protože hodnoty vychází poměrně nízké. [5]

Z tohoto důvodu byla vytvořena v rámci diplomové práce nová závislost mezi námi naměřenou pevností v tlaku a rychlostí šíření ultrazvuku.



Graf 5: Informativní pevnost betonu v tlaku

Pevnost v tlaku byla zkoušena dle evropské normy ČSN EN 12 390 – 3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Zkouška byla provedena na zkušebních vzorcích o rozměrech 150 x 150 x 150 mm na laboratorním zkušebním lise.

Objemová hmotnost byla stanovena podle evropské normy ČSN EN 12 390 – 7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Tab. 11: Výsledky pevnosti betonu v tlaku (drcené kamenivo + drátky N)

C 25/30 DE 50/1,0 N drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	Objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
C 25/30 20kg	150,1	150,5	150,6	7790,0	2 290	1144,4	50,6	48,0
C 25/30 20kg	150,4	151,0	151,6	7813,0	2 269	1135,4	49,8	
C 25/30 20kg	150,1	150,8	150,5	7840,0	2 302	1101,9	48,8	
C 25/30 25kg	150,1	150,2	150,6	7789,0	2 296	1142,5	50,6	48,9
C 25/30 25kg	150,5	150,1	151,8	7785,0	2 270	1144,2	50,1	
C 25/30 25kg	150,3	150,2	149,9	7750,0	2 291	1112,1	49,4	
C 25/30 30kg	150,2	150,1	151,1	7971,0	2 340	1089,1	48,0	43,7
C 25/30 30kg	150,3	150,5	150,7	7896,0	2 318	1035,4	45,7	
C 25/30 30kg	150,5	150,3	151,5	7863,0	2 295	1033,6	45,3	
C 25/30	150,5	150,3	150,1	7815,0	2 302	1044,5	46,2	45,8
C 25/30	150,4	150,0	150,8	7742,0	2 277	1044,5	46,1	
C 25/30	150,6	150,0	151,2	7862,0	2 301	1046,8	46,0	

Tab. 12: Výsledky pevnosti betonu v tlaku (drcené kamenivo + drátky M)

C 25/30 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	Objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
C 25/30 20kg	150,6	150,7	151,5	7980,0	2 321	1167,0	51,1	50,9
C 25/30 20kg	150,5	150,6	150,5	8015,0	2 352	1169,0	51,6	
C 25/30 20kg	150,1	150,4	150,8	8015,0	2 354	1172,3	51,8	
C 25/30 25kg	150,5	150,4	150,9	7805,0	2 286	1196,2	52,7	52,4
C 25/30 25kg	150,2	150,3	150,1	7822,0	2 309	1197,8	53,1	
C 25/30 25kg	149,9	149,9	149,1	7798,0	2 326	1192,1	53,3	
C 25/30 30kg	149,9	150,1	150,0	7798,0	2 311	1147,6	51,0	49,1
C 25/30 30kg	150,4	150,3	149,4	7790,0	2 307	1116,1	49,7	
C 25/30 30kg	150,1	149,2	149,9	7854,0	2 340	1149,9	51,1	

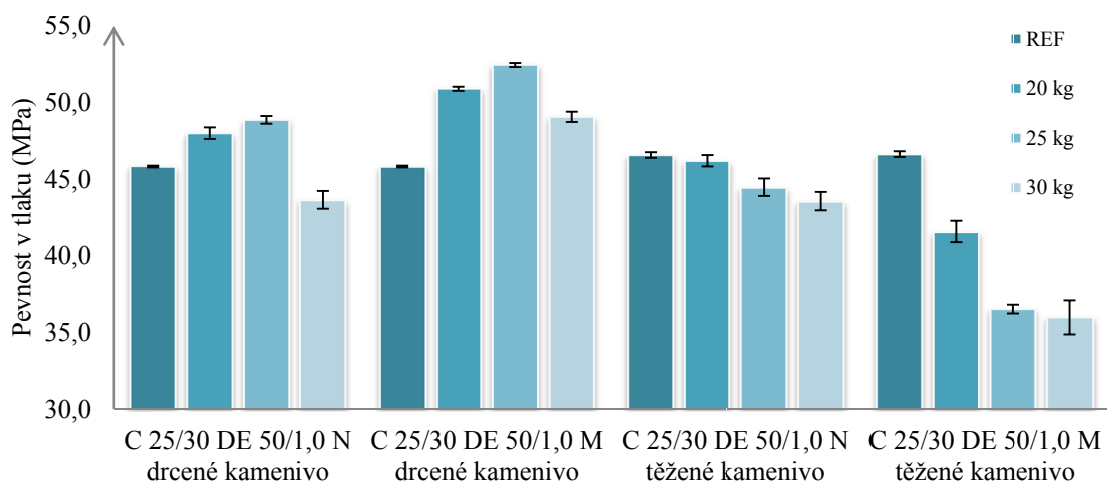
Tab. 13: Výsledky pevnosti betonu v tlaku (těžené kamenivo + drátky N)

C 25/30 DE 50/1,0 N těžené kamenivo	rozměry			hmotnost	Objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
C 25/30 20kg	150,2	150,3	151,0	7777,0	2 282	1069,5	47,2	46,2
C 25/30 20kg	150,1	150,1	150,9	7723,0	2 272	1107,8	48,9	
C 25/30 20kg	150,5	150,3	150,5	7725,0	2 271	1079,5	47,7	
C 25/30 25kg	150,0	150,1	150,2	7686,0	2 272	1030,7	45,7	44,5
C 25/30 25kg	150,4	150,2	149,8	7756,0	2 293	1093,1	48,5	
C 25/30 25kg	150,7	150,6	150,0	7569,0	2 224	1064,1	47,1	
C 25/30 30kg	150,2	150,0	150,4	7748,0	2 286	1076,0	47,6	43,6
C 25/30 30kg	150,3	150,9	149,9	7673,0	2 258	1007,7	44,7	
C 25/30 30kg	150,5	150,5	150,0	7698,0	2 266	1053,2	46,7	
C 25/30	150,3	150,2	150,2	7604,0	2 243	1081,0	47,9	46,6
C 25/30	150,4	150,2	150,9	7705,0	2 261	1066,4	47,0	
C 25/30	150,7	150,7	150,5	7709,0	2 257	1074,3	47,4	

Tab. 14: Výsledky pevnosti betonu v tlaku (těžené kamenivo + drátky N)

C 25-30 DE 50/1,0 M těžené kamenivo	rozměry			hmotnost	Objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
C 25/30 20kg	150,2	150,2	150,4	7872,0	2 320	1050,7	46,5	41,6
C 25/30 20kg	150,4	150,5	149,5	7770,0	2 296	969,1	43,1	
C 25/30 20kg	150,4	150,7	149,9	7825,0	2 304	1011,3	44,9	
C 25/30 25kg	150,3	150,0	149,9	7711,0	2 282	836,9	37,2	36,5
C 25/30 25kg	150,2	150,2	150,2	7765,0	2 291	869,9	38,6	
C 25/30 25kg	150,3	150,5	150,7	7760,0	2280	856,4	37,8	
C 25/30 30kg	150,0	150,0	152,1	7802,0	2 280	879,6	38,6	36,0
C 25/30 30kg	150,1	150,0	150,1	7844,0	2 323	990,1	44,0	
C 25/30 30kg	150,4	150,7	150,0	7802,0	2 296	920,5	40,8	

Vyhodnocení:



Graf 6: Přehledné vyhodnocení pevnosti betonu v tlaku

Charakteristická hodnota (5 % kvantil) byla vypočítána za předpokladu normálního rozdělení jako $X_c = m_x \cdot (1 - k_n \cdot V_x)$, kde k_n pro tři zkušební tělesa je 1,89.

Z grafu jasně vyplývá, že pevnost v tlaku je vyšší při použití kameniva drceného. S rostoucí dávkou vláken klesá pevnost, ale jen do okamžiku, než se z důvodu velké měrné plochy drátků vyčerpá většina pojiva. Při použití těženého kameniva s rostoucí dávkou vláken klesá pevnost v tlaku.

6 Pevnost v příčném tahu

Principiálně vychází ze skutečnosti, že při lokálně vneseném tlakovém napětí dojde dříve k porušení zkušebního tělesa od příčných tlakových napětí. Vnesení tlakové síly nepředstavuje žádný větší technický problém, i když i zde je třeba pečlivého osazení do zkušebního zařízení.

Zkouška je nejčastěji prováděna na zkušebních krychlích shodných s těmi, na kterých je zkoušena pevnost krychelná. Tato zkouška je doporučována řadou normových předpisů – ČSN EN 12 390 – 6, ČSN EN 73 2400, ČSN EN 206. [5]

Pevnost v příčném tahu je dána následujícím vztahem:

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

kde f_{ct} je pevnost v příčném tahu;

F je maximální zatížení;

L je délka dotykové přímky tělesa;

d je zvolený příčný rozměr tělesa.

V následujících tabulkách jsou uvedeny rozměry, objemové hmotnosti a výsledné průměrné pevnosti betonu v tlaku.

Tab. 15: Výsledky pevnosti betonu v příčném tahu (drcené kamenivo + drátky N)

C 25/30 DE 50/1,0 N drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost v př.tahu	pevnost v příčném tahu
	a_1	a_2	h	m	ρ	F	f_{ct}	průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
C 25/30 20kg	150,0	150,6	151,0	7845,0	2 301	110,3	3,10	3,45
C 25/30 20kg	150,0	150,8	150,5	7845,0	2 305	121,1	3,40	
C 25/30 20kg	150,8	150,2	150,1	7865,0	2 313	137,9	3,89	
C 25/30 25kg	150,4	150,1	150,1	7845,0	2 315	116,7	3,30	3,40
C 25/30 25kg	150,6	150,0	150,1	7805,0	2 302	109,8	3,10	
C 25/30 25kg	150,9	150,1	150,6	7842,0	2 298	138,1	3,90	
C 25/30 30kg	150,8	151,1	151,6	7852,0	2 273	132,9	3,70	3,90
C 25/30 30kg	150,7	150,1	151,2	7902,0	2 311	152,8	4,25	
C 25/30 30kg	150,4	150,1	150,5	7798,0	2 296	131,4	3,700	
C 25/30	150,4	150,1	150,0	7784,0	2 299	144,5	4,10	3,95
C 25/30	150,4	150,5	151,7	7802,0	2 274	135,6	3,80	
C 25/30	150,2	150,4	150,1	7795,0	2 300	138,7	3,90	

Tab. 16: Výsledky pevnosti betonu v příčném tahu (drcené kamenivo + drátky M)

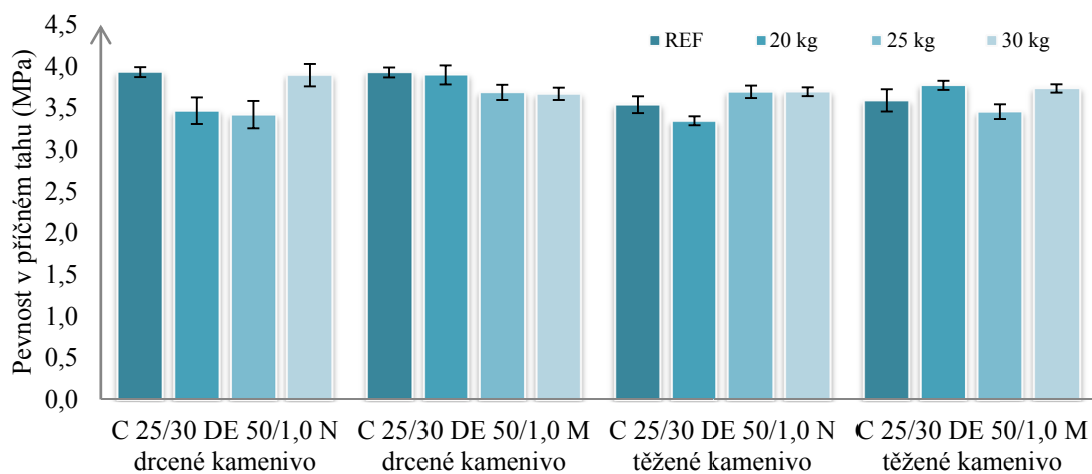
C 25/30 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost v př.tahu	pevnost v příčném tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F	f _{ct}	průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
C 25/30 20kg	150,3	150,2	151,5	8060,0	2 358	142,5	4,00	3,90
C 25/30 20kg	150,2	150,1	151,6	8050,0	2 355	147,3	4,10	
C 25/30 20kg	150,2	150,1	151,5	8069,0	2 362	127,9	4,60	
C 25/30 25kg	150,6	150,6	150,0	7881,0	2 316	131,4	3,70	
C 25/30 25kg	150,6	150,6	150,6	7842,0	2 298	122,9	3,45	3,70
C 25/30 25kg	150,1	150,4	150,5	7869,0	2 317	138,3	3,90	
C 25/30 30kg	150,6	150,1	149,8	7834,0	2 314	124,7	3,50	
C 25/30 30kg	150,7	150,6	150,8	7939,0	2 321	128,8	3,60	3,65
C 25/30 30kg	150,1	150,3	151,5	7905,0	2 312	138,3	3,85	

Tab. 17: Výsledky pevnosti betonu v příčném tahu (těžené kamenivo + drátky N)

C 25/30 DE 50/1,0 N těžené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost v př.tahu	pevnost v příčném tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F	f _{ct}	průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
C 25/30 20kg	150,0	150,1	151,9	7720,0	2 258	114,5	3,20	3,35
C 25/30 20kg	149,8	149,8	149,9	7753,0	2 303	122,2	3,45	
C 25/30 20kg	150,1	150,1	149,8	7728,0	2 289	118,9	3,35	
C 25/30 25kg	150,3	150,1	150,6	7736,0	2 278	138,6	3,90	3,70
C 25/30 25kg	150,1	150,2	149,5	7748,0	2 299	125,3	3,55	
C 25/30 25kg	150,5	150,2	150,8	7739,0	2 271	128,9	3,60	
C 25/30 30kg	150,2	150,0	150,5	7735,0	2 281	126,5	3,55	3,70
C 25/30 30kg	150,1	150,3	150,1	7678,0	2 266	135,4	3,80	
C 25/30 30kg	150,5	150,8	150,5	7718,0	2 259	131,3	3,70	
C 25/30	150,4	150,6	150,4	7665,0	2 250	132,3	3,70	3,55
C 25/30	150,1	150,3	149,8	7674,0	2 271	115,0	3,25	
C 25/30	151,0	150,9	150,8	7680,0	2 235	129,8	3,65	

Tab. 18: Výsledky pevnosti betonu v příčném tahu (těžené kamenivo + drátky M)

C 25/30 DE 50/1,0 M těžené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost v př.tahu	pevnost v příčném tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F	f _{ct}	průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
C 25/30 20kg	150,4	149,8	150,5	7786,0	2 297	139,2	3,90	3,75
C 25/30 20kg	150,0	149,9	149,7	7836,0	2 328	131,7	3,75	
C 25/30 20kg	150,9	151,0	150,8	7798,0	2 270	130,7	3,65	
C 25/30 25kg	151,1	150,2	150,8	7827,0	2 287	128,0	3,60	3,45
C 25/30 25kg	150,1	149,9	150,1	7704,0	2 281	113,4	3,20	
C 25/30 25kg	150,8	151,0	150,9	7825,0	2 278	127,8	3,60	
C 25/30 30kg	150,4	150,2	151,0	7854,0	2 301	138,0	3,85	3,75
C 25/30 30kg	150,2	150,1	151,3	7792,0	2 283	129,8	3,65	
C 25/30 30kg	151,0	150,8	150,5	7825,0	2 285	131,7	3,70	



Graf 7: Přehledné vyhodnocení pevnosti betonu v příčném tahu

Z grafu je zřejmé, že mezi hodnotami není žádný výrazný rozptyl, nezávisí tedy na použitém kamenivu, ani na množství a typu vláken.

7 Hranolová pevnost

Stanovuje se obvykle na hranolech o rozměru 100 x 100 x 400 mm. Hranol se poruší osnovou svislých trhlin v jeho střední části, protože ta již není ovlivněna zpevněním třecí silou v blízkosti dotyku s čelistmi zkušebního lisu. Hodnota hranolové pevnosti je cca 70–85% pevnosti krychelné. [3]

Tab. 19: Výsledky zkoušek hranolové pevnosti (drcené kamenivo + drátky N)

C 25/30 DE 50/1,0 N drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	hranolová pevnost
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F	
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]
C 25/30 20kg	101,4	99,9	399,5	9410	2 325	467,1	46,1
C 25/30 25kg	101,6	101,1	400,0	9335	2 271	452,7	44,1
C 25/30 30kg	101,9	101,1	401,8	9553	2 309	437,7	42,5
C 25/30 REF	101,0	101,2	400,7	9519	2 325	537,7	52,6

Tab. 20: Výsledky zkoušek hranolové pevnosti (drcené kamenivo + drátky M)

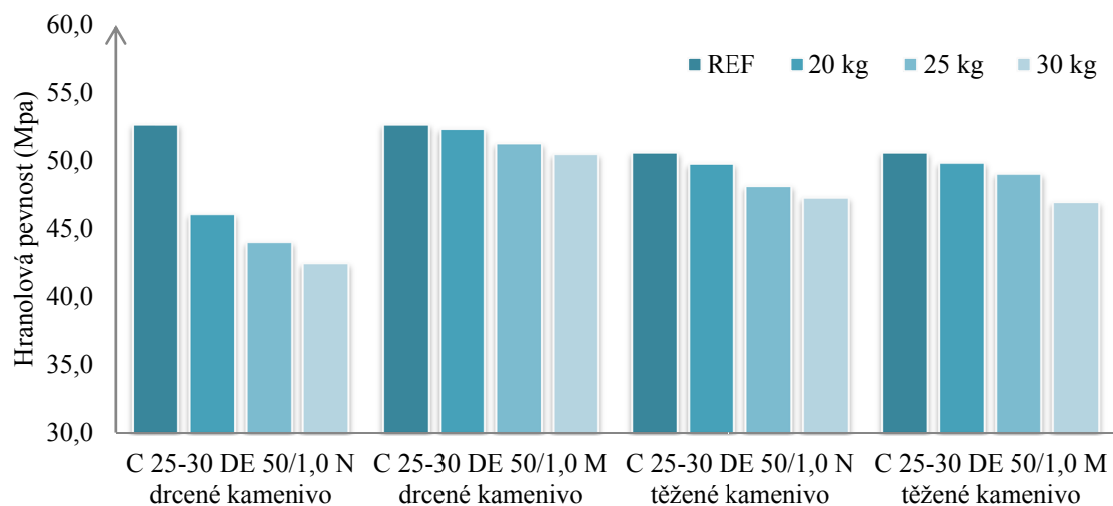
C 25/30 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	hranolová pevnost
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F	
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]
C 25/30 20kg	101,2	101,9	400,0	9680,0	2 346	539,5	52,3
C 25/30 25kg	100,4	100,7	401,4	9412,0	2 318	518,3	51,2
C 25/30 30kg	100,9	101,5	399,9	9419,0	2 301	516,4	50,5
C 25/30 REF	101,0	101,2	400,7	9519	2 325	537,7	52,6

Tab. 21: Výsledky zkoušek hranolové pevnosti (těžené kamenivo + drátky N)

C 25/30 DE 50/1,0 N těžené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	hranolová pevnost
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F	
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]
C 25/30 20kg	101,1	100,5	400,0	9338,0	2 297	505,8	49,8
C 25/30 25kg	100,0	101,2	400,0	9303,0	2 300	486,8	48,1
C 25/30 30kg	100,4	100,1	400,0	9279,0	2 308	475,3	47,3
C 25/30 REF	100,5	100,6	400,0	9194,0	2 274	511,1	50,6

Tab. 22: Výsledky zkoušek hranolové pevnosti (těžené kamenivo + drátky M)

C 25/30 DE 50/1,0 M těžené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	hranolová pevnost
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F	
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]
C 25/30 20kg	100,2	101,3	400,0	9336,0	2 298	506,1	49,8
C 25/30 25kg	100,6	101,9	400,0	9383,0	2 287	502,9	49,0
C 25/30 30kg	100,6	102,7	400,0	9454,0	2 289	485,0	47,0
C 25/30 REF	100,5	100,6	400,0	9194,0	2 274	511,1	50,6



Graf 8: Grafické zobrazení výsledků zkoušek hranolové pevnosti

Z grafu je zřejmé, že s rostoucí dávkou vláken, klesá hranolová pevnost. Typ použitých vláken, ani typ kameniva nemá na výslednou hranolovou pevnost velký vliv.

8 Dynamický modul pružnosti

Modul pružnosti betonu je důležitou materiálovou charakteristikou tohoto stavebního materiálu při navrhování betonových konstrukcí. S jeho rostoucí hodnotou se zmenšují deformace betonu, což je důležité při náročných inženýrských konstrukcích. Všeobecně platí, že jeho hodnota narůstá s rostoucí hodnotou pevnosti betonu, tato závislost ovšem není lineární. Hodnotu modulu pružnosti ovlivňuje především kvalita jeho složek, jejich vzájemný poměr a pevnost spojení mezi zrnem kameniva a cementovým tmelem. Výsledná hodnota modulu pružnosti betonu se nachází mezi modulem pružnosti kameniva a modulem pružnosti cementového tmelu. [1]

8.1 Všeobecné údaje

Dynamický modul pružnosti betonu se určil pomocí dvou metod. První metoda je ultrazvuková, jež je založena na opakovaném vysílání ultrazvukových impulsů do zkoušeného materiálu a zjištění impulsové rychlosti. Modul pružnosti zjištěný pomocí UZ vlnění se značí E_{bu} . Hodnota dynamického modulu pružnosti se určí ze vztahu:

$$E_{bu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \cdot 10^{-6}$$

kde ρ je objemová hmotnost betonu;

v_L je impulzová rychlost podélného UZ vlnění;

k je součinitel rozměrnosti prostředí.

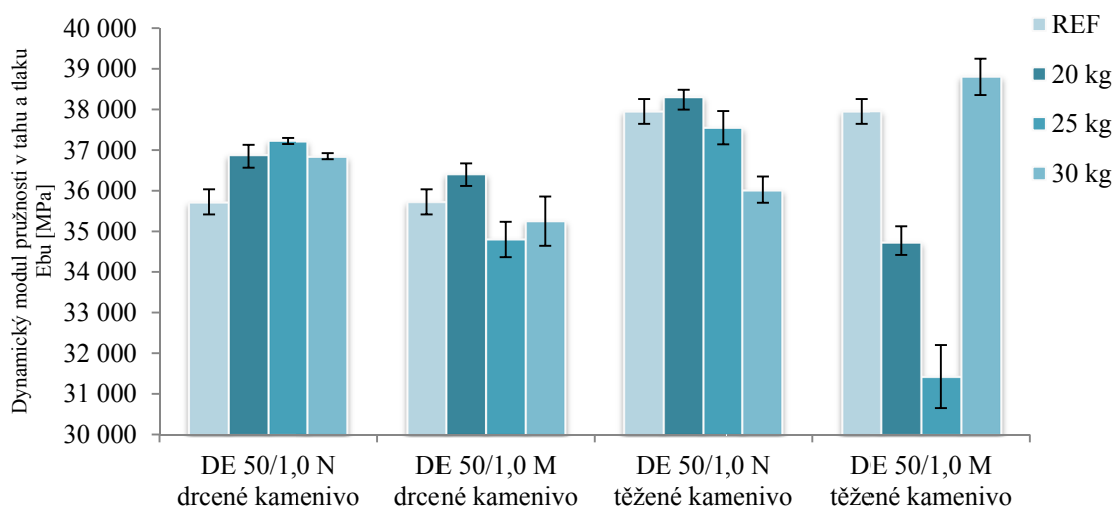
Druhá metoda je rezonanční. Každý předmět z tuhého materiálu se po mechanickém impulsu rozkmitá. Jako rezonance se označuje jev vzrůstu amplitudy vynucených kmitů zkoušeného tělesa na maximum (vlastní kmitočet), ke kterému dochází v případě, kdy kmitočet vnější budící síly je shodný s vlastním (rezonančním) kmitočtem tělesa. Modul pružnosti získaný tímto způsobem je E_{brL} (podélné kmitání) a E_{brF} (příčné kmitání). [5]

8.2 Metodika zkoušek

Trámce byly nejdříve změřeny. Určily se rozměry a hmotnost všech těles dle normy ČSN EN 12390 - 1. Poté se na zkušebních vzorcích určila pomocí přístroje TICO doba průchodu ultrazvukového vlnění. Následně byly stanoveny kmitočty podélného, příčného a kroutivého kmitání pomocí rezonanční metody.

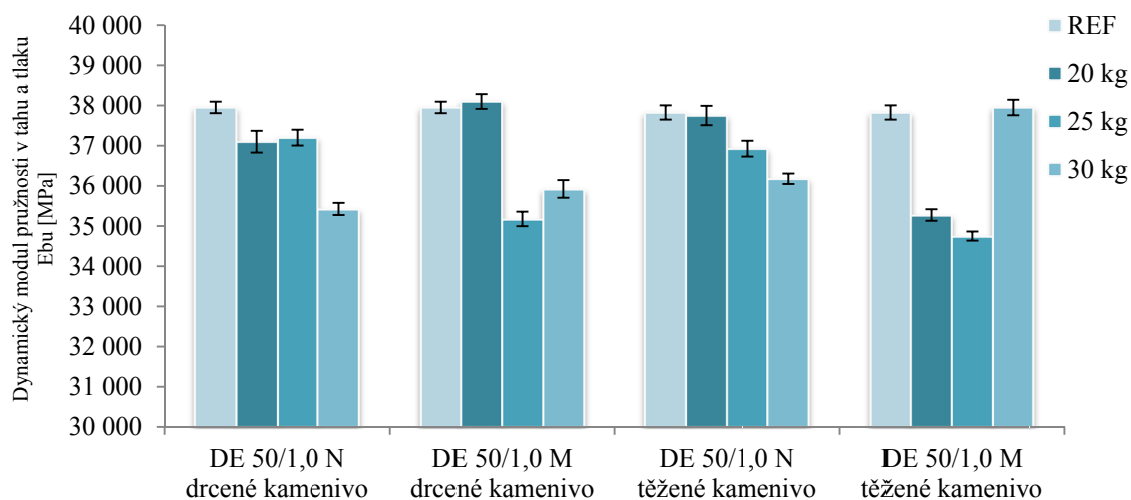
Dosažené výsledky dynamického modulu pružnosti betonu určené na hranolových zkušebních tělesech jsou zapsány v tabulkách v příloze diplomové práce.

Naměřené hodnoty byly zprůměrovány, byla vypočtena směrodatná odchylka a jsou znázorněny v následujících grafech.



Graf 9: Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{bu}

Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{brL} se vypočte z 1. vlastního kmitočtu podélného kmitání jako $E_{brL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho$



Graf 10: Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{brL} (podélné kmitání)

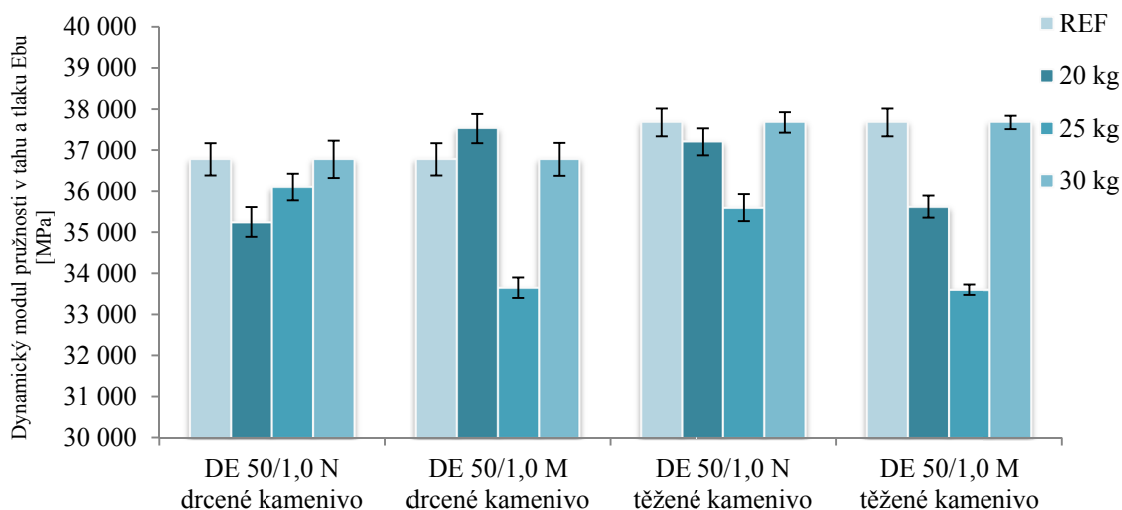
Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{brf} se vypočte z 1. vlastního kmitočtu příčného kmitání jako:

$$E_{brf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2}$$

kde L je délka vzorku;

c_1 je korekční součinitel, zahrnující vliv smyku a setrvačnosti;

i je poloměr setrvačnosti průřezu.



Graf 11: Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{brf} (příčné kmitání)

9 Dynamický Poissonův koeficient

Poissonova konstanta označuje poměr relativního prodloužení k relativnímu příčnému zkrácení - zúžení při namáhání tahem. Označuje se písmenem m , je bezrozměrná a v absolutní hodnotě větší než 1. Konstanta je závislá na typu materiálu.

V praxi se častěji používá převrácená hodnota Poissonovy konstanty – tzv. Poissonovo číslo μ . Běžně se pro beton uvažuje hodnota 0,2.

Hodnotu dynamického Poissonova čísla μ_d můžeme vypočítat ze vztahu:

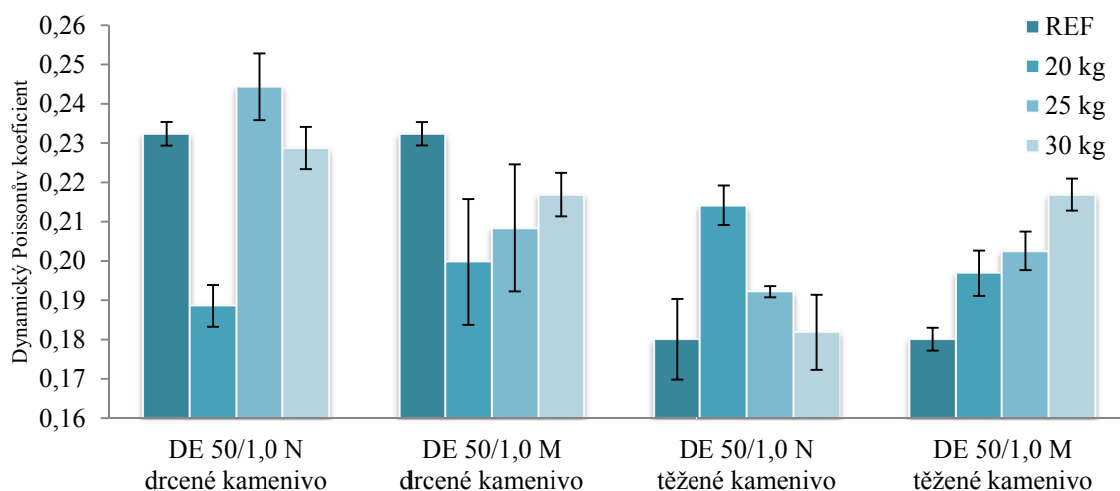
$$\mu_d = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{E_d}{G_d} - 2 \right) \text{ nebo } \mu_d = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{k} \cdot \frac{f_{po}^2}{f_{kr}^2} - 2 \right)$$

kde E_d a G_d jsou dynamické moduly pružnosti zjištěné na základě frekvence kroutivého a příčného vlnění;

k je poměr polárního momentu setrvačnosti průřezu k modulu tuhosti v kroucení.

Vyčíslení Poissonova čísla z hodnot E_d a G_d , které jsou získány na základě frekvencí příčného a kroutivého vlnění, není dostatečně přesné, jelikož vlastní frekvence příčného kmitání jsou ovlivněny nepřesnostmi příčného rozměru vzorku. [5]

V následujícím grafu jsou zobrazeny hodnoty Poissonova koeficientu včetně variačního koeficientu, veškeré hodnoty jsou v příloze diplomové práce.

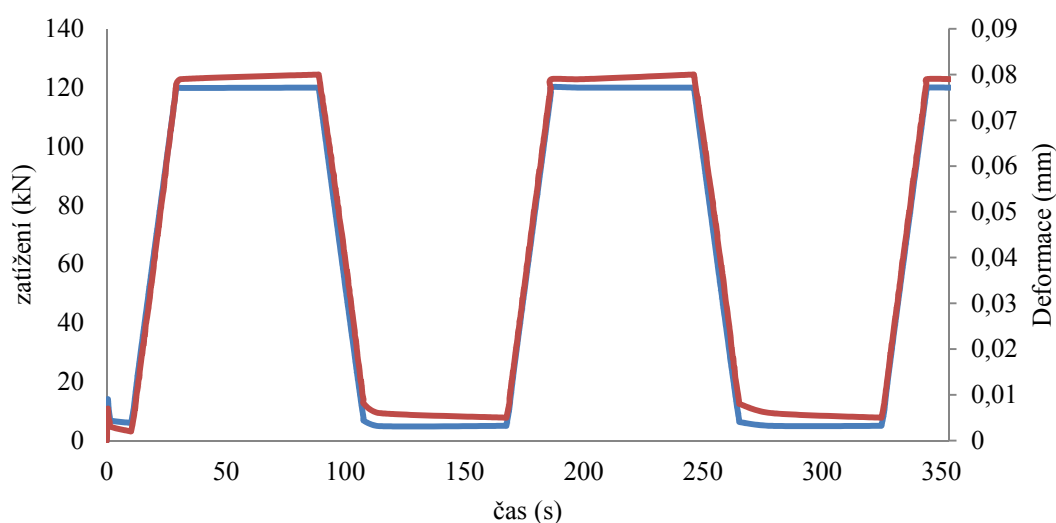


Graf 12: Porovnání dynamického Poissonova koeficientu

10 Statický modul pružnosti v tlaku

Statický modul pružnosti v tlaku E_c představuje pružnostní charakteristiku vyjadřující deformační vlastnosti materiálu v tlaku. Zjišťuje se z deformací, které nastávají při známém zatížení na základě Hookova zákona.

Horní mez zatížení při statické zatěžovací pevnosti byla odhadnuta jako 1/3 hranolové pevnosti. Dle ČSN ISO 6784 byla stanovena dolní zatěžovací mez na 5 kN. Zatěžovací lis automaticky provede centraci vzorku, celý proces zatěžování a vyhodnocení statického modulu pružnosti.



Graf 13: Průběh zatěžování náhodně vybraného trámce

Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku dle ČSN ISO 6784:

- těleso se umístí dostředně v pracovním prostoru hydraulického lisu. Následně se musí odjistit aretace snímacího zařízení;
- při zahájení zkoušky se vyvodí základní napětí σ_b o velikosti $0,5 \text{ N/mm}^2$ a odečtou se hodnoty na všech snímačích;
- napětí se plynule zvyšuje rychlostí v rozmezí $0,4 - 0,6 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ do hodnoty σ_a
- napětí σ_a se udržuje 60 s;
- jestliže se jednotlivá přetvoření liší od své průměrné hodnoty o více než 20 %, musí se těleso v lisu vycentrovat a celý postup se opakuje;
- po vycentrování se zkušební vzorek střídavě zatěžuje na horní hodnotu zatěžovacího napětí σ_a a odlehčuje na počáteční hodnotu σ_b , vždy po dobu 60 sekund. Rychlost zatěžování a odlehčování je stejná, tedy $0,4-0,6 \text{ N/mm}^2/\text{s}$;

- zatěžovací cyklus se opakuje min. dvakrát;
- po ukončení posledního zatěžovacího cyklu se vyčká 60 s při napětí σ_b a během následujících 30 s se zaznamenají hodnoty poměrného přetvoření ε_b ;
- zkušební těleso se předepsanou rychlostí zatíží na vypočtenou hodnotu horního napětí σ_a a během 30 s se zaznamenají hodnoty přetvoření ε_a .

Statický modul pružnosti v tlaku se vypočítá ze vztahu:

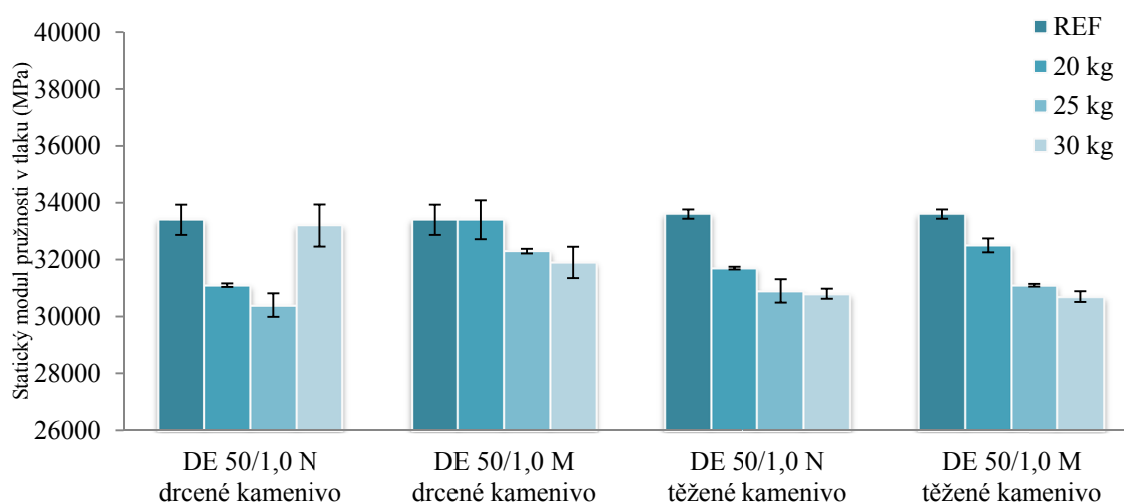
$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

Výsledek se zaokrouhlí na nejbližších 500 N/mm² při hodnotách nad 10 000 N/mm².

Tab. 23: Hodnoty modulu pružnosti dle ČSN EN 1992-1-1

Třída betonu	Modul pružnosti E_{cm} [GPa]
C 12/15	27
C 16/20	29
C 20/25	30
C 25/30	31
C 30/37	32
C 35/45	34
C 45/55	36

Veškeré hodnoty statického modulu pružnosti jsou uvedeny v příloze diplomové práce.

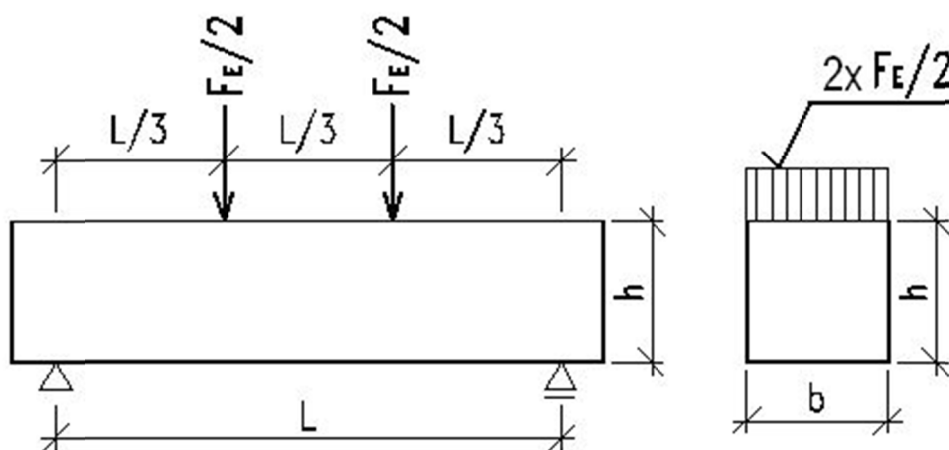


Graf 14: Grafické porovnání statických modulů pružnosti v tlaku

11 Pevnost v tahu ohybem

Trámec může být ve zkušebním zařízení uložen buď tak, že je zatěžován jedním břemenem v polovině rozpětí, nebo dvěma břemeny uloženými ve třetinách rozpětí. V prvním případě, vzhledem k průběhu ohybového momentu, předem určíme, že k porušení dojde právě v polovině rozpětí trávce, definujeme tedy místo porušení. V druhém případě, kdy je ohybový moment ve střední části trávce konstantní, dojde k porušení v nejslabším místě tohoto úseku zkušebního tělesa. Výsledek zkoušky při druhém uspořádání je proto více na straně bezpečnosti.

I při této zkoušce musí být trámec umístěn ve zkušebním lisu tak, aby směr zatížení působil kolmo na směr hutnění. [2]



Obr. 10: Příklad uložení zkušebního trávce

11.1 Pracovní postup

Trávce byly nejdříve změřeny. Určily se rozměry a hmotnost všech těles dle normy ČSN EN 12390 - 1. 28 dní po vyrobení zkušebních těles byly na všech zkušebních trávcích provedeny zkoušky dynamického modulu pružnosti (viz kapitola 9).

Tahové zkoušky byly prováděny na zkušebním lisu FPZ 100/1 v nastaveném rozsahu 40 kN. Průhyb byl snímán pomocí indukčního snímače s rozsahem 100 mm. Sběr dat byl zajištěn datovou ústřednou Spider8, rychlost zapisování byla nastavena na 5 Hz. (viz obr. 11)

Vzhledem k získání velkého množství dat byl zvolen následující postup úpravy jednotlivých vstupních hodnot:

- hodnoty průhybu byly vzhledem k místu snímání uvažovány jako poloviční;
- hodnoty zatížení a průhybu byly zaokrouhleny na 4 desetinná místa;
- byly vymazány veškeré duplicitní hodnoty průhybu.

Po úpravě vstupních dat byly všechny hodnoty vyhodnoceny dle TP FC 1 - 1 a byla spočítána specifická lomová energie, její směrodatná odchylka a variační koeficient.

Charakteristická hodnota (5 % kvantil) byla vypočítána za předpokladu logaritmicko-normálního rozdělení jako:

$$X_c = \exp[m_Y(1 - k_n \cdot s_Y)]$$

kde k_n pro tři zkušební tělesa je 1,89;

$$m_Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i).$$

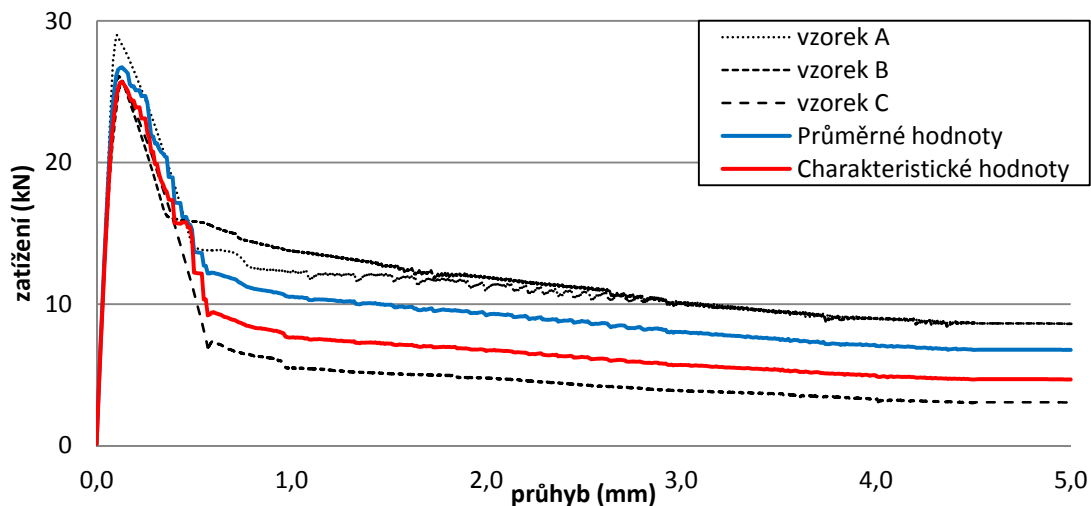
Výsledky jsou uvedeny v grafech v následující kapitole.



Obr. 11: zkouška pevnosti v tahu ohybem

11.2 Vyhodnocení jednotlivých sad

C 25/30 20kg DE 50/1,0 N – drcené kamenivo



Graf 15: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

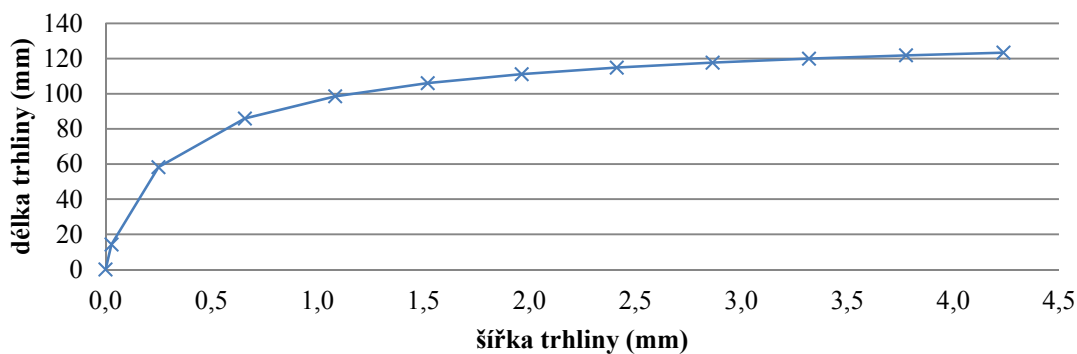
Tab. 24: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

	a_1	a_2	h	m	ob.hmotnost	$F_{Rm,c}$	$F_{Rk,c}$	$F_{Rm,res,1}$	$F_{Rk,res,1}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,3	150,1	700,0	36,748	2327	26,72	25,71	7,55	5,38
vzorek B	150,8	150,8	700,0	36,880	2317				
vzorek C	150,8	149,7	700,0	36,785	2329				

Tab. 25: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

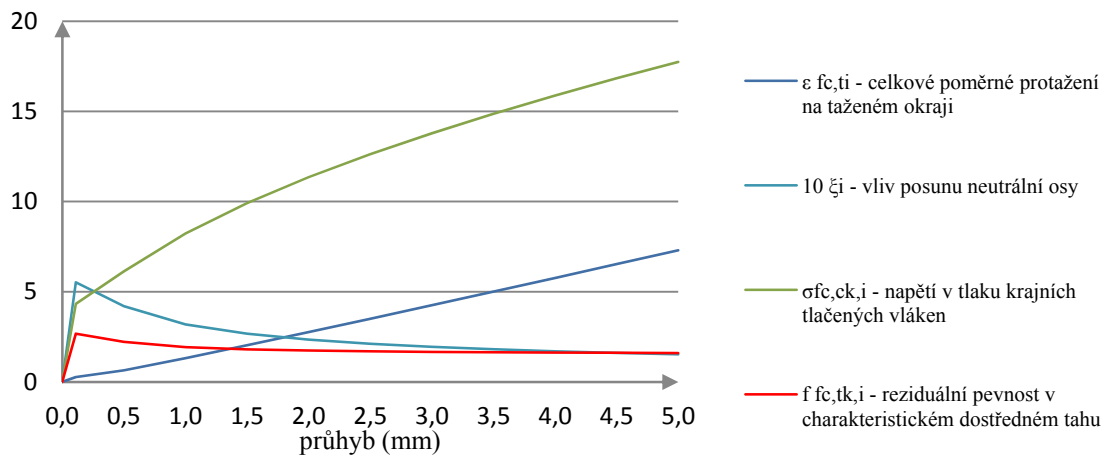
	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0226	1,795	79,58	7,11	8,22
vzorek B	0,0227	2,191	96,34		
vzorek C	0,0226	1,892	83,82		

závislost délky trhliny na její šířce

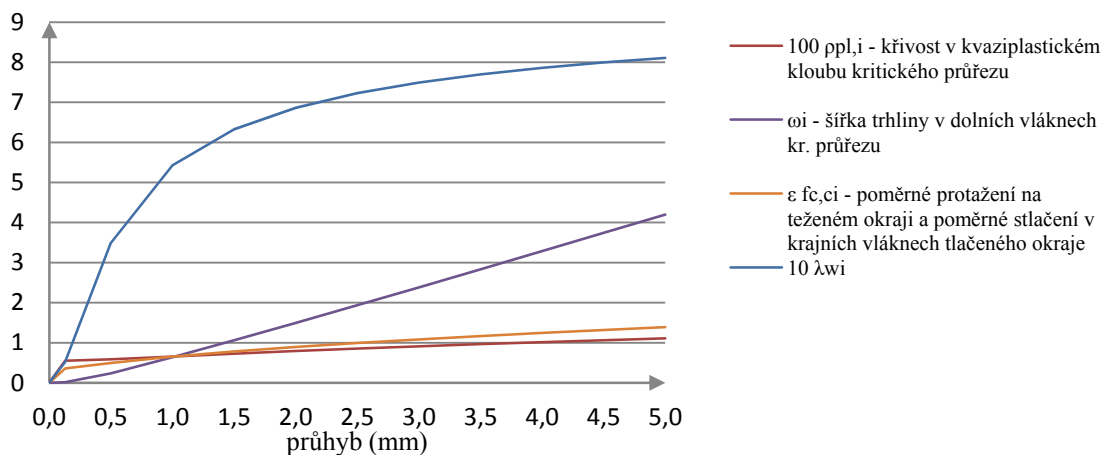


Graf 16: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 17: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo



Graf 18: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

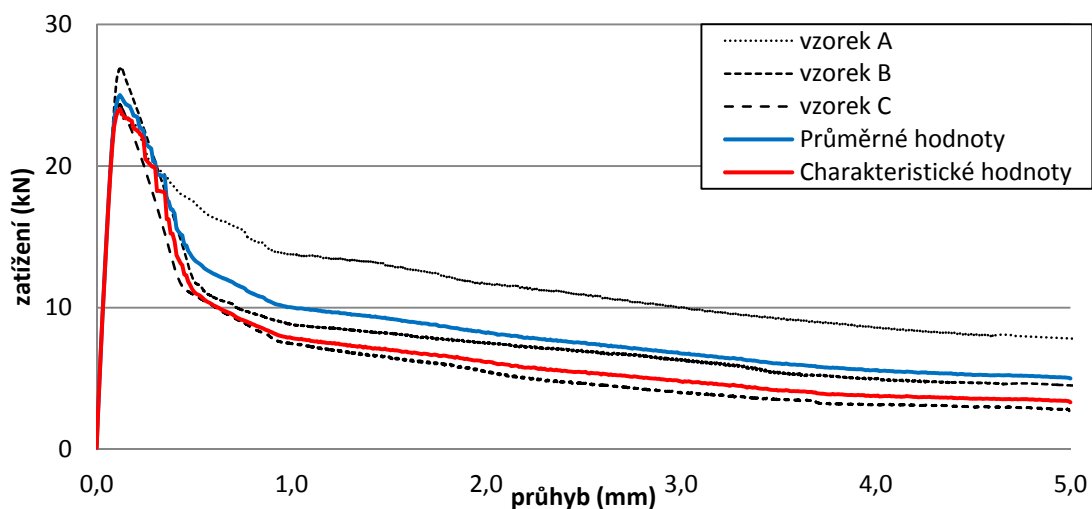
Tab. 26: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

δ	$\varepsilon_{fc,ti}$	$10 \xi_i$	$\sigma_{fc,ck,i}$	$f_{fc,tk,i}$		$100 \rho_{pl,i}$	ω_i	$\varepsilon_{fc,ci}$	$10 \lambda_{wi}$
	[‰]	-	[MPa]	[MPa]		[m ⁻¹]	[mm]	[‰]	-
0,50	0,65	4,33	6,58	2,51		0,59	0,23	0,50	3,49
1,00	1,33	3,31	8,77	2,17		0,66	0,64	0,66	5,43
1,50	2,03	2,79	10,52	2,03		0,73	1,06	0,78	6,33
2,00	2,76	2,45	12,02	1,95		0,79	1,49	0,90	6,86
2,50	3,49	2,21	13,35	1,90		0,85	1,94	0,99	7,23
3,00	4,24	2,04	14,57	1,86		0,91	2,38	1,08	7,49
3,50	4,99	1,90	15,70	1,84		0,96	2,83	1,17	7,70
4,00	5,75	1,78	16,76	1,82		1,02	3,29	1,25	7,86
4,50	6,51	1,69	17,77	1,80		1,06	3,74	1,32	7,99
5,00	7,27	1,61	18,72	1,79		1,11	4,20	1,39	8,11

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,5 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 4,82 MPa.

C 25/30 25kg DE 50/1,0 N – drcené kamenivo



Graf 19: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

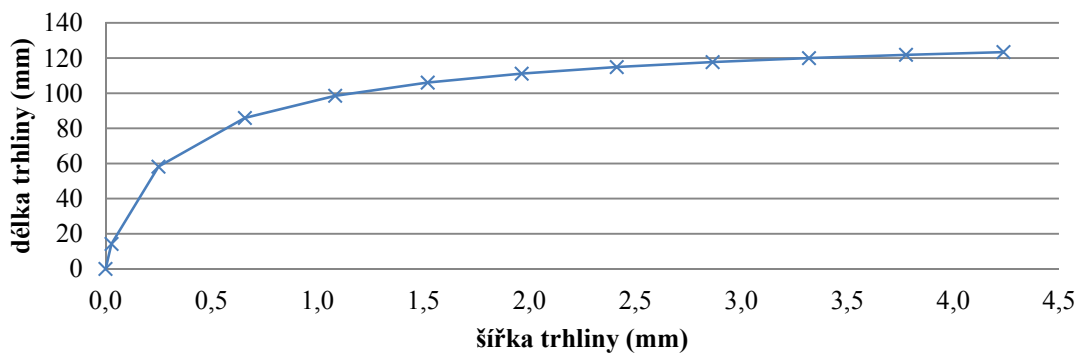
Tab. 27: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

	a_1	a_2	h	m	ob.hmotnost	$F_{Rm,c}$	$F_{Rk,c}$	$F_{Rm,res,1}$	$F_{Rk,res,1}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	149,1	149,8	700,0	33,603	2342	25,01	24,01	6,05	4,15
vzorek B	151,1	150,9	700,0	36,972	2312				
vzorek C	149,7	149,7	700,0	36,480	2326				

Tab. 28: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

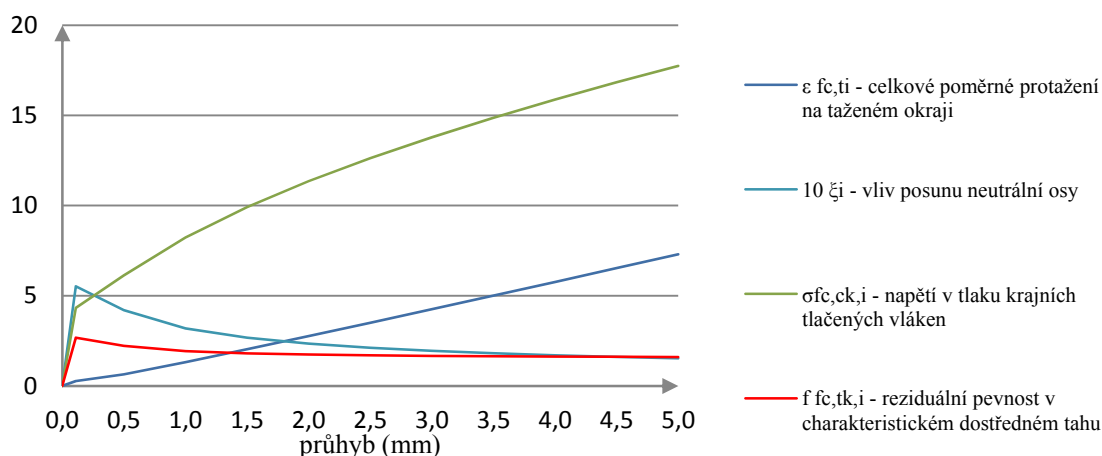
	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0223	1,479	66,23	12,09	14,80
vzorek B	0,0228	2,183	95,74		
vzorek C	0,0224	1,865	83,22		

závislost délky trhliny na její šířce

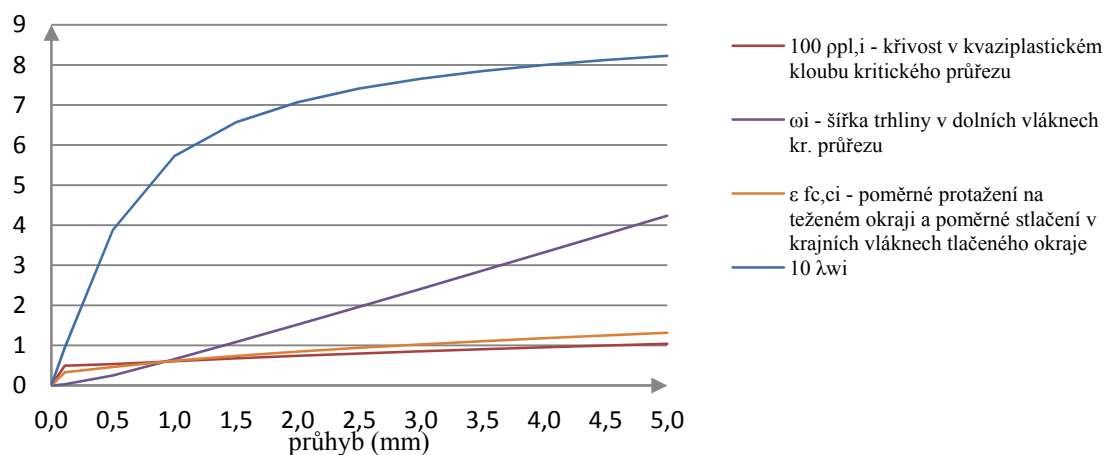


Graf 20: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 21: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo



Graf 22: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

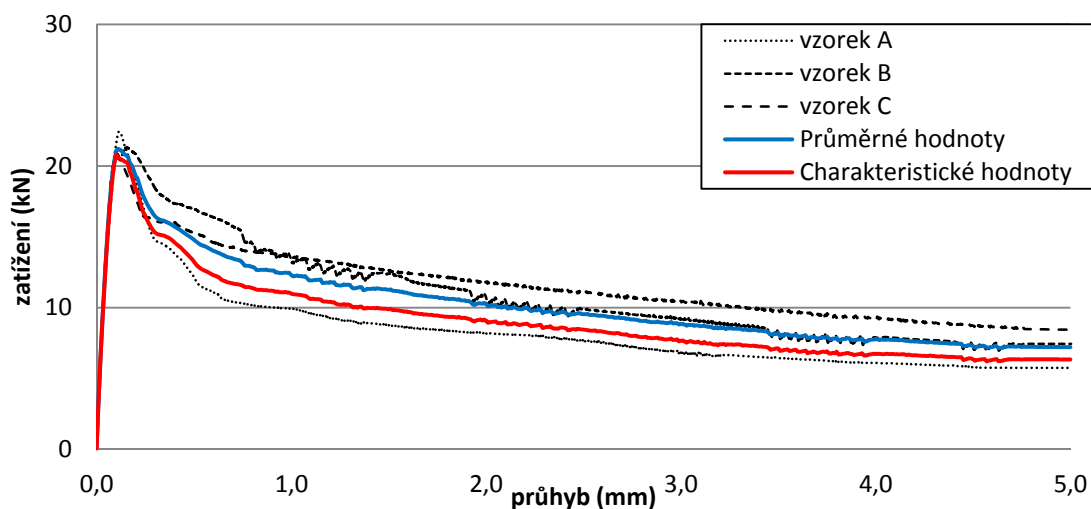
Tab. 29: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

δ	$\epsilon_{fc,ti}$ [‰]	$10 \xi_i$ -	$\sigma_{fc,ck,i}$ [MPa]	$f_{fc,tk,i}$ [MPa]	$100 \rho_{pl,i}$ [m ⁻¹]	ω_i [mm]	$\epsilon_{fc,ci}$ [‰]	$10 \lambda_{wi}$ -
0,50	0,65	4,23	6,29	2,30	0,55	0,24	0,47	3,72
1,00	1,33	3,22	8,42	2,00	0,62	0,65	0,63	5,61
1,50	2,04	2,70	10,12	1,87	0,69	1,08	0,75	6,47
2,00	2,77	2,38	11,58	1,81	0,76	1,51	0,86	6,99
2,50	3,51	2,15	12,87	1,76	0,82	1,96	0,96	7,34
3,00	4,25	1,97	14,05	1,73	0,87	2,40	1,04	7,59
3,50	5,01	1,83	15,14	1,70	0,92	2,85	1,13	7,79
4,00	5,77	1,72	16,17	1,68	0,97	3,31	1,20	7,95
4,50	6,53	1,63	17,14	1,67	1,02	3,77	1,27	8,07
5,00	7,30	1,55	18,07	1,66	1,06	4,23	1,34	8,18

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,4 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 4,51 MPa.

C 25/30 30kg DE 50/1,0 N – drcené kamenivo



Graf 23: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

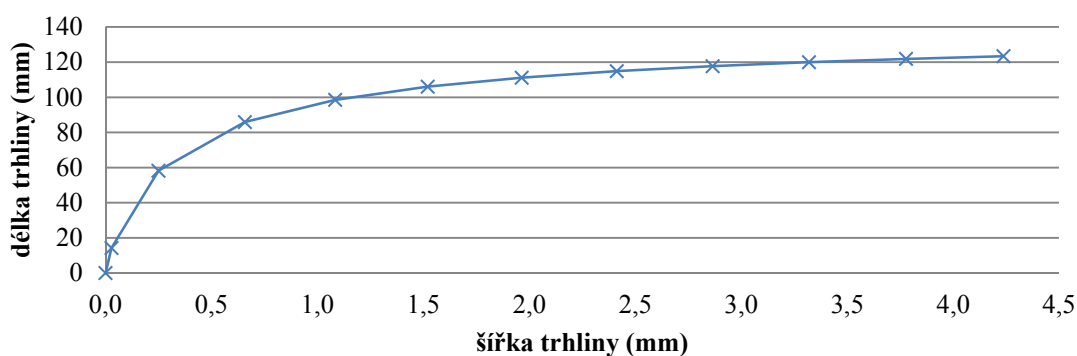
Tab. 30: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

	a ₁	a ₂	h	m	ob.hmotnost	F _{Rm,c}	F _{Rk,c}	F _{Rm,res,1}	F _{Rk,res,1}
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	151,0	150,7	700,0	37,001	2322	21,21	20,82	8,20	7,12
vzorek B	150,9	150,6	700,0	37,323	2347				
vzorek C	150,4	150,3	700,0	37,255	2355				

Tab. 31: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

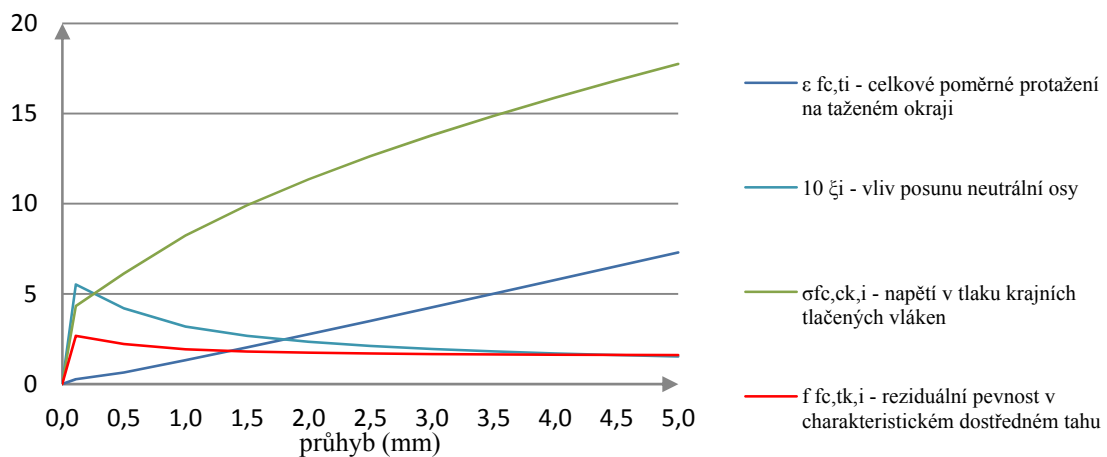
	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0228	1,645	72,29	21,32	27,03
vzorek B	0,0227	2,446	107,65		
vzorek C	0,0226	1,282	56,69		

závislost délky trhliny na její šířce

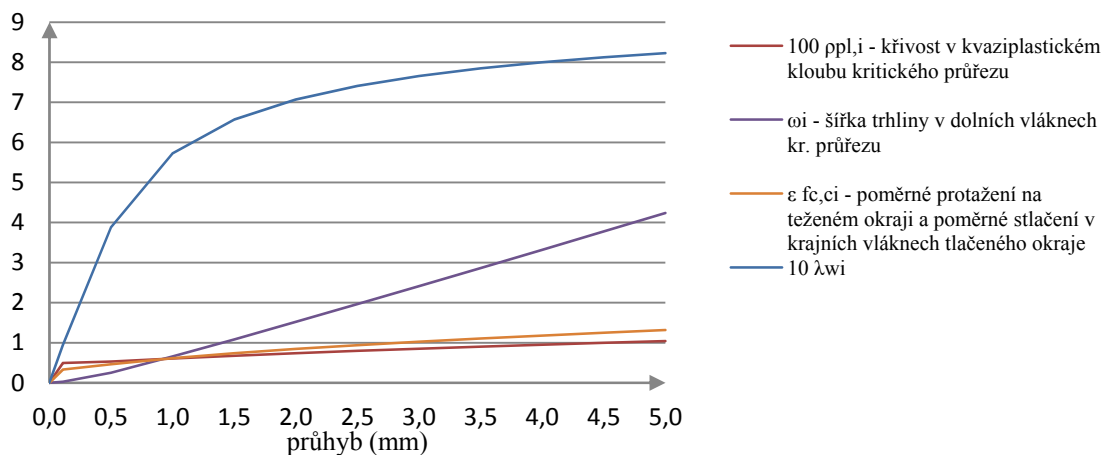


Graf 24: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 25: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo



Graf 26: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

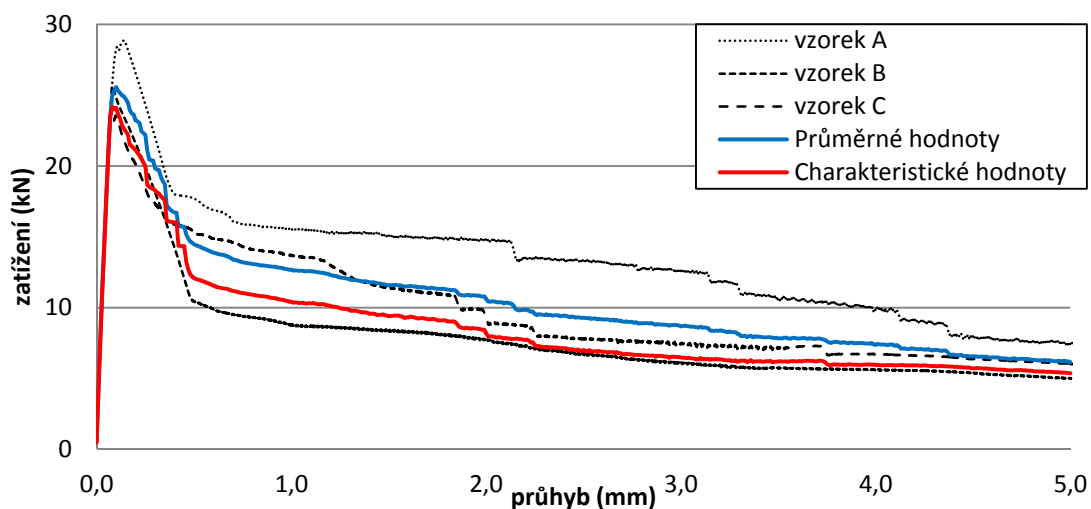
Tab. 32: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo

δ	$\varepsilon_{fc,ti}$	$10 \xi_i$	$\sigma_{fc,ck,i}$	$f_{fc,tk,i}$	$100 \rho_{pl,i}$	ω_i	$\varepsilon_{fc,ci}$	$10 \lambda_{wi}$
	[‰]	-	[MPa]	[MPa]	[m ⁻¹]	[mm]	[‰]	-
0,50	0,64	3,97	5,82	1,91	0,46	0,26	0,42	3,99
1,00	1,32	3,01	7,81	1,68	0,55	0,67	0,57	5,85
1,50	2,04	2,52	9,39	1,59	0,62	1,10	0,69	6,68
2,00	2,77	2,22	10,76	1,53	0,68	1,54	0,79	7,17
2,50	3,51	2,00	11,96	1,50	0,74	1,99	0,88	7,51
3,00	4,27	1,84	13,06	1,47	0,79	2,44	0,96	7,75
3,50	5,03	1,71	14,08	1,45	0,84	2,89	1,04	7,93
4,00	5,79	1,61	15,04	1,44	0,89	3,35	1,11	8,08
4,50	6,56	1,52	15,95	1,43	0,93	3,81	1,18	8,20
5,00	7,33	1,45	16,81	1,42	0,97	4,27	1,24	8,30

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,5 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 3,84 MPa.

C 25/30 20kg DE 50/1,0 M – drcené kamenivo



Graf 27: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

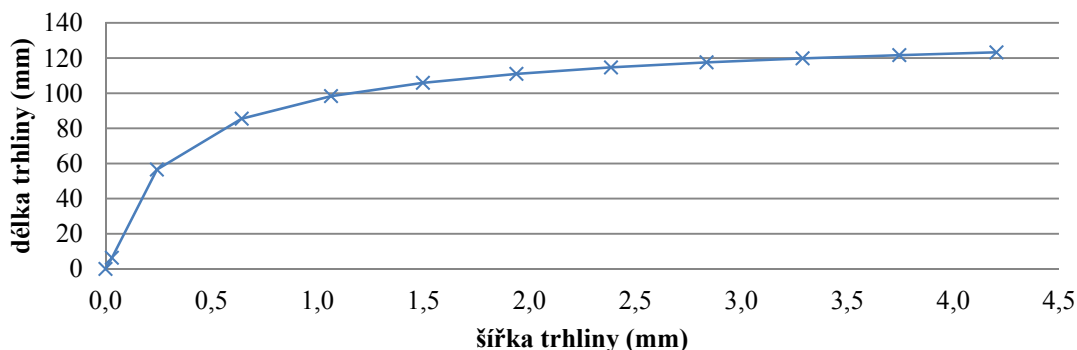
Tab. 33: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

	a ₁	a ₂	h	m	ob.hmotnost	F _{Rm,c}	F _{Rk,c}	F _{Rm,res,1}	F _{Rk,res,1}
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,3	151,4	700,0	37,101	2331	25,57	24,17	7,83	6,20
vzorek B	150,3	151,4	700,0	37,175	2334				
vzorek C	150,4	151,5	700,0	37,179	2330				

Tab. 34: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

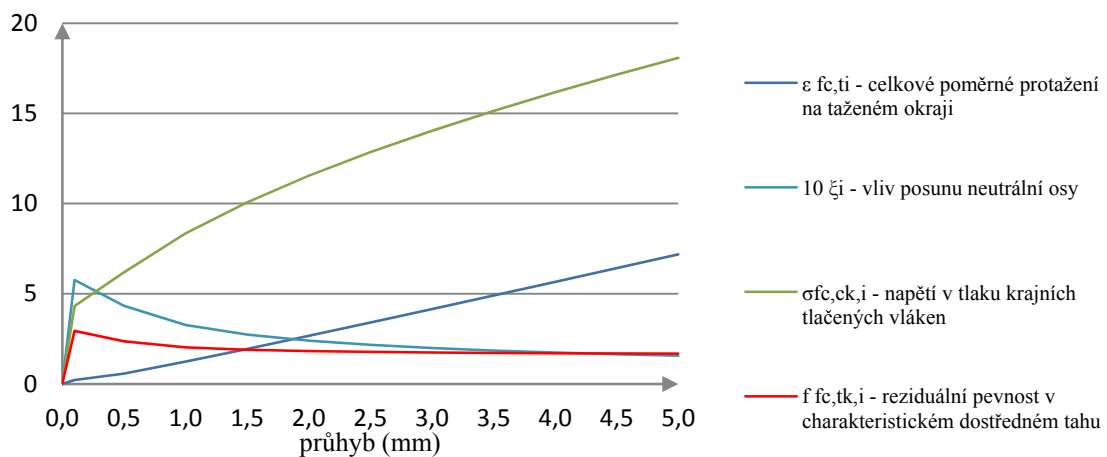
	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0228	2,827	124,24	31,62	38,92
vzorek B	0,0228	1,118	49,18		
vzorek C	0,0228	1,602	70,32		

závislost délky trhliny na její šířce

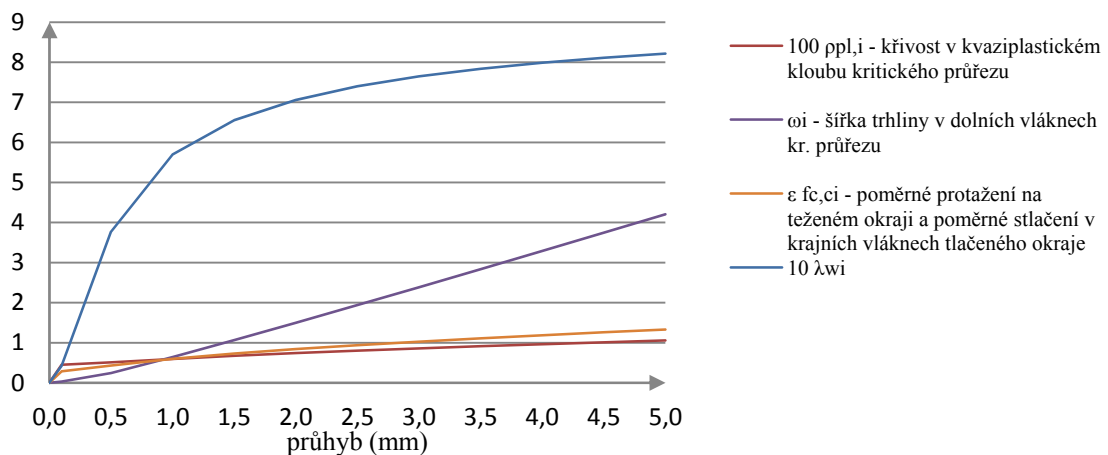


Graf 28: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 29: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo



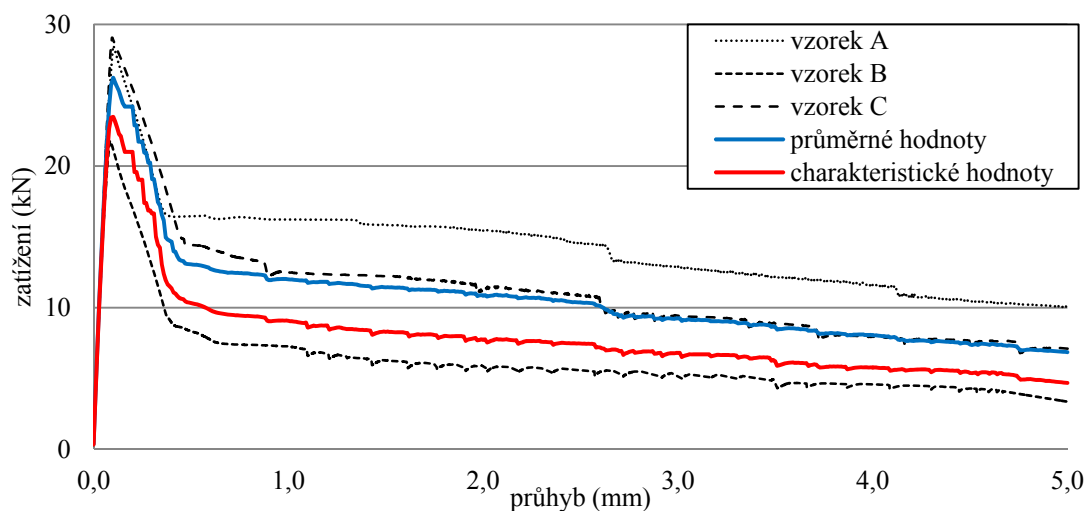
Graf 30: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

Tab. 35: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

δ	$\varepsilon_{fc,ti}$	$10 \xi_i$	$\sigma_{fc,ck,i}$	$f_{fc,tk,i}$	$100 \rho_{pl,i}$	ω_i	$\varepsilon_{fc,ci}$	$10 \lambda_{wi}$
	[‰]	-	[MPa]	[MPa]	[m ⁻¹]	[mm]	[‰]	-
0,50	0,56	4,34	6,18	2,36	0,51	0,24	0,43	3,77
1,00	1,23	3,27	8,34	2,03	0,60	0,64	0,60	5,70
1,50	1,94	2,74	10,07	1,90	0,67	1,06	0,73	6,56
2,00	2,66	2,40	11,54	1,82	0,74	1,50	0,84	7,06
2,50	3,40	2,16	12,84	1,77	0,80	1,94	0,94	7,40
3,00	4,14	1,99	14,03	1,74	0,86	2,39	1,03	7,65
3,50	4,90	1,85	15,14	1,72	0,91	2,84	1,11	7,84
4,00	5,65	1,74	16,17	1,70	0,96	3,29	1,19	7,99
4,50	6,42	1,64	17,15	1,68	1,01	3,75	1,26	8,11
5,00	7,18	1,56	18,08	1,67	1,06	4,20	1,33	8,22

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,5 MPa.

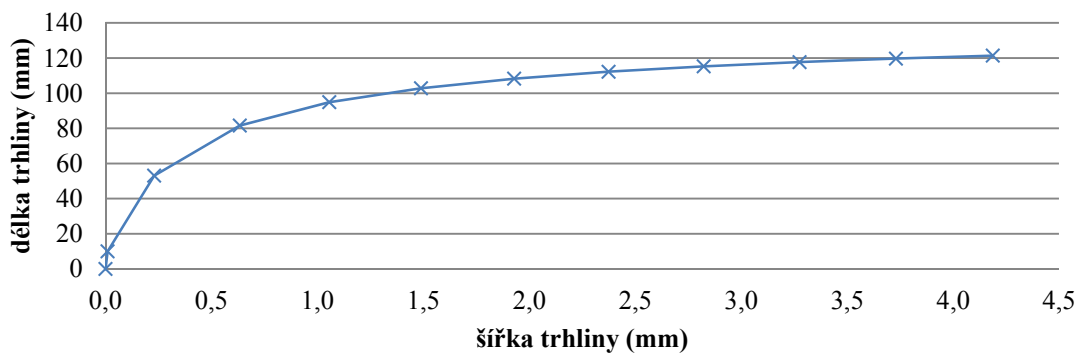
Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 4,61 MPa.

C 25/30 25kg DE 50/1,0 M – drcené kamenivo**Graf 31: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo****Tab. 36: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo**

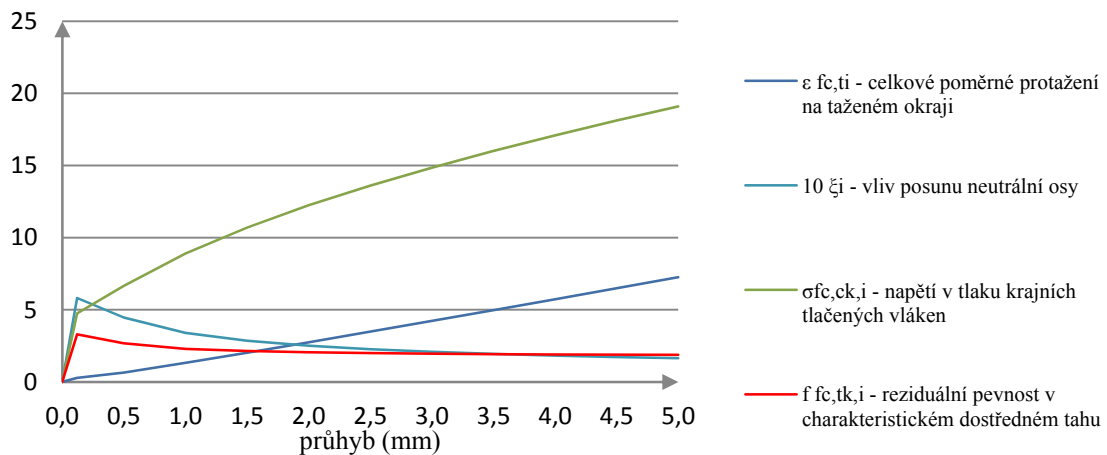
	a ₁	a ₂	h	m	ob.hmotnost	F _{Rm,c}	F _{Rk,c}	F _{Rm,res,1}	F _{Rk,res,1}
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,8	150,0	700,0	36,992	2337	26,23	23,47	8,63	6,22
vzorek B	150,1	149,5	700,0	36,569	2329				
vzorek C	150,4	149,4	700,0	36,840	2341				

Tab. 37: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

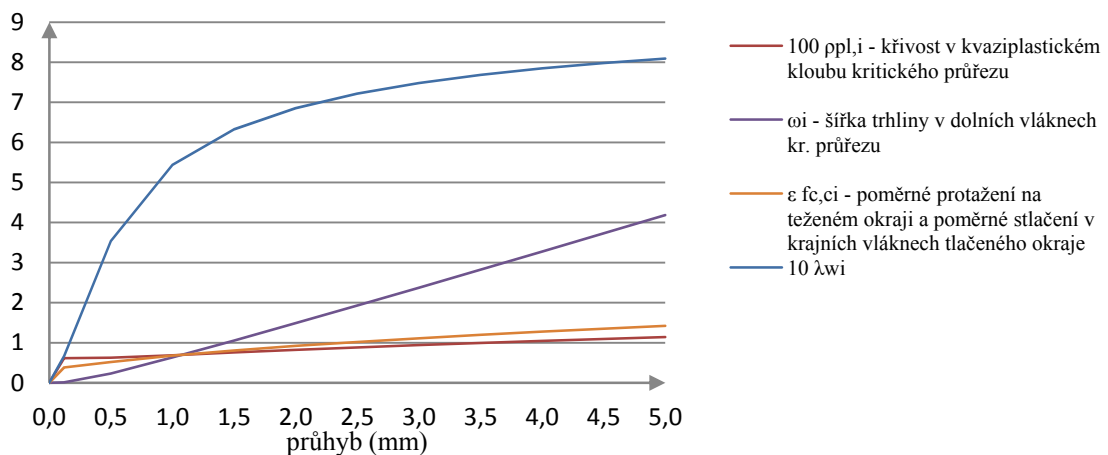
	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0226	1,683	74,41	11,17	17,53
vzorek B	0,0224	1,084	48,32		
vzorek C	0,0225	1,540	68,52		

závislost délky trhliny na její šířce**Graf 32: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo**

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 33: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo



Graf 34: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

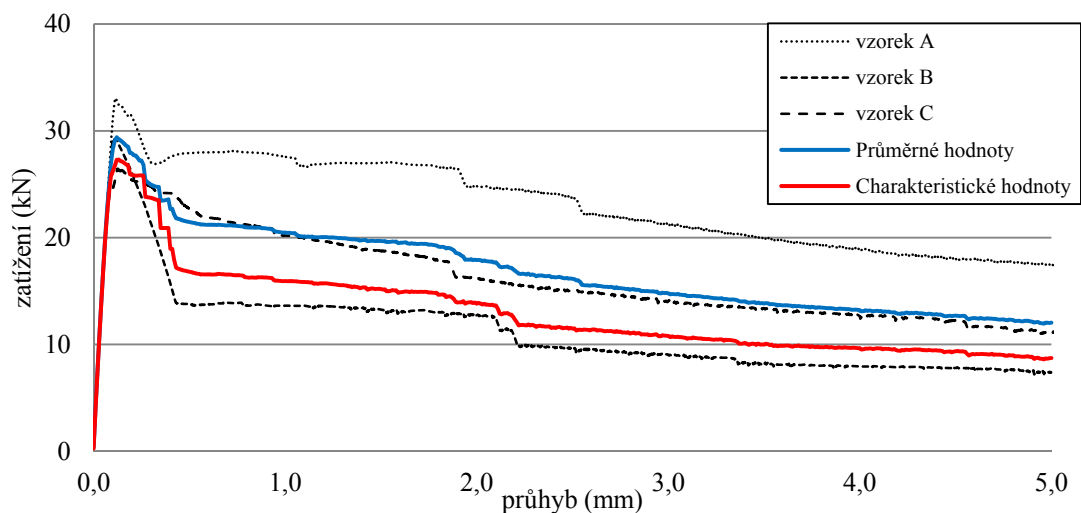
Tab. 38: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

δ	ε _{fc,ti}	10 ξ _i	σ _{fc,ck,i}	f _{fc,tk,i}	100 ρ _{pl,i}	ω _i	ε _{fc,ci}	10 λ _{wi}
	[‰]	-	[MPa]	[MPa]	[m ⁻¹]	[mm]	[‰]	-
0,50	0,62	4,30	6,05	2,28	0,55	0,25	0,47	4,06
1,00	1,30	3,23	8,19	1,96	0,61	0,66	0,62	5,84
1,50	2,01	2,70	9,90	1,83	0,68	1,08	0,74	6,65
2,00	2,74	2,37	11,35	1,76	0,75	1,52	0,85	7,13
2,50	3,48	2,14	12,64	1,72	0,81	1,96	0,95	7,46
3,00	4,23	1,96	13,81	1,68	0,86	2,41	1,03	7,70
3,50	4,98	1,82	14,90	1,66	0,91	2,86	1,11	7,88
4,00	5,74	1,71	15,92	1,64	0,96	3,32	1,19	8,03
4,50	6,51	1,62	16,88	1,63	1,01	3,78	1,26	8,15
5,00	7,28	1,54	17,80	1,62	1,05	4,24	1,33	8,25

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,6 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 4,73 MPa.

C 25/30 30kg DE 50/1,0 M – drcené kamenivo



Graf 35: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

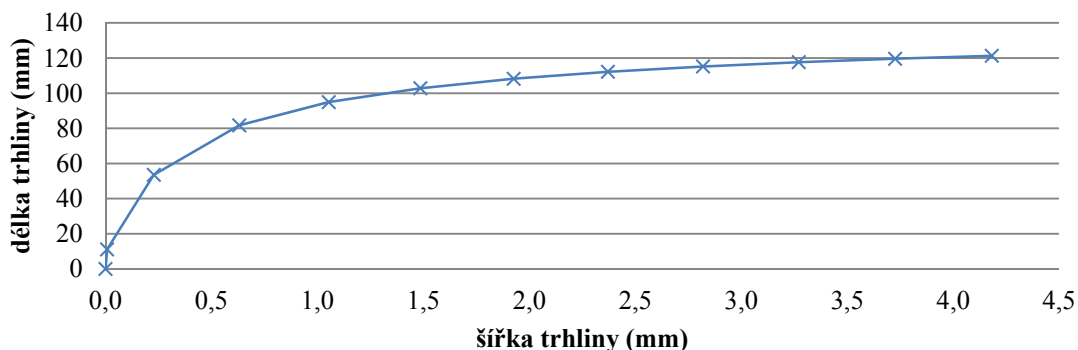
Tab. 39: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

	a ₁	a ₂	h	m	ob.hmotnost	F _{Rm,c}	F _{Rk,c}	F _{Rm,res,1}	F _{Rk,res,1}
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,6	149,6	700,0	36,501	2314	29,40	27,31	13,85	9,98
vzorek B	150,8	149,5	700,0	36,695	2327				
vzorek C	150,6	150,9	700,0	36,954	2323				

Tab. 40: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

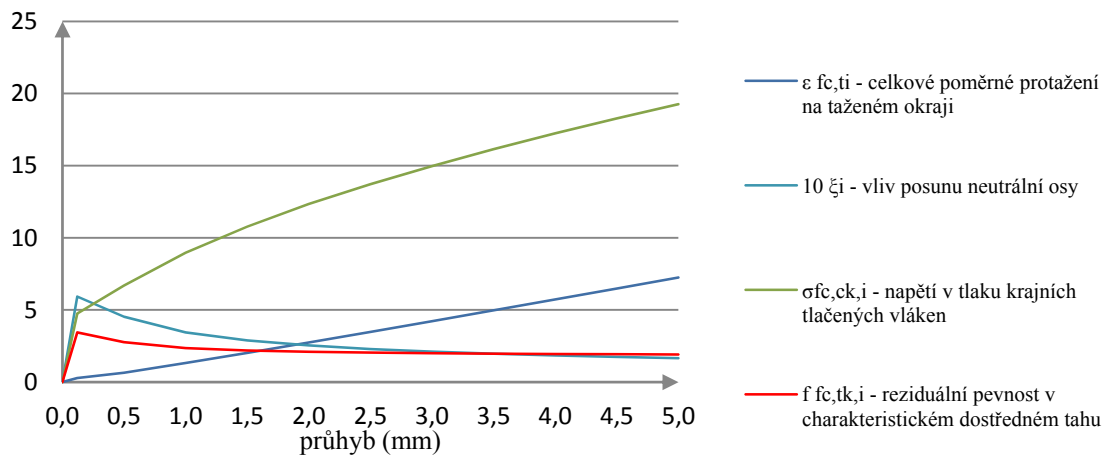
	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0225	2,192	94,51	1,70	1,76
vzorek B	0,0225	2,161	95,85		
vzorek C	0,0227	2,240	98,59		

závislost délky trhliny na její šířce

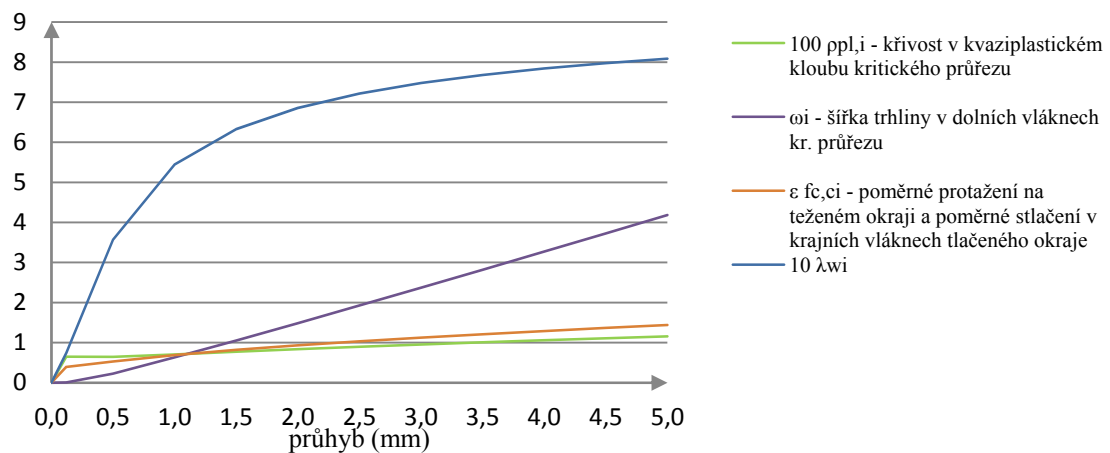


Graf 36: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 37: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo



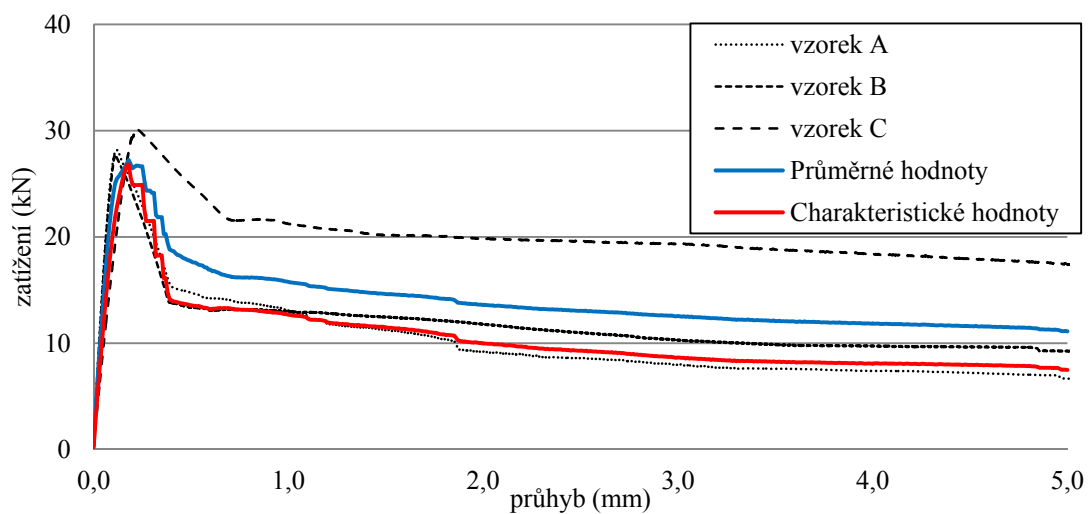
Graf 38: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

Tab. 41: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo

δ	$\varepsilon_{fc,ti}$	$10 \xi_i$	$\sigma_{fc,ck,i}$	$f_{fc,tk,i}$	$100 \rho_{pl,i}$	ω_i	$\varepsilon_{fc,ci}$	$10 \lambda_{wi}$
	[‰]	-	[MPa]	[MPa]	[m ⁻¹]	[mm]	[‰]	-
0,50	0,64	4,52	6,69	2,76	0,65	0,23	0,53	3,57
1,00	1,31	3,44	8,96	2,35	0,70	0,63	0,69	5,45
1,50	2,02	2,89	10,78	2,19	0,77	1,05	0,82	6,33
2,00	2,74	2,54	12,33	2,10	0,84	1,49	0,93	6,86
2,50	3,48	2,29	13,71	2,04	0,90	1,93	1,03	7,22
3,00	4,22	2,10	14,97	2,00	0,95	2,37	1,12	7,48
3,50	4,97	1,96	16,14	1,97	1,01	2,82	1,21	7,68
4,00	5,72	1,84	17,24	1,94	1,06	3,27	1,29	7,84
4,50	6,48	1,74	18,27	1,93	1,11	3,73	1,37	7,98
5,00	7,24	1,66	19,26	1,91	1,16	4,18	1,44	8,09

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,9 MPa.

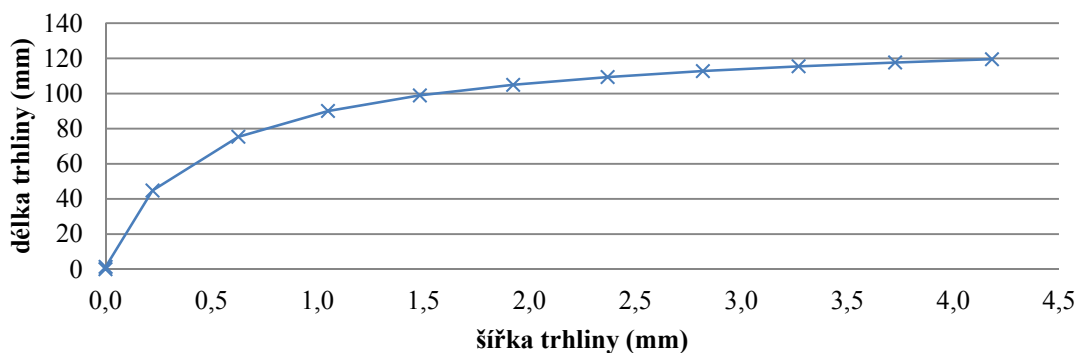
Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 5,30 MPa.

C 25/30 20kg DE 50/1,0 N – těžené kamenivo**Graf 39: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo****Tab. 42: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo**

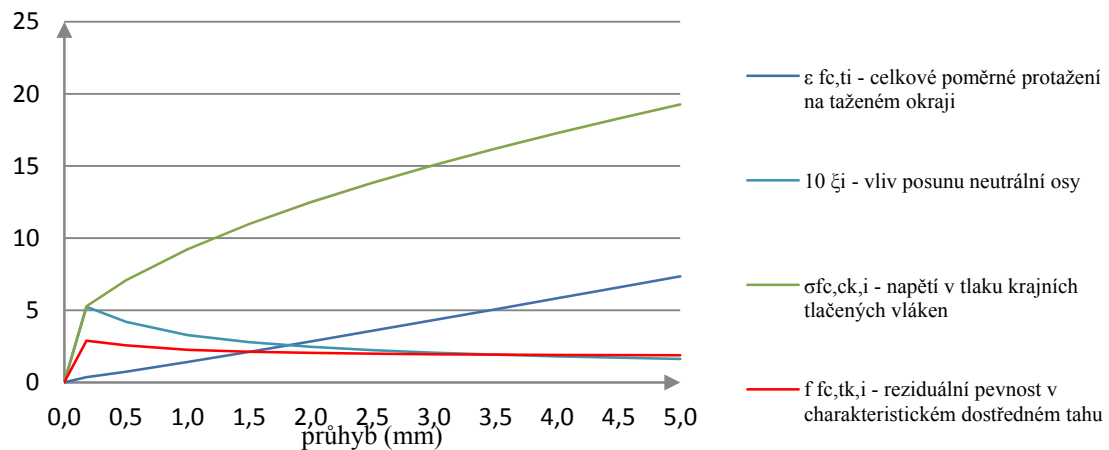
	a_1	a_2	h	m	ob.hmotnost	$F_{Rm,c}$	$F_{Rk,c}$	$F_{Rm,res,1}$	$F_{Rk,res,1}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,6	150,4	700,0	36,386	2293	27,25	26,83	12,09	8,25
vzorek B	150,1	150,3	700,0	36,227	2295				
vzorek C	150,4	151,0	700,0	36,347	2286				

Tab. 43: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

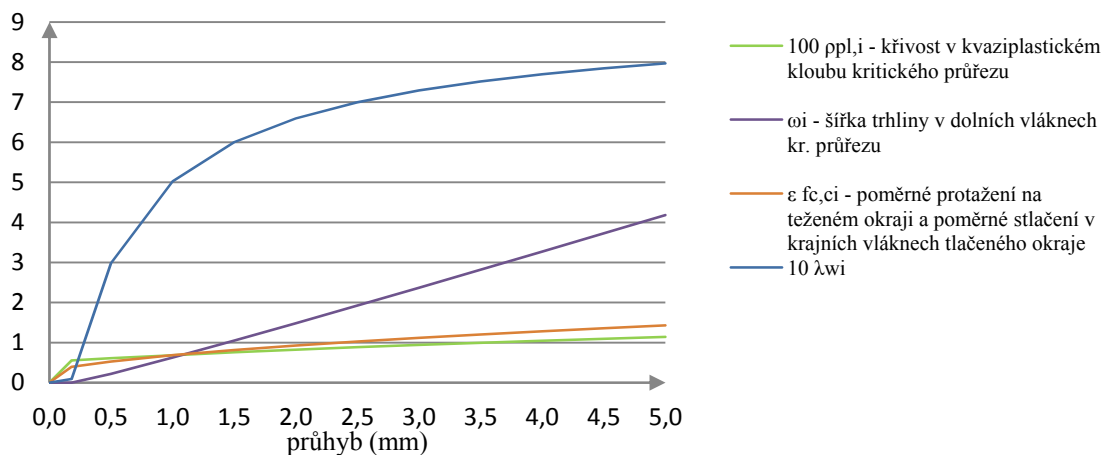
	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0227	2,219	97,96	43,29	36,43
vzorek B	0,0226	1,792	79,44		
vzorek C	0,0227	4,068	179,13		

závislost délky trhliny na její šířce**Graf 40: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo**

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 41: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo



Graf 42: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

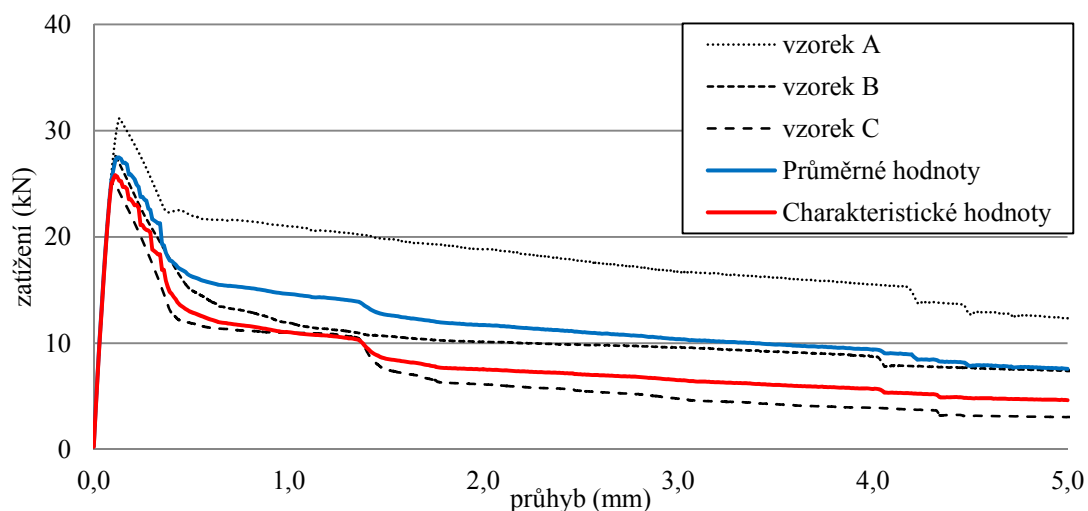
Tab. 44: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

δ	$\varepsilon_{fc,ti}$	$10 \xi_i$	$\sigma_{fc,ck,i}$	$f_{fc,tk,i}$	$100 \rho_{pl,i}$	ω_i	$\varepsilon_{fc,ci}$	$10 \lambda_{wi}$
	[‰]	-	[MPa]	[MPa]	[m ⁻¹]	[mm]	[‰]	-
0,50	0,73	4,20	7,08	2,56	0,61	0,22	0,53	2,98
1,00	1,41	3,28	9,23	2,25	0,69	0,63	0,69	5,03
1,50	2,11	2,79	10,97	2,12	0,76	1,05	0,82	6,00
2,00	2,84	2,46	12,48	2,04	0,82	1,48	0,93	6,59
2,50	3,57	2,23	13,82	1,99	0,89	1,92	1,03	7,00
3,00	4,32	2,06	15,05	1,95	0,94	2,37	1,12	7,29
3,50	5,07	1,92	16,20	1,92	1,00	2,82	1,20	7,52
4,00	5,82	1,80	17,27	1,90	1,05	3,27	1,28	7,70
4,50	6,58	1,71	18,29	1,88	1,10	3,73	1,36	7,84
5,00	7,35	1,63	19,26	1,87	1,14	4,18	1,43	7,97

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,8 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 4,91 MPa.

C 25/30 25kg DE 50/1,0 N – těžené kamenivo



Graf 43: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

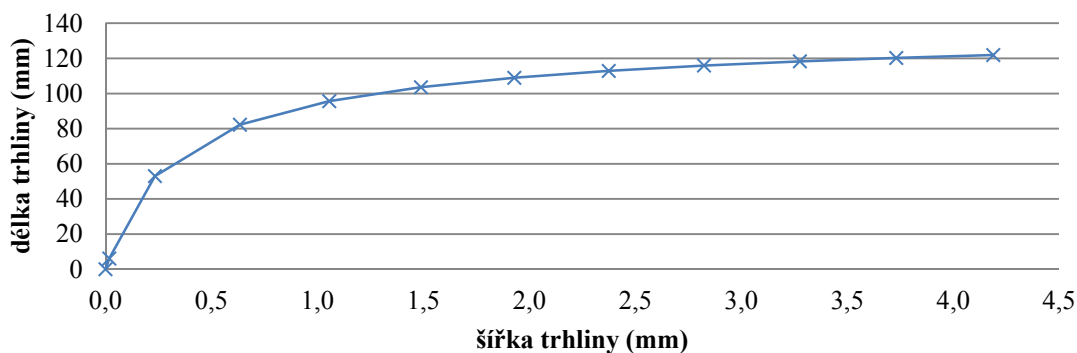
Tab. 45: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

	a ₁	a ₂	h	m	ob.hmotnost	F _{Rm,c}	F _{Rk,c}	F _{Rm,res,1}	F _{Rk,res,1}
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,8	149,9	700,0	36,025	2277	27,47	25,81	9,87	6,07
vzorek B	151,0	150,3	700,0	36,116	2274				
vzorek C	150,9	150,0	700,0	36,047	2275				

Tab. 46: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

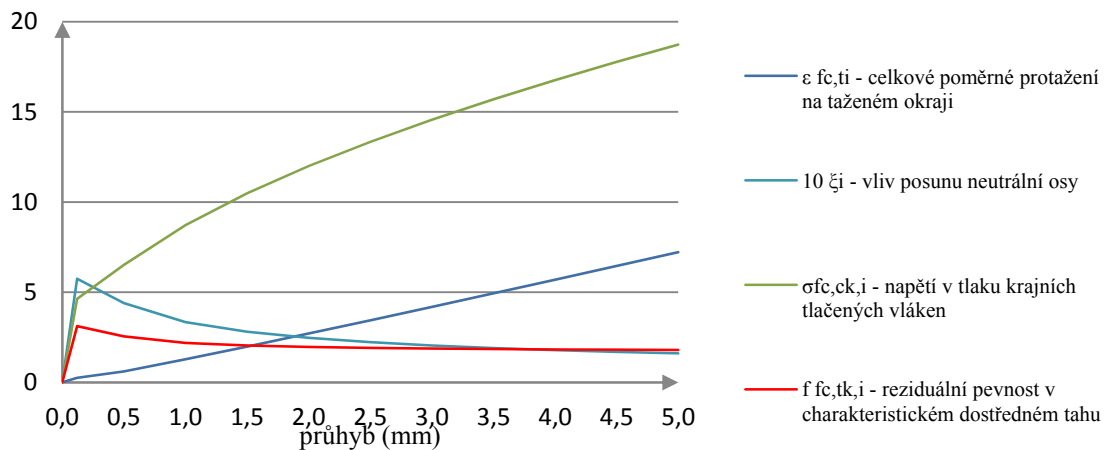
	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0226	2,627	116,22	23,37	27,29
vzorek B	0,0227	1,841	81,13		
vzorek C	0,0226	1,347	59,51		

závislost délky trhliny na její šířce

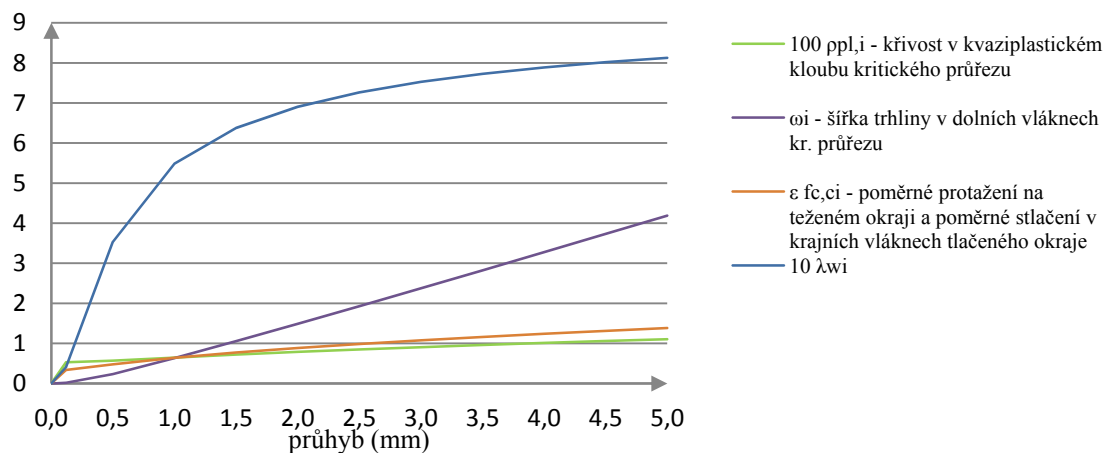


Graf 44: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 45: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo



Graf 46: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

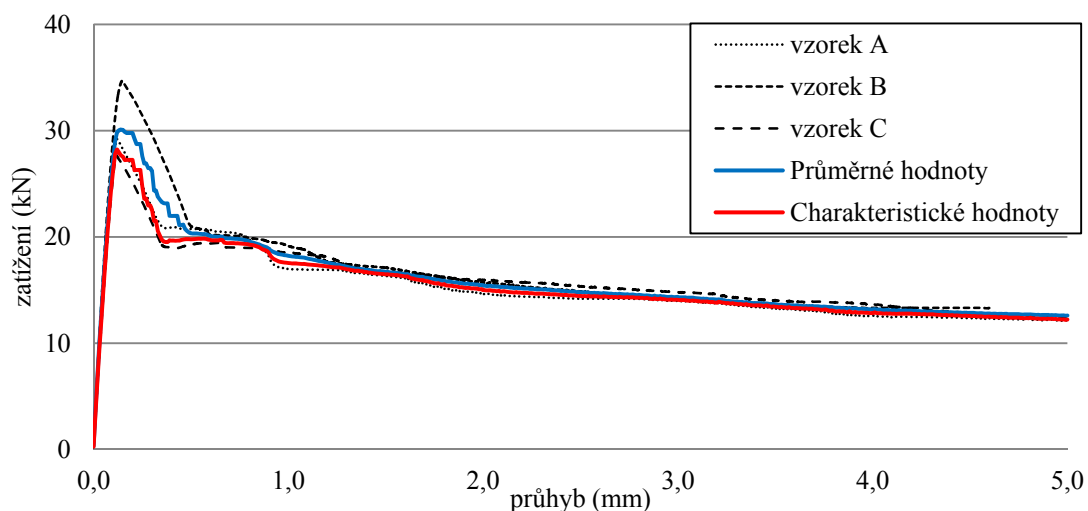
Tab. 47: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

δ	$\varepsilon_{fc,ti}$	$10 \xi_i$	$\sigma_{fc,ck,i}$	$f_{fc,tk,i}$	$100 \rho_{pl,i}$	ω_i	$\varepsilon_{fc,ci}$	$10 \lambda_{wi}$
	[‰]	-	[MPa]	[MPa]	[m ⁻¹]	[mm]	[‰]	-
0,50	0,61	4,39	6,51	2,55	0,57	0,23	0,48	3,53
1,00	1,28	3,34	8,72	2,19	0,65	0,63	0,64	5,49
1,50	1,98	2,81	10,48	2,04	0,72	1,06	0,77	6,38
2,00	2,71	2,47	12,00	1,96	0,79	1,49	0,89	6,91
2,50	3,44	2,23	13,34	1,91	0,85	1,93	0,99	7,26
3,00	4,19	2,05	14,56	1,87	0,91	2,37	1,08	7,53
3,50	4,94	1,90	15,70	1,85	0,96	2,82	1,16	7,73
4,00	5,69	1,79	16,76	1,83	1,01	3,28	1,24	7,89
4,50	6,45	1,69	17,77	1,81	1,06	3,73	1,31	8,02
5,00	7,22	1,61	18,73	1,80	1,11	4,19	1,39	8,13

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,6 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 4,95 MPa.

C 25/30 30kg DE 50/1,0 N – těžené kamenivo



Graf 47: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

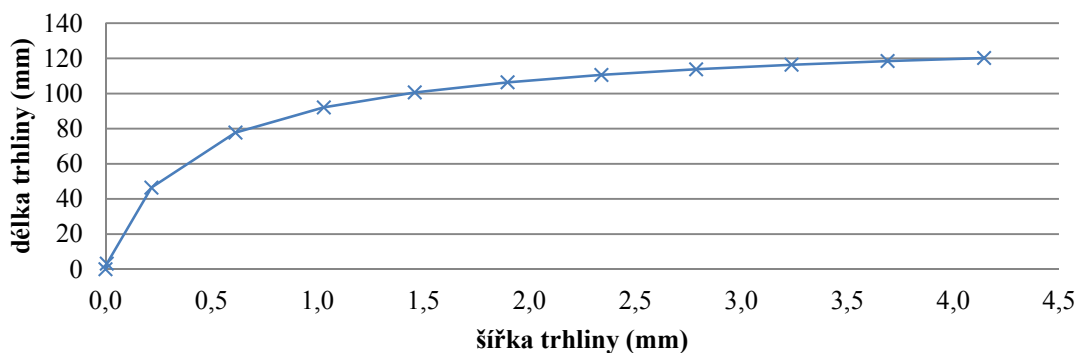
Tab. 48: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

	a_1	a_2	h	m	ob.hmotnost	$F_{Rm,c}$	$F_{Rk,c}$	$F_{Rm,res,1}$	$F_{Rk,res,1}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,4	150,9	700,0	35,944	2263	30,10	28,23	13,68	13,44
vzorek B	150,0	151,0	700,0	35,958	2268				
vzorek C	150,1	150,7	700,0	35,981	2273				

Tab. 49: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

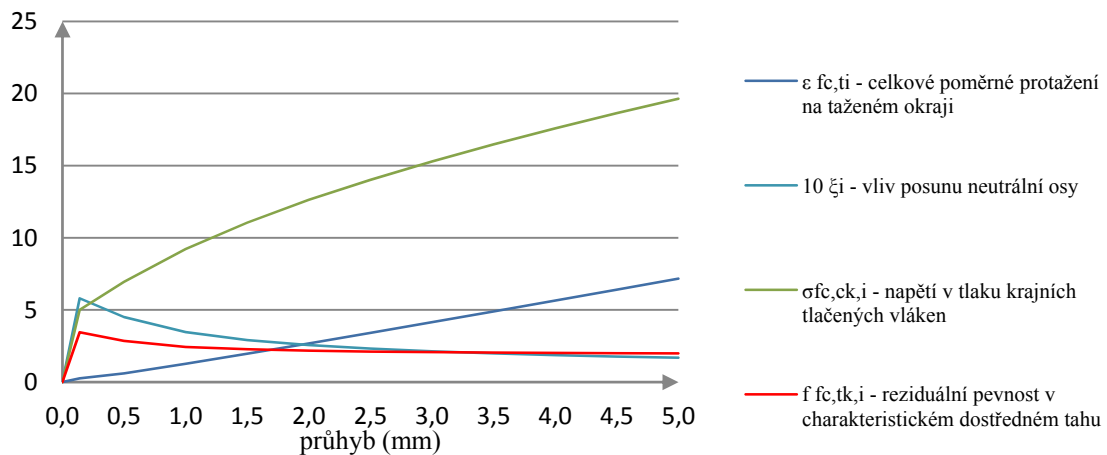
	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0226	2,092	92,56	24,14	23,16
vzorek B	0,0227	3,128	137,85		
vzorek C	0,0226	1,862	82,28		

závislost délky trhliny na její šířce

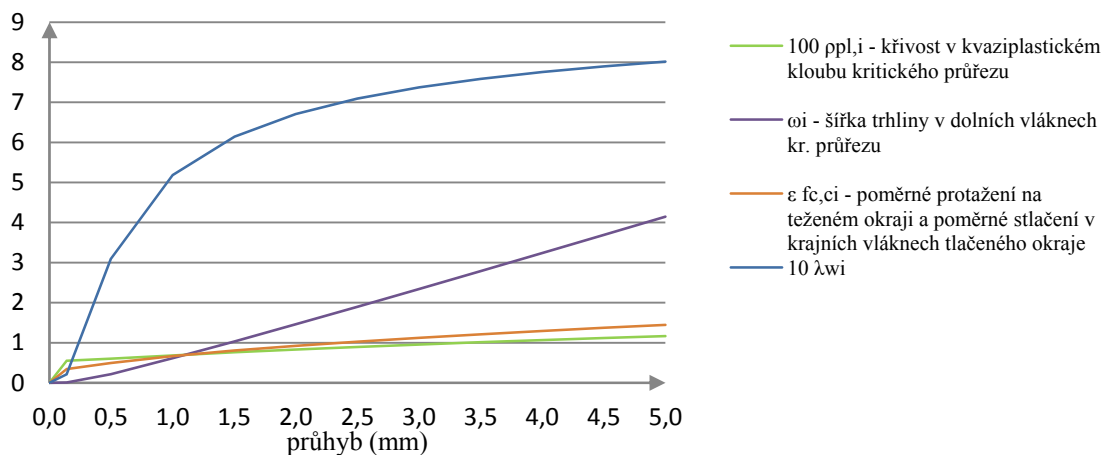


Graf 48: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 49: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo



Graf 50: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

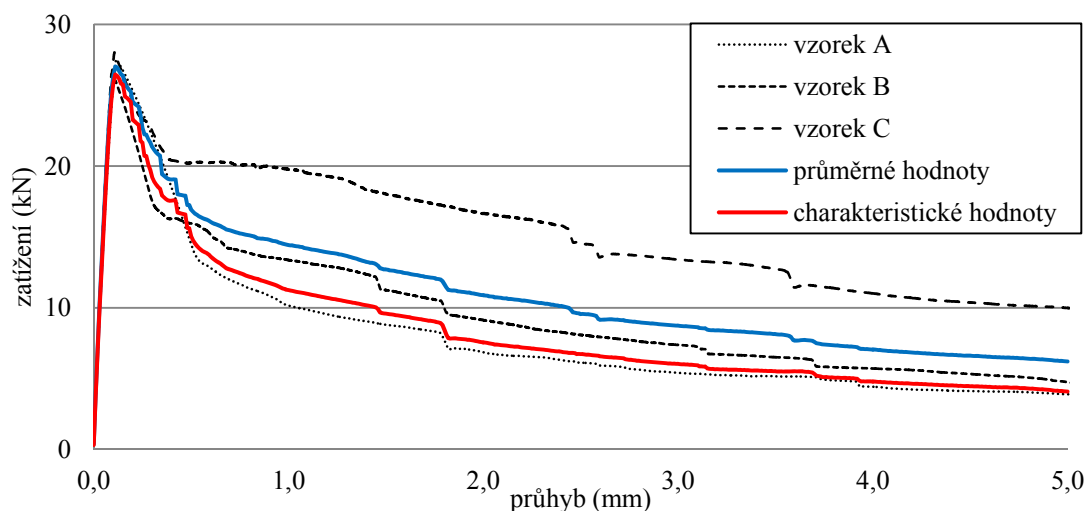
Tab. 50: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo

δ	ε _{fc,ti}	10 ξ _i	σ _{fc,ck,i}	f _{fc,tk,i}	100 ρ _{pl,i}	ω _i	ε _{fc,ci}	10 λ _{wi}
	[‰]	-	[MPa]	[MPa]	[m ⁻¹]	[mm]	[‰]	-
0,50	0,60	4,51	6,94	2,85	0,60	0,22	0,49	3,10
1,00	1,26	3,46	9,22	2,43	0,68	0,61	0,67	5,18
1,50	1,96	2,91	11,05	2,27	0,76	1,03	0,81	6,14
2,00	2,68	2,56	12,62	2,18	0,83	1,46	0,92	6,71
2,50	3,41	2,32	14,01	2,11	0,90	1,90	1,03	7,09
3,00	4,15	2,13	15,29	2,07	0,96	2,34	1,12	7,37
3,50	4,89	1,98	16,47	2,04	1,01	2,79	1,21	7,59
4,00	5,65	1,86	17,58	2,01	1,07	3,24	1,29	7,76
4,50	6,40	1,76	18,63	2,00	1,12	3,69	1,37	7,90
5,00	7,16	1,68	19,64	1,98	1,17	4,15	1,45	8,01

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,6 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 4,95 MPa.

C 25/30 20kg DE 50/1,0 M – těžené kamenivo



Graf 51: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

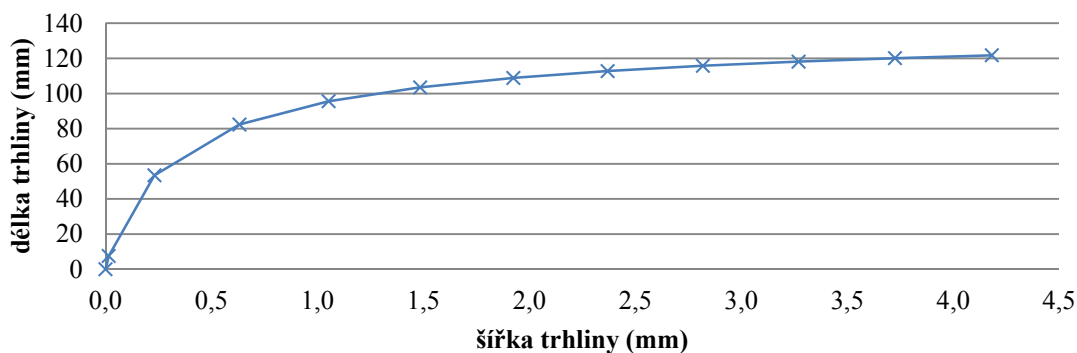
Tab. 51: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

	a ₁	a ₂	h	m	ob.hmotnost	F _{Rm,c}	F _{Rk,c}	F _{Rm,res,1}	F _{Rk,res,1}
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,5	149,4	700,0	36,262	2305	27,03	26,46	8,15	5,53
vzorek B	150,8	150,0	700,0	36,533	2308				
vzorek C	150,8	149,4	700,0	36,432	2310				

Tab. 52: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

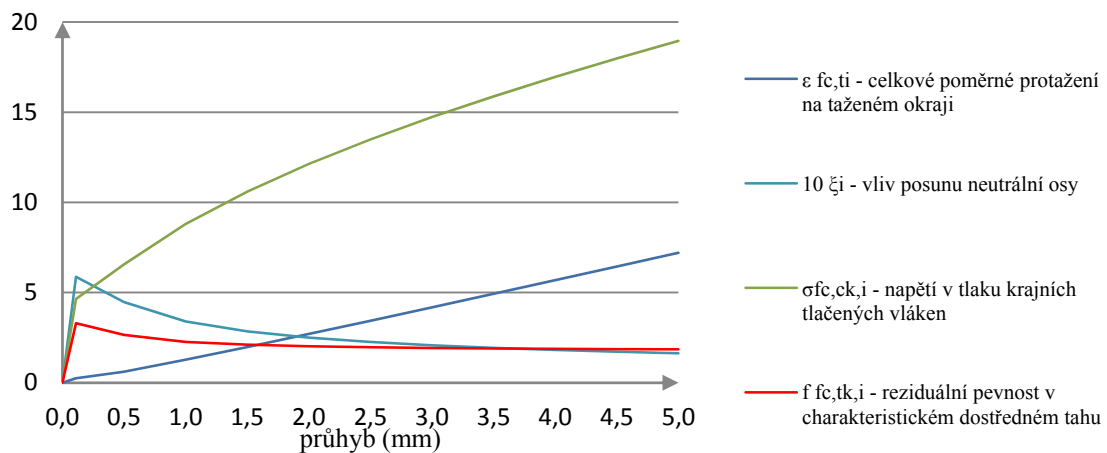
	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0226	1,876	83,42	3,67	4,67
vzorek B	0,0226	1,686	74,52		
vzorek C	0,0225	1,753	77,80		

závislost délky trhliny na její šířce

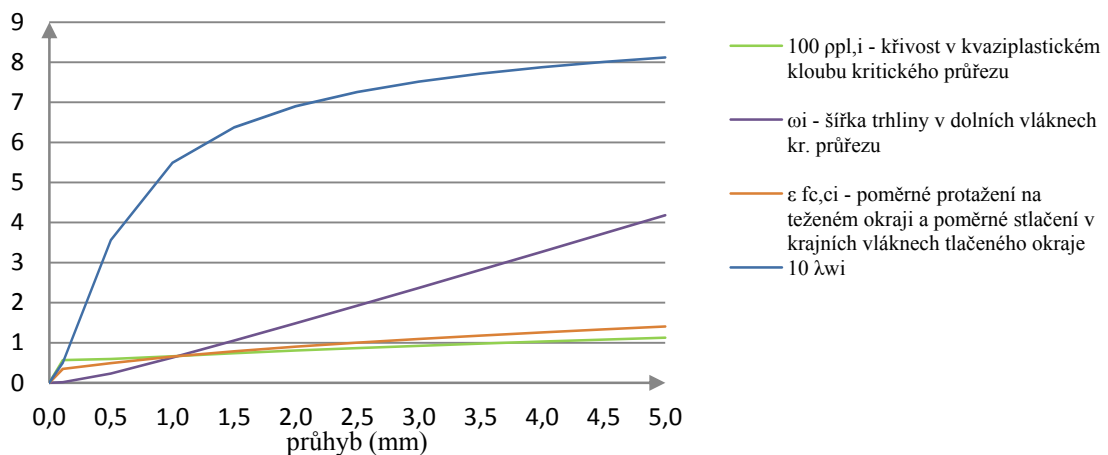


Graf 52: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 53: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžné kamenivo



Graf 54: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžné kamenivo

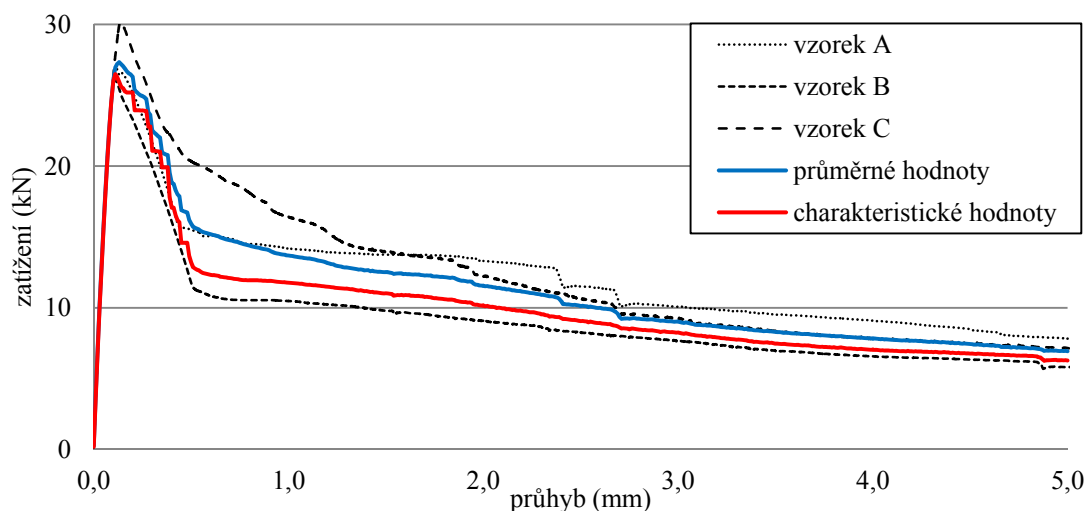
Tab. 53: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžné kamenivo

δ	$\varepsilon_{fc,ti}$ [‰]	$10 \xi_i$ -	$\sigma_{fc,ck,i}$ [MPa]	$f_{fc,tk,i}$ [MPa]	$100 \rho_{pl,i}$ [m ⁻¹]	ω_i [mm]	$\varepsilon_{fc,ci}$ [‰]	$10 \lambda_{wi}$ -
0,50	0,61	4,47	6,56	2,65	0,59	0,23	0,49	3,56
1,00	1,28	3,39	8,80	2,26	0,66	0,63	0,66	5,49
1,50	1,98	2,85	10,59	2,11	0,74	1,05	0,79	6,37
2,00	2,70	2,50	12,13	2,02	0,80	1,48	0,90	6,90
2,50	3,43	2,26	13,49	1,97	0,87	1,92	1,00	7,26
3,00	4,18	2,07	14,73	1,93	0,92	2,37	1,09	7,52
3,50	4,93	1,93	15,88	1,90	0,98	2,82	1,18	7,72
4,00	5,68	1,81	16,96	1,88	1,03	3,27	1,26	7,88
4,50	6,44	1,71	17,98	1,86	1,08	3,73	1,33	8,01
5,00	7,20	1,63	18,95	1,85	1,13	4,18	1,41	8,12

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,5 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 4,87 MPa.

C 25/30 25 kg DE 50/1,0 M – těžené kamenivo



Graf 55: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

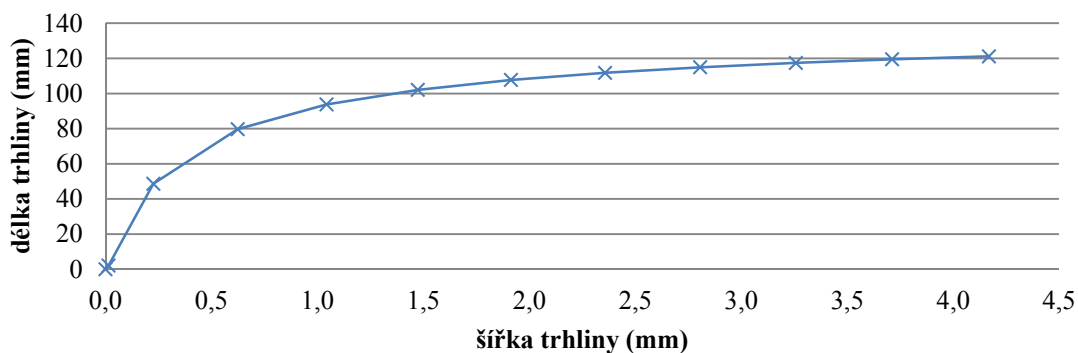
Tab. 54: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

	a_1 [mm]	a_2 [mm]	h [mm]	m [kg]	ob.hmotnost [kg/m ³]	$F_{Rm,c}$ [kN]	$F_{Rk,c}$ [kN]	$F_{Rm,res,1}$ [kN]	$F_{Rk,res,1}$ [kN]
vzorek A	150,7	149,6	700,0	36,384	2306	27,34	26,49	8,30	7,47
vzorek B	151,4	149,7	700,0	36,171	2280				
vzorek C	150,4	150,2	700,0	36,036	2279				

Tab. 55: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

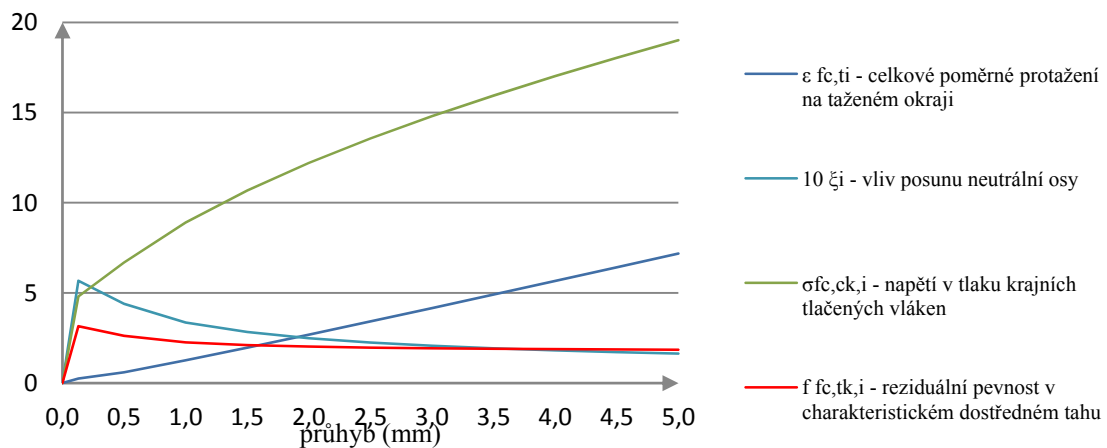
	plocha [m ²]	práce [N.m]	specifická lomová energie [N.m ⁻¹]	sm.odchylka -	variační koeficient [%]
vzorek A	0,0225	1,936	85,86	16,33	18,50
vzorek B	0,0227	1,576	69,54		
vzorek C	0,0226	2,470	109,32		

závislost délky trhliny na její šířce

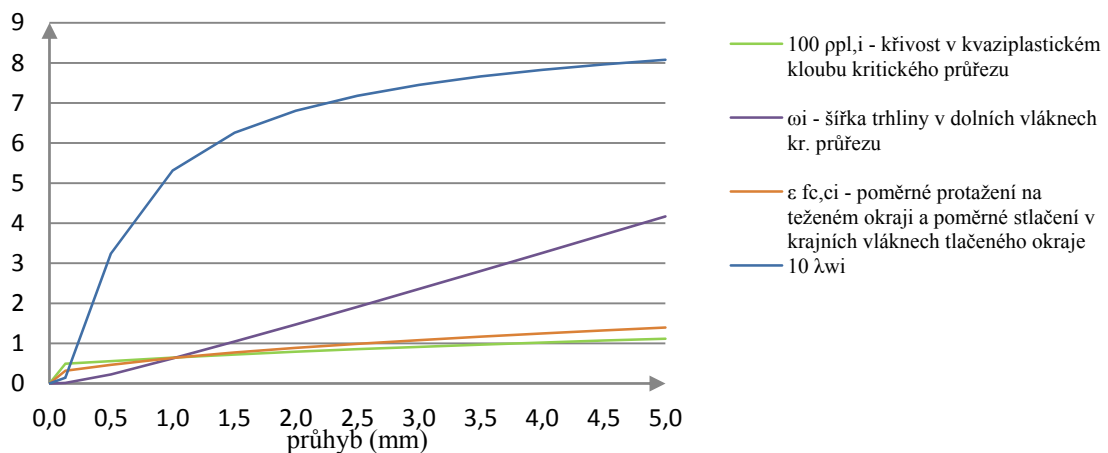


Graf 56: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 57: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo



Graf 58: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

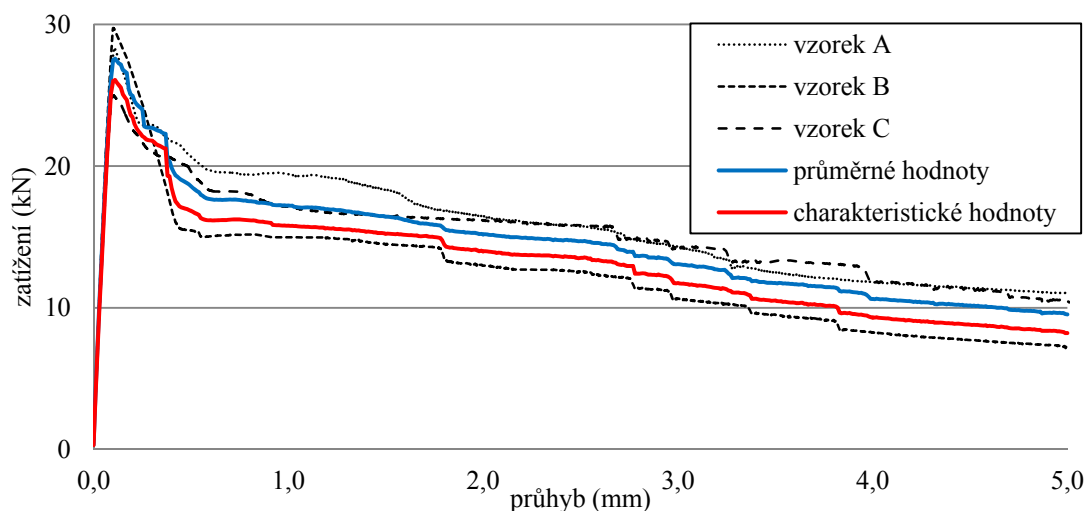
Tab. 56: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

δ	$\varepsilon_{fc,ti}$	$10 \xi_i$	$\sigma_{fc,ck,i}$	$f_{fc,tk,i}$	$100 \rho_{pl,i}$	ω_i	$\varepsilon_{fc,ci}$	$10 \lambda_{wi}$
	[‰]	-	[MPa]	[MPa]	[m ⁻¹]	[mm]	[‰]	-
0,50	0,60	4,39	6,69	2,62	0,56	0,23	0,47	3,24
1,00	1,26	3,36	8,90	2,25	0,64	0,62	0,64	5,32
1,50	1,96	2,83	10,68	2,10	0,72	1,04	0,77	6,25
2,00	2,68	2,49	12,21	2,02	0,79	1,47	0,89	6,81
2,50	3,41	2,25	13,56	1,97	0,86	1,91	0,99	7,18
3,00	4,16	2,07	14,79	1,93	0,91	2,36	1,08	7,45
3,50	4,91	1,92	15,94	1,90	0,97	2,81	1,17	7,66
4,00	5,66	1,81	17,02	1,88	1,02	3,26	1,25	7,83
4,50	6,42	1,71	18,04	1,86	1,07	3,71	1,33	7,96
5,00	7,18	1,63	19,01	1,85	1,12	4,17	1,40	8,08

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,5 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 4,93 MPa.

C 25/30 30kg DE 50/1,0 M – těžené kamenivo



Graf 59: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

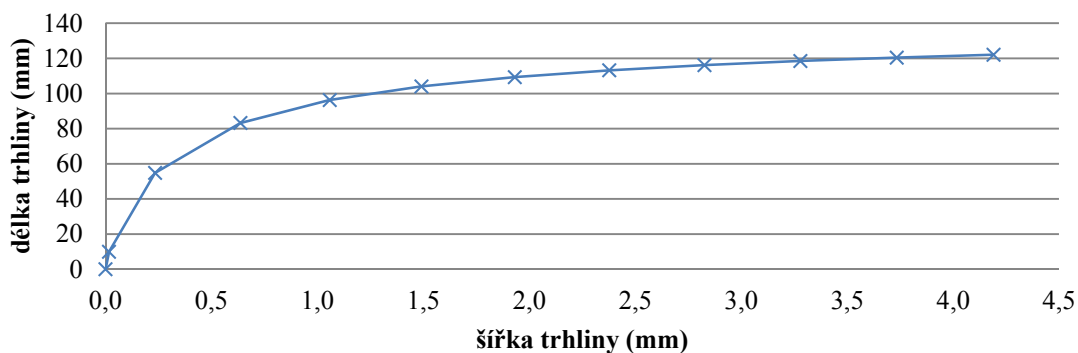
Tab. 57: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

	a_1 [mm]	a_2 [mm]	h [mm]	m [kg]	ob.hmotnost [kg/m ³]	$F_{Rm,c}$ [kN]	$F_{Rk,c}$ [kN]	$F_{Rm,res,1}$ [kN]	$F_{Rk,res,1}$ [kN]
vzorek A	150,9	150,2	700,0	36,339	2290	27,58	26,08	11,75	10,51
vzorek B	151,5	151,4	700,0	36,617	2139				
vzorek C	150,0	149,8	700,0	36,555	2324				

Tab. 58: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

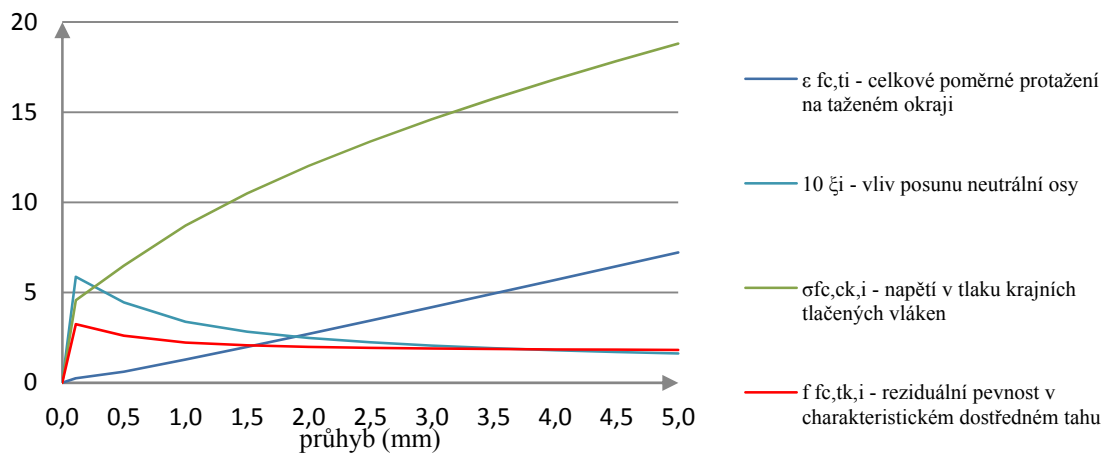
	plocha [m ²]	práce [N.m]	specifická lomová energie [N.m ⁻¹]	sm.odchylka -	variační koeficient [%]
vzorek A	0,0227	1,740	76,77	3,77	5,20
vzorek B	0,0229	1,677	73,11		
vzorek C	0,0225	1,519	67,61		

závislost délky trhliny na její šířce

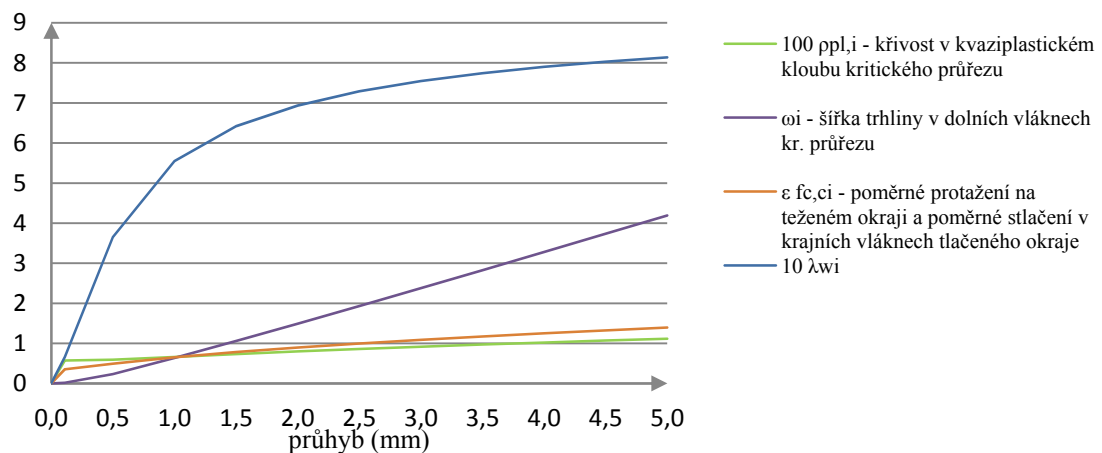


Graf 60: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

Základní charakteristiky drátkobetonu odvozené z diagramu odolnosti



Graf 61: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo



Graf 62: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

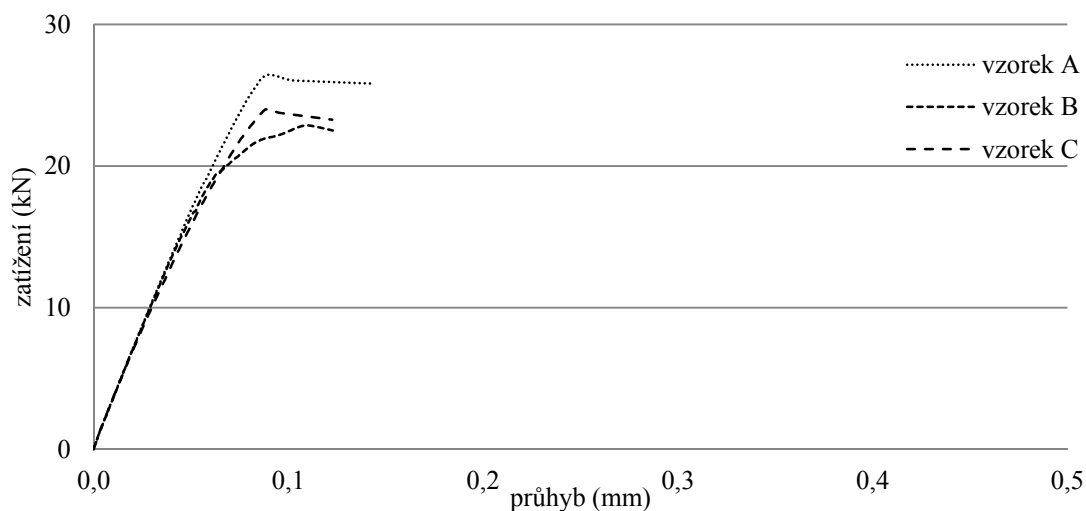
Tab. 59: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo

δ	$\epsilon_{fc,ti}$	$10 \xi_i$	$\sigma_{fc,ck,i}$	$f_{fc,tk,i}$	$100 \rho_{pl,i}$	ω_i	$\epsilon_{fc,ci}$	$10 \lambda_{wi}$
	[‰]	-	[MPa]	[MPa]	[m ⁻¹]	[mm]	[‰]	-
0,50	0,61	4,46	6,48	2,61	0,59	0,23	0,49	3,65
1,00	1,28	3,38	8,72	2,22	0,66	0,64	0,65	5,55
1,50	1,99	2,83	10,50	2,07	0,73	1,06	0,78	6,42
2,00	2,71	2,49	12,03	1,99	0,80	1,49	0,90	6,94
2,50	3,45	2,24	13,38	1,93	0,86	1,93	1,00	7,29
3,00	4,19	2,06	14,61	1,90	0,92	2,38	1,09	7,55
3,50	4,94	1,92	15,75	1,87	0,97	2,83	1,17	7,74
4,00	5,70	1,80	16,82	1,85	1,02	3,28	1,25	7,90
4,50	6,46	1,70	17,84	1,83	1,07	3,73	1,33	8,03
5,00	7,22	1,62	18,81	1,82	1,12	4,19	1,40	8,14

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 0,8 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 4,97 MPa.

C 25/30 – drcené kamenivo



Graf 63: Vyhodnocení C25/30 drcené kamenivo

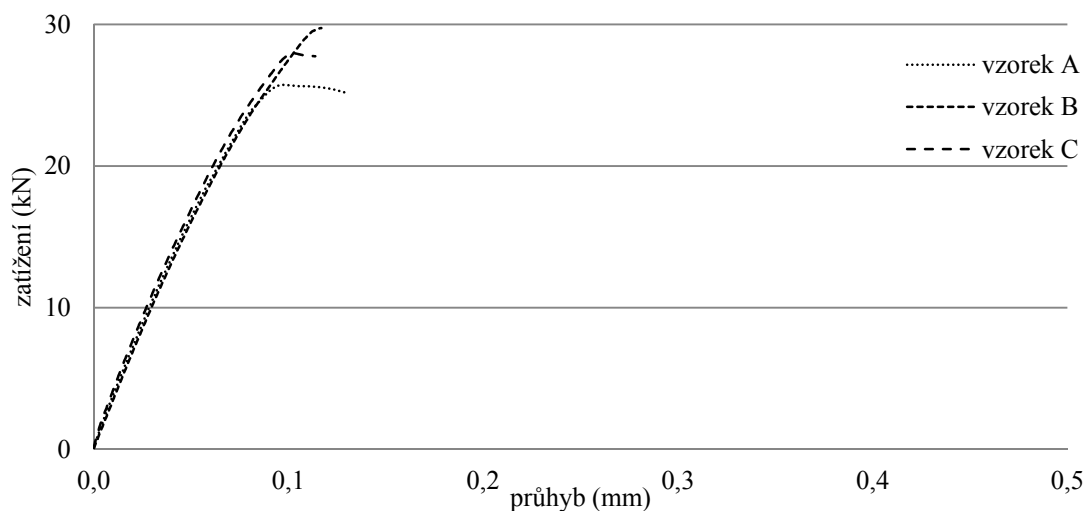
Tab. 60: Vyhodnocení C25/30 drcené kamenivo

	a_1	a_2	h	m	ob.hmotnost	$F_{Rm,c}$	$F_{Rk,c}$	$F_{Rm,res,1}$	$F_{Rk,res,1}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,6	150,7	700,0	36,800	2317	24,00	23,22	-	-
vzorek B	150,8	150,7	700,0	37,168	2336				
vzorek C	150,3	150,6	700,0	36,870	2323				

Tab. 61: Vyhodnocení C25/30 drcené kamenivo

	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0227	1,358	59,85	7,79	12,46
vzorek B	0,0229	1,662	73,11		
vzorek C	0,0225	1,236	54,59		

C 25/30 – těžené kamenivo



Graf 64: Vyhodnocení C25/30 těžené kamenivo

Tab. 62: Vyhodnocení C25/30 těžené kamenivo

	a ₁	a ₂	h	m	ob.hmotnost	F _{Rm,c}	F _{Rk,c}	F _{Rm,res,1}	F _{Rk,res,1}
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,4	150,7	700,0	36,059	2272	27,66	26,46	-	-
vzorek B	150,8	151,6	700,0	36,205	2272				
vzorek C	150,3	151,9	700,0	36,467	2282				

Tab. 63: Vyhodnocení C25/30 těžené kamenivo

	plocha	práce	specifická lomová energie	sm.odchylka	variační koeficient
	[m ²]	[N.m]	[N.m ⁻¹]	-	[%]
vzorek A	0,0227	1,421	62,69	9,79	14,21
vzorek B	0,0229	1,893	82,79		
vzorek C	0,0228	1,401	61,37		

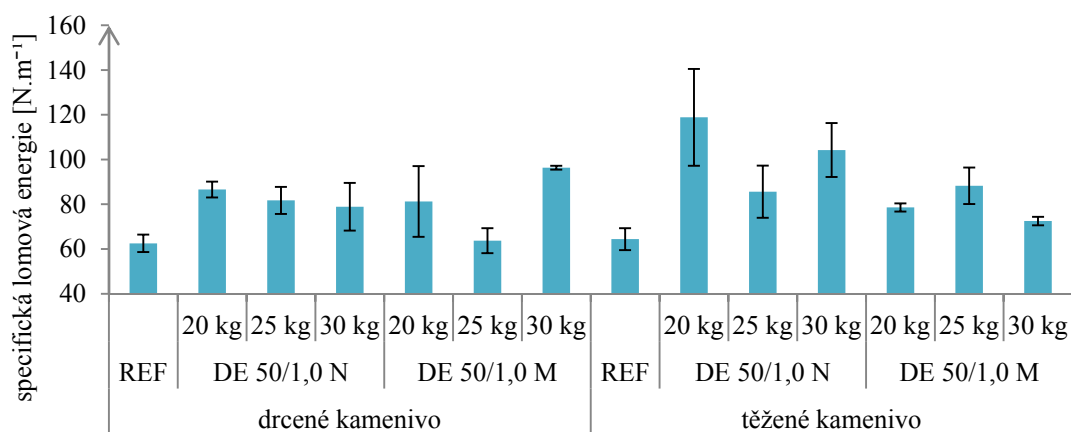
11.3 Specifická lomová energie

Specifická lomová energie byla počítána do hodnoty zatížení $F_{Rm,c}$. Jednotlivé lomové energie byly zprůměrovány, byla spočítána směrodatná odchylka a variační koeficient. Data jsou uvedena v následující tabulce:

Tab. 64: Specifická lomová energie, směrodatná odchylka, variační koeficient

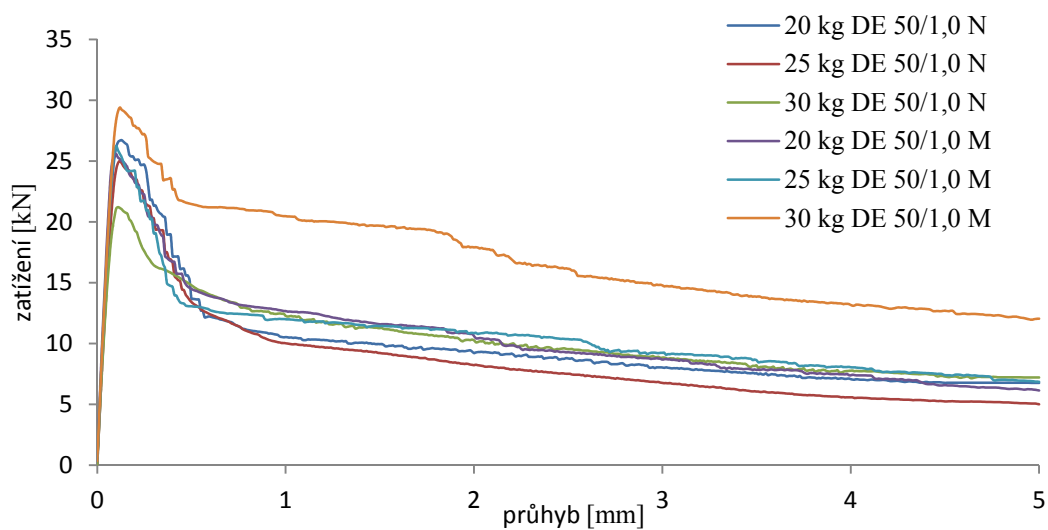
	$F_{Rm,c}$	$\delta_{tm,c}$	lom.energie	sm.odch.	var. koef.
	[kN]	[mm]	[N.m ⁻¹]	[-]	[%]
C 25/30 – drcené kamenivo	25,22	0,11	62,52	7,79	12,46
C 25/30 – těžené kamenivo	27,66	0,12	64,42	9,79	14,21
C 25/30 30kg DE 50/1,0 M – těžené kamenivo	27,58	0,11	72,49	3,77	5,20
C 25/30 25 kg DE 50/1,0 M – těžené kamenivo	27,34	0,13	88,24	16,33	18,50
C 25/30 20kg DE 50/1,0 M – těžené kamenivo	27,03	0,11	78,58	3,67	4,67
C 25/30 30kg DE 50/1,0 N – těžené kamenivo	30,10	0,14	104,23	24,14	23,16
C 25/30 25kg DE 50/1,0 N – těžené kamenivo	27,47	0,12	85,62	23,37	27,29
C 25/30 20kg DE 50/1,0 N – těžené kamenivo	27,25	0,18	118,85	43,29	36,43
C 25/30 30kg DE 50/1,0 M – drcené kamenivo	29,40	0,12	96,32	1,70	1,76
C 25/30 25kg DE 50/1,0 M – drcené kamenivo	26,23	0,10	63,75	11,17	17,53
C 25/30 20kg DE 50/1,0 M – drcené kamenivo	25,57	0,10	81,25	31,62	38,92
C 25/30 30kg DE 50/1,0 N – drcené kamenivo	21,21	0,11	78,88	21,32	27,03
C 25/30 25kg DE 50/1,0 N – drcené kamenivo	25,01	0,12	81,73	12,09	14,80
C 25/30 20kg DE 50/1,0 N – drcené kamenivo	26,72	0,13	86,58	7,11	8,22

V následujícím grafu jsou znázorněny hodnoty specifické lomové energie včetně směrodatné odchylky.

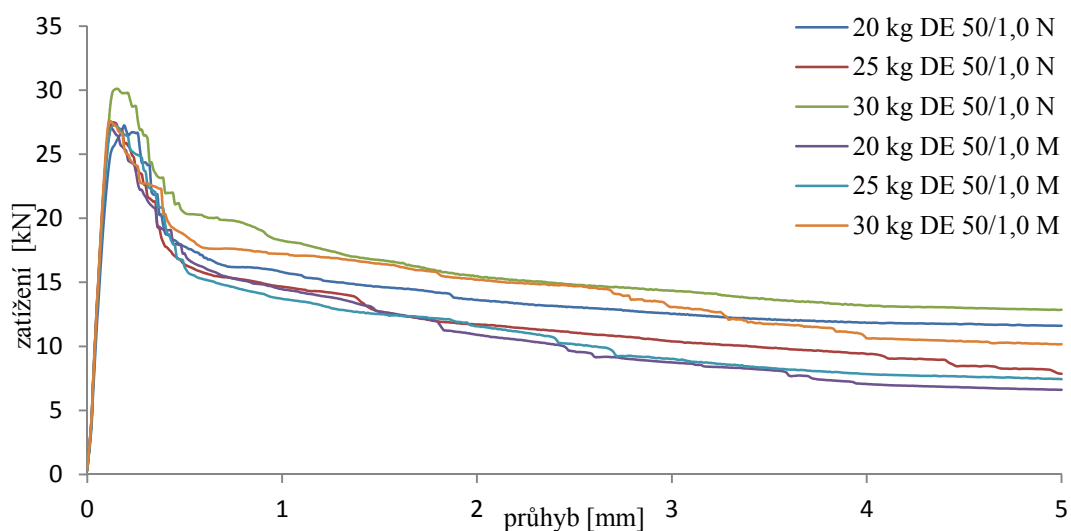


Graf 65: Specifická lomová energie

11.4 Porovnání pevností v tahu za ohybu



Graf 66: Charakteristické hodnoty drceného kameniva



Graf 67: Charakteristické hodnoty těžného kameniva

Z uvedených hodnot průměrných pevností vláknobetonu je zřejmé, že pevnosti až tolik nezáleží na množství obsahu vláken, typu použitého kameniva a typu drátků. Nejvyšších pevností dosahovala sada obsahující 30 kg DE 50/1,0 M v kombinaci s drceným kamenivem, u ostatních hodnot nedošlo k žádnému výraznějšímu rozptýlu.

11.5 Označování tříd vláknobetonu dle TP FC 1 – 1

Pro označení vláknobetonu jako kompozitního materiálu, využitelného při návrhu nosných vláknobetonových konstrukcí, slouží podrobnější charakteristika jeho pevnostní třídy, popř. ještě výstižnější charakteristika jeho třídy duktility:

Pevnostní třída vláknobetonu

$$FC \ f_{fc,ck} / f_{fc,ck,cub} - f_{fc,tk} / f_{fc,tk,res,j} - f_{fc,tk,sp}$$

Např. FC 40/45 – 3,2/0,8 – 3,8

Třída duktility vláknobetonu

$$FC \ (f_{fc,ck} / \epsilon_{fc,cu}) / f_{fc,ck,cub} - f_{fc,tk} / (f_{fc,tk,res,j} / \epsilon_{fc,t,res,j}) - f_{fc,tk,sp}$$

Např. FC (40/4,35)/45 - 3,2/(0,8/6,10) - 3,8

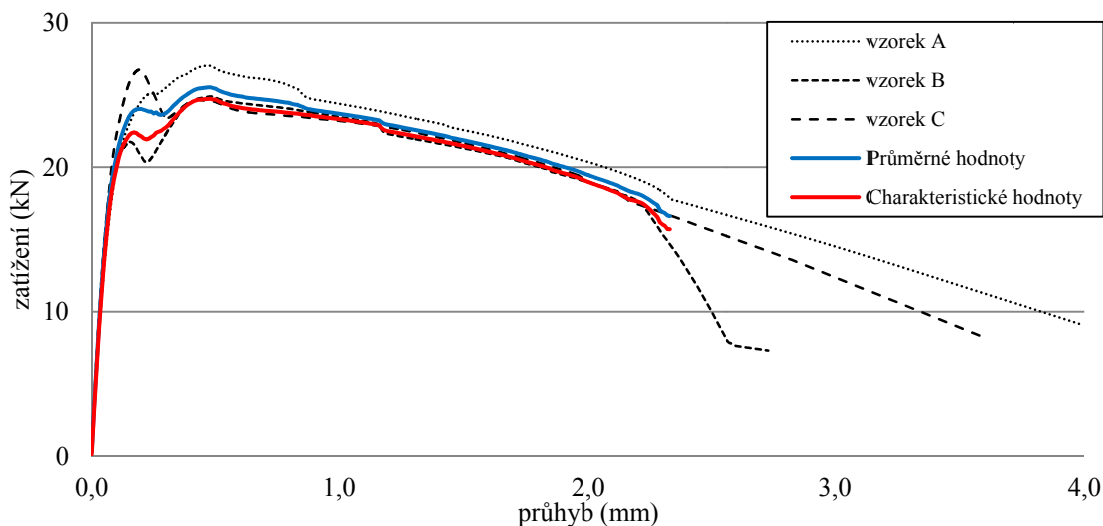
V praxi se ovšem s takovýmto označením nesetkáme. Certifikovaný vláknobeton se u nás vůbec nevyrábí, veškeré konstrukce se skládají z certifikovaného betonu a z certifikovaných vláken. Označení takto vzniklého kompozitního materiálu je většinou následující:

Např. C 25/30 20 kg

C 25/30 20 kg DE 50/1,0 N

12 Vyhodnocení trámů s KARI sítí

Pro názorné porovnání pevností v tahu ohybem bylo použito referenčního betonu, betonu s rozptýlenou výztuží a svařovaných sítí. Postup práce je popsán v předešlých kapitolách, výsledky referenčního betonu a drátkobetonu je možné nalézt v kapitole č. 11.



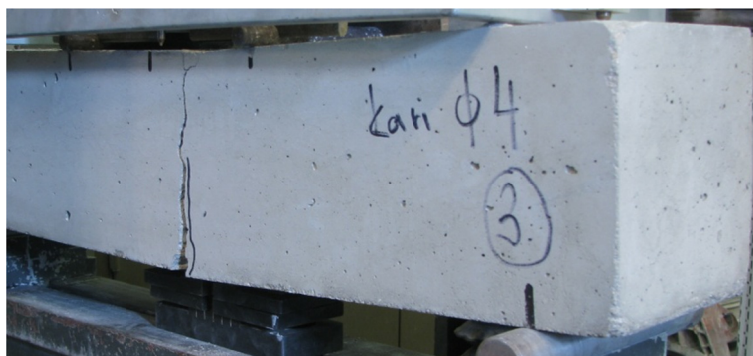
Graf 68: Vyhodnocení trámů obsahujících KARI Ø 4

Tab. 65: Vyhodnocení trámů obsahujících KARI Ø 4

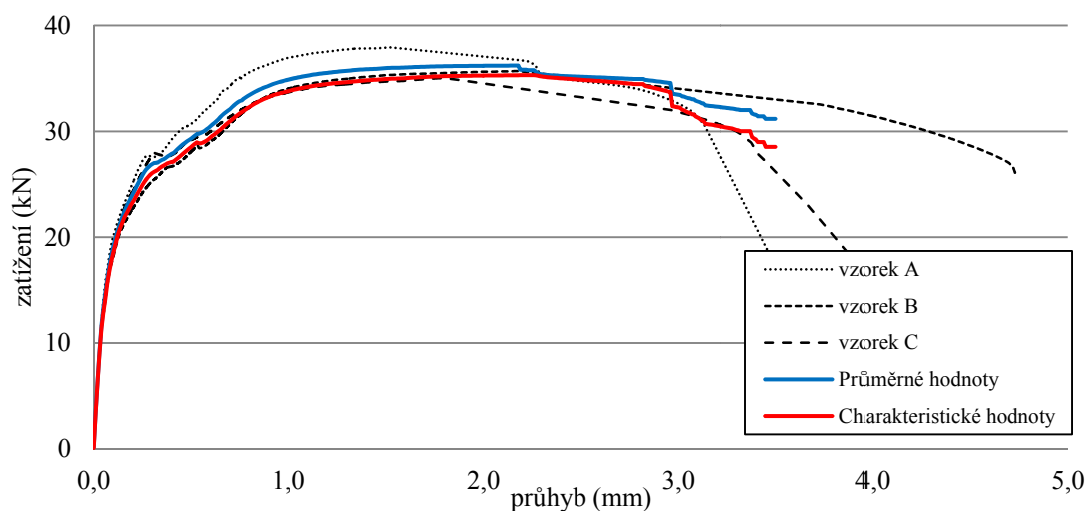
	a_1	a_2	h	m	ob.hmotnost	$F_{Rm,c}$	$F_{Rk,c}$	$F_{Rm,res,1}$	$F_{Rk,res,1}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,1	147,4	700,0	36,296	2344	25,54	24,74	-	-
vzorek B	150,6	148,7	700,0	36,386	2321				
vzorek C	150,7	149,7	700,0	36,779	2329				

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě by hodnota reziduální pevnosti byla 1,1 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu dle TP FC 1 - 1 je 4,61 MPa.



Obr. 12: Zkušební trávec č.3 při zkoušení pevnosti v tahu ohybem



Graf 69: Vyhodnocení trámů obsahujících KARI Ø 5

Tab. 66: Vyhodnocení trámů obsahujících KARI Ø 5

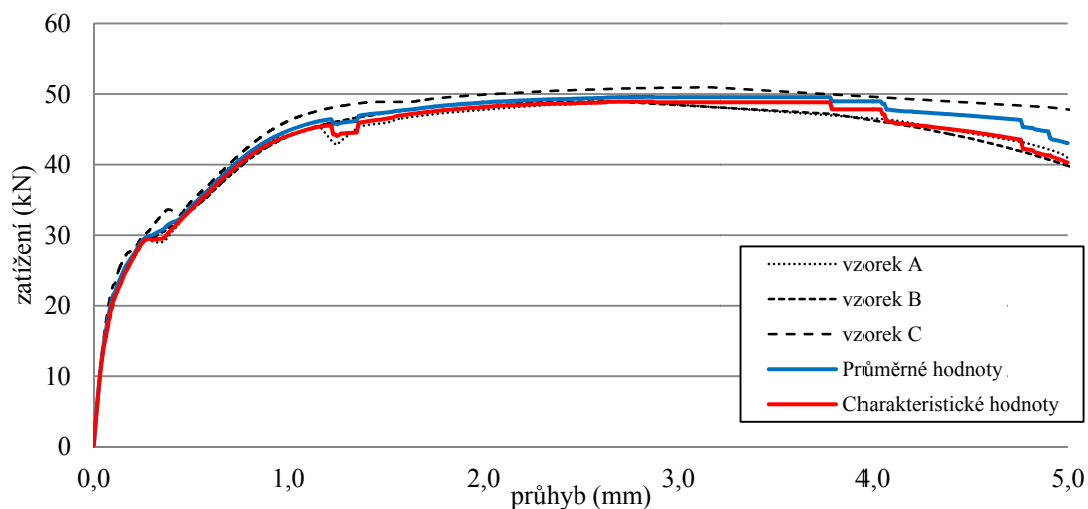
	a_1	a_2	h	M	ob.hmotnost	$F_{Rm,c}$	$F_{Rk,c}$	$F_{Rm,res,1}$	$F_{Rk,res,1}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,7	152,2	700,0	37,167	2315	36,22	35,30	31,18	28,53
vzorek B	150,9	147,9	700,0	36,246	2320				
vzorek C	150,7	148,6	700,0	36,283	2315				

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 2,0 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 6,51 MPa.



Obr. 13: Zkušební trámec č.1 při zkoušení pevnosti v tahu ohybem



Graf 70: Vyhodnocení trámů obsahujících KARI Ø 6

Tab. 67: Vyhodnocení trámů obsahujících KARI Ø 6

	a_1	a_2	h	m	ob.hmotnost	$F_{Rm,c}$	$F_{Rk,c}$	$F_{Rm,res,1}$	$F_{Rk,res,1}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m ³]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
vzorek A	150,2	149,8	700,0	36,182	2297	49,60	48,95	49,56	48,84
vzorek B	150,7	149,8	700,0	36,412	2304				
vzorek C	150,7	151,1	700,0	36,754	2306				

Nejnižší pevnostní třída vláknobetonu v reziduálním tahu po vzniku makrotrhliny je dle TP 0,4 MPa. V tomto případě je hodnota reziduální pevnosti 3,1 MPa.

Průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu je 8,89 MPa.

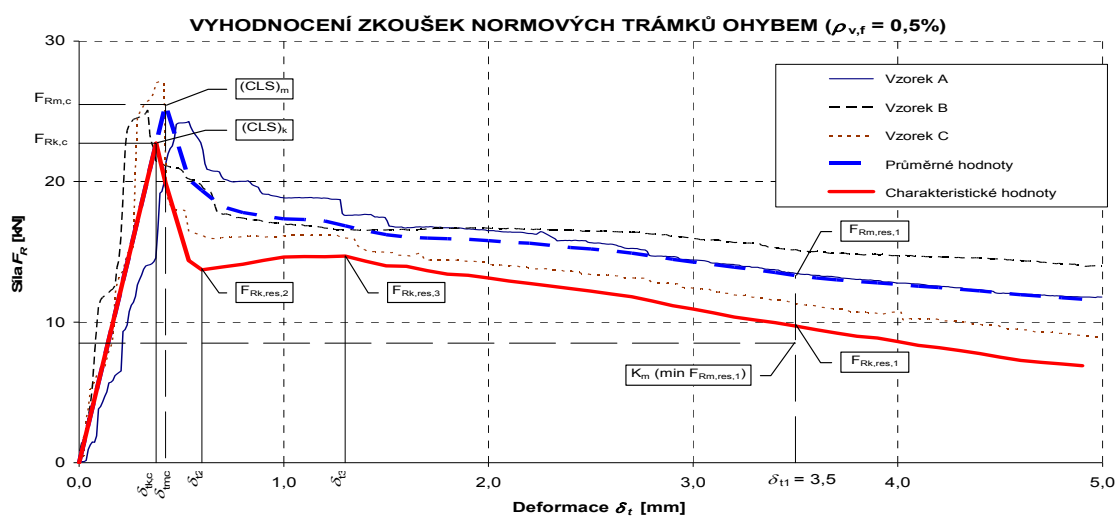


Obr. 14: Zkušební trámec č.1 při zkoušení pevnosti v tahu ohybem

STATICKÁ ČÁST

1 Diagramy odolnosti normových zkušebních trámů

Ze zkoušek jednotlivých normových trámů lze získat příslušné diagramy $(F_R - \delta_t)_j$, které umožní určit průměrný diagram $(F_R - \delta_t)_m$. Z průměrného diagramu odolnosti $(F_R - \delta_t)_m$ a směrodatných odchylek hodnot jednotlivých diagramů $(F_R - \delta_t)_j$ při zvolených průhybech δ_{ti} lze statisticky zaručit 5 % kvantil výskytu pro charakteristický diagram $(F_R - \delta_t)_k$.



Graf 71: Vyhodnocení zkoušek normových trámů ohybem

Bod $(CLS)_m$ na grafu $(F_R - \delta_t)_m$ je určen průměrnou odolností jednotlivých normových trámů $F_{Rm,c}$ a jejich průměrným průhybem $\delta_{tm,c}$, takže průměrnou redukovanou ohybovou tuhost $B_{m,red}$ lze určit ze vztahu:

$$B_{m,red} = \frac{3,8 \cdot F_{Rm,c}}{\delta_{tm,c}} = \frac{3,8 \cdot 21,215}{0,110} = 732,88 \text{ kNm}^2$$

při současném průměrném poměrném přetvoření krajních vláken kritického průřezu vláknobetonového normového trámku pro $\delta_{tm,c}$ ze vztahu:

$$\varepsilon_{fc,m,c} = \pm 2,0 \cdot \delta_{tm,c} = 2,0 \cdot 0,110 = 0,22 \text{ ‰}$$

a průměrné křivosti kritického průřezu normového trámku pro stejný průhyb $\delta_{tm,c}$ ze vztahu:

$$\rho_{m,c} = 0,026 \cdot \delta_{tm,c} = 0,026 \cdot 0,110 = 0,003 \text{ m}^{-1}$$

Z průměrného diagramu odolnosti při $(CLS)_m$ a $F_{Rm,c}$ lze podle pružnosti též určit napětí v krajních tažených vláknech kritického průřezu podle vztahu:

$$\sigma_{fc,tm,fl}=0,178 \cdot F_{Rm,c}=0,178 \cdot 21,215=3,78 \text{ MPa}$$

Po přičtení tahového napětí od vlastní tíhy trámku a od roznášecího zařízení síly $F_{Rm,c}$ v lisu do dvou zatěžovacích břemen $F_E/2$, jehož hodnotu lze odhadnout

$$\sigma_{fc,tg}\approx 0,06 \text{ MPa}$$

(odpovídá přírůstku síly odolnosti o $\Delta F_{Rg} = 0,35 \text{ kN}$), je průměrná pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu určená:

$$f_{fc,tm,fl}=0,178 \cdot F_{Rm,c} \cdot \left(1 + \frac{\Delta F_{Rg}}{F_{Rm,c}}\right)=0,178 \cdot 21,215 \cdot \left(1 + \frac{0,35}{21,215}\right)=3,8 \text{ MPa}$$

Uvedené stálé zatížení zkušebního trámku ovlivní i teoreticky skutečný průhyb zkušebního trámku $\delta_{tm,th,c}$ při $(CLS)_m$ podle vztahu:

$$\delta_{tm,th,c} = \delta_{tm,c} \cdot \left(1 + \frac{\Delta F_{Rg}}{F_{Rm,c}}\right)=0,11 \cdot \left(1 + \frac{0,35}{21,215}\right)=0,1119 \text{ mm}$$

Skutečným průhybem $\delta_{tm,th,c}$ se nahradí průhyb zjištěný při zkoušce $\delta_{tm,c}$, ale zpravidla jen v případech, že celkový průhyb $\delta_{tm,th,c} \geq 1,02 \delta_{tm,c}$.

$$\delta_{tm,th,c} \geq 1,02 \delta_{tm,c}$$

$$0,1119 \text{ mm} \geq 0,1122 \text{ mm}$$

Pokud není z průkazných zkoušek vláknobetonu v dostředném tahu zjištěna průměrná hodnota pevnosti v dostředném tahu $f_{fc,tm}$, lze ji odvodit podle ČSN EN 1992 – 1 – 1 ze vztahu:

$$f_{fc,tm} = \frac{f_{fc,tm,fl}}{1,45} = \frac{3,8}{1,45} = 2,6 \text{ MPa}$$

Z diagramu $(F_R - \delta_t)_m$ po $(CLS)_m$ lze předem určit, zda je možné využít QPL chování u nosného prvku konstrukce z vláknobetonu. V TP FC 1-1 je považováno pro zkoušený vláknobeton za rozhodující pro využití uvedené větve diagramu $(F_R - \delta_t)_{m, res}$, zda síla odolnosti $F_{Rm, res}$ až do smluvního průhybu normového trámku $\delta_{t1} = 3,5$ mm splňuje podmínku včetně kontrolního bodu $K \equiv (\min F_{fm, res, 1}; \delta_{t1})$:

$$F_{Rm, res} \geq \frac{F_{Rm, c}}{3} = \min(F_{Rm, res, 1})$$

$$8,206 \text{ kN} \geq 7,072 \text{ kN}$$

(ztužení makrotrhliny je dostatečné, můžeme počítat s QPL chováním vláknobetonového prvku)

Po překročení $(CLS)_m$ je nutné při $(QPL)_m$ chování zkušebního trámku uvažovat v kritickém průřezu napjatost vyjadřující kvazi-plastické chování vláken v tažené oblasti průřezu a zpravidla kvazipružné chování vláknobetonu v jeho tlačené oblasti. Tento stav po vzniku trhliny je provázen zvětšováním tahové oblasti průřezu vlivem přibližování neutrální osy k tlačnému okraji kritického průřezu.

Pro smluvní hodnotu průhybu $\delta_{t1} = 3,5$ mm a příslušnou průměrnou reziduální sílu odolnosti $F_{Rm, res, 1}$ lze určit informativní hodnotu reziduální průměrné pevnosti vláknobetonu v tahu, kterou lze považovat za pevnost dostřednou v tahové oblasti kritického průřezu. Reziduální pevnosti lze odvodit přibližně ze vztahu:

$$f_{fc, tm, res, 1} = 0,063 \cdot F_{Rm, res, 1} \cdot \left(1 + \frac{\Delta F_{Rg}}{F_{Rm, res, 1}}\right) = 0,063 \cdot 8,206 \cdot \left(1 + \frac{0,35}{8,206}\right) = 0,5 \text{ MPa}$$

Bezpečně lze uvažovat v tažené oblasti kritického průřezu náhradní rovnoměrné namáhání s tzv. ekvivalentní průměrnou pevností v dostředném tahu $f_{fc, tm, eq, 1}$:

$$f_{fc, tm, eq, 1} \cong f_{fc, tm, res, 1}$$

Pro spolehlivost vláknobetonových konstrukcí je však mnohem významnější charakteristický diagram odolnosti vláknobetonu v tahu $(F_R - \delta_t)_k$, který musí zaručit a vyhodnotit výrobce drátkobetonu tak, aby mohl projektantům poskytnout charakteristický pracovní diagram $(f_{fc} - \varepsilon_{fc})_k$ vyráběného vláknobetonu. V charakteristickém diagramu $(F_R - \delta_t)_k$ jsou statisticky vyhodnoceny odchylky F_{Ri} jednotlivých zkušebních trámků při jejich dohodnutých průhybech δ_{ti} .

Pro oblast QLE chování do $(CLS)_k$ je třeba stanovit statisticky charakteristickou hodnotu $F_{Rk,c}$ jako 5% kvantil výskytu síly $F_{Rm,c,j}$ u jednotlivých zkušebních trámek. V této oblasti při uvažované průměrné redukované ohybové tuhosti $B_{m,red}$ lze charakteristickou hodnotu průhybu $\delta_{tk,c}$ pro $F_{Rk,c}$ při $(CLS)_k$ určit ze vztahu:

$$\delta_{tk,c} = \delta_{tm,c} \cdot \frac{F_{Rk,c}}{F_{Rm,c}} = 0,110 \cdot \frac{20,250}{21,215} = 0,105 \text{ mm}$$

Do průhybu $\delta_{tk,c}$, který odpovídá $(CLS)_k$ při vzniku makrotrhliny lze uvažovat kvazilineární průběh diagramu $(F_R - \delta_t)_k$. Stanovení charakteristické pevnosti vláknobetonu v tahu za ohybu $f_{fc,tk,fl}$ je dáno ze vztahu:

$$f_{fc,tk,fl} = 0,178 \cdot F_{Rk,c} \cdot \left(1 + \frac{\Delta F_{Rg}}{F_{Rk,c}}\right) = 0,178 \cdot 20,250 \cdot \left(1 + \frac{0,35}{20,250}\right) = 3,7 \text{ MPa}$$

2 Vyhodnocení char. diagramu odolnosti $(F_R - \delta_t)_k$

Charakteristický diagram odolnosti $(F_R - \delta_t)_k$ je opět vyjádřen dvěma větvemi. QLE chování do $(CLS)_k$ a QPL chování po vzniku trhliny, kdy náhle rostou tahová poměrná přetvoření v kritickém průřezu.

Nárůst lze pozorovat i pro poměrná přetvoření určená pro QLE chování trámku při $(CLS)_k$ vlivem změny polohy neutrální osy x_{ri} v kritickém průřezu směrem k horním tlačným vláknům. Výška tahové oblasti průřezu h_{tc} je podle pružnosti pro obdélníkový průřez dána vztahem:

$$h_{tc} = h - x_{rc} = h \cdot (1 - \xi_c) = 0,5 \cdot 150 = 75 \text{ mm}$$

Po vzniku makrotrhliny se výška tahové oblasti h_{ti} zvětšuje obecně na hodnotu:

$$h_{ti} = h - x_{ri} = h \cdot (1 - \xi_i) = 150 \cdot (1 - 0,516) = 72,55 \text{ mm}$$

kde $\xi_i = x_{ri} / h$

Výška h_{ti} tedy roste i když křivost při charakteristické hodnotě teoretické odolnosti $(F_{Rk,c} + \Delta F_{Rg})$ zůstane stejná a rovná hodnotě podle vztahu:

$$\rho_{k,c} = 0,026 \cdot \delta_{tk,c} = 0,026 \cdot 0,100 = 0,003 \text{ m}^{-1}$$

kde $\delta_{tk,c}$ je hodnota charakteristického průhybu

Tomuto průhybu odpovídá pružné charakteristické poměrné protažení při $(CLS)_k$:

$$\varepsilon_{fc,tk,c} = 2,0 \cdot \delta_{tk,c} = 2,0 \cdot 0,105 = 0,21 \text{ ‰}$$

Po vzniku makrotrhliny vzrůstá poměrné protažení $\varepsilon_{fc,tk,c}$ s poměrem h_{ti} / h_{tc} podle vztahu:

$$\varepsilon_{fc,tk,i} = \varepsilon_{fc,tk,c} \cdot \frac{h_{ti}}{h_{tc}} = 4,0 \cdot \delta_{tk,c} \cdot (1 - \xi_i) = 4,0 \cdot 0,1 \cdot (1 - 0,516) = 0,193 \text{ ‰}$$

Po překročení $(CLS)_k$ a vzniku makrotrhliny v kritickém průřezu zkušebního trámku se vytvoří kvaziplastický kloub. Průhyb takto vzniklého kvazitrojkloubového mechanismu se zvětší o přírůstek $\Delta\delta_{ti}$ podle vztahu:

$$\Delta\delta_{ti} = \delta_{ti} - \delta_{tk,c} = 0,200 - 0,105 = 0,095 \text{ mm}$$

kde δ_{ti} je naměřená hodnota průhybu (v mm) po překročení $(CLS)_k$

$\delta_{tk,c}$ je charakteristická hodnota průhybu (v mm) při (CLS)

Při vzniku kvaziplastického kloubu únosnost kritického průřezu náhle poklesne na hodnotu, při které se aktivují vlákna v tažené oblasti průřezu. Současně vznikne i přírůstek poměrného protažení na taženém okraji kritického průřezu (v důsledku otevírání trhliny) o hodnotu:

$$\Delta\varepsilon_{fc,ti} = 1,67 \cdot \Delta\delta_{ti} \cdot (1 - \xi_i) = 1,67 \cdot 0,095 \cdot (1 - 0,516) = 0,08 \text{ ‰}$$

Celkové poměrné protažení na taženém okraji zkušebního trámku lze vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon_{fc,ti} = (4,0 \cdot \delta_{tk,c} + 1,67 \cdot \Delta\delta_{ti}) \cdot (1 - \xi_i) = (4,0 \cdot 0,105 + 1,67 \cdot 0,095) \cdot (1 - 0,516) = 0,28 \text{ ‰}$$

Pro zjednodušení výpočtu ξ_i je možné použít odhad ramene vnitřních sil z_i v kritickém průřezu, které je poměrně málo závislé na hodnotě ξ :

$$z_i = 75 \cdot \left(1 + \frac{\xi_i}{3}\right) = 75 \cdot \left(1 + \frac{0,516}{3}\right) = 87,91 \text{ mm}$$

V prvním kroku lze ξ_i nahradit odhadnutou hodnotou $\xi_{i,est}$ podle:

δ_{ti} [mm]	δ_{tkc}	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	$\geq 5,0$
$\xi_{i,est}$ [-]	0,5	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08

Upřesněnou hodnotu ξ_i lze získat ze vztahu:

$$\xi_i = \left[\frac{0,12 \cdot F_{Rk,i} \cdot \varepsilon_{fc,c3}}{f_{fc,ck} \cdot (4,0 \cdot \delta_{tk,c} + 1,67 \cdot \Delta \delta_{ti}) \cdot \left(1 + \frac{\xi_{i,est}}{3}\right)} \right]^{0,5} =$$

$$= \left[\frac{0,12 \cdot 20,25 \cdot 2}{27 \cdot (4,0 \cdot 0,105 + 1,67 \cdot 0,095) \cdot \left(1 + \frac{0,5}{3}\right)} \right]^{0,5} = 0,516$$

kde $F_{Rk,i}$ je charakteristická síla odolnosti zkušebního trámku při průhybu δ_{ti}

$\varepsilon_{ft,c3}$ prostá hodnota poměrného stlačení vláknobetonu (v ‰)
v krajních vláknech kritického průřezu při dosažení $f_{fc,ck}$. Zpravidla lze použít hodnotu $\varepsilon_{ft,c3} = 2,0$

$f_{fc,ck}$ charakteristická válcová pevnost vláknobetonu (v MPa)
v dostředném tlaku podle tlakové pevnostní třídy FC

Po určení hodnoty ξ_i stačí prokázat vliv ξ_i a $\xi_{i,est}$ na ramena vnitřních sil z_i a $z_{i,est}$ a splnit podmínku:

$$0,98 \leq \frac{z_i}{z_{i,est}} = \frac{1 + \frac{\xi_i}{3}}{1 + \frac{\xi_{i,est}}{3}} \leq 1,02$$

$$0,98 \leq \frac{1 + \frac{0,516}{3}}{1 + \frac{0,500}{3}} \leq 1,02$$

$$0,98 \leq 1,00 \leq 1,02$$

Pokud jsou meze v této podmínce překročeny, je třeba pokračovat v iteraci pro $\xi_{i,est} = \xi_i$ stanoveném v předchozím kroku.

Aby bylo možné využít vztah pro výpočet ξ_i , musí napětí v tlaku krajních tlačných vláken kritického průřezu, za předpokladu zachování rovinnosti průřezu i po průhybu trámku, splnit podmínku:

$$\sigma_{fc,ck,i} = f_{fc,ck} \cdot (4,0 \cdot \delta_{tk,c} + 1,67 \cdot \Delta \delta_{ti}) \cdot \frac{\xi_i}{\varepsilon_{fc,c3}} \leq f_{fc,ck}$$

$$\sigma_{fc,ck,i} = 27 \cdot (4,0 \cdot 0,105 + 1,67 \cdot 0,095) \cdot \frac{0,516}{2} \leq 27$$

$$\sigma_{fc,ck,i} = 4,034 \text{ MPa} \leq 27 \text{ MPa}$$

Pokud by podmínka spolehlivosti nebyla splněna, doporučuje se zvýšit tlakovou pevnostní třídu FC, popř. uvážit plné zplastizování tlačené oblasti kvaziplastického kloubu. V tomto případě lze určit výšku plně zplastizované tlačené oblasti x_{ui} opět z rovnováhy vnitřních normálových sil podle vztahu:

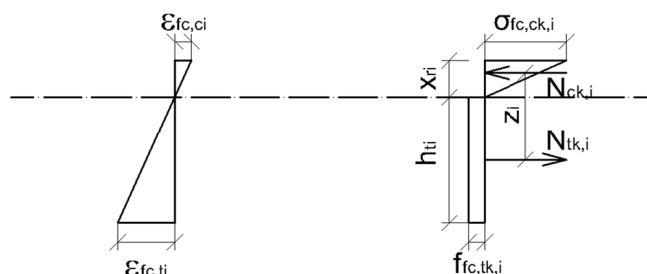
$$\xi_{ui} = (1 - \xi_i) \cdot \frac{f_{fc,tk,i}}{f_{fc,ck}} = (1 - 0,516) \cdot \frac{2,153}{27,0} = 0,039$$

kde ξ_{ui} je součinitel výšky plně zplastizované tlačené oblasti

$$\xi_{ui} = \frac{x_{ui}}{h} \rightarrow x_{ui} = h \cdot \xi_{ui} = 150 \cdot 0,039 = 5,85 \text{ mm}$$

a dále upravit pouze rameno normálových vnitřních sil v plastickém kloubu trojkloubového mechanismu podle vztahu:

$$z_{ui} = 75 \cdot (1 + \xi_i - \xi_{ui}) = 75 \cdot (1 + 0,516 - 0,039) = 110,84 \text{ mm}$$



Obr. 15: Napjatost krit. průřezu zkušebního trámku před plným zplastizováním

Nyní je možné též stanovit reziduální pevnost vláknobetonu v charakteristickém dostředném tahu v kritickém průřezu s trhlinou při průhybu δ_{ti} z rovnováhy vnitřních sil $N_{tk,i} = N_{ck,i}$ vztahem:

$$f_{fc,tk,i} = \frac{0,5 \cdot \sigma_{fc,ck,i} \cdot \xi_i}{(1-\xi_i)} = \frac{0,5 \cdot 4,03 \cdot 0,516}{(1-0,516)} = 2,15 \text{ MPa}$$

Poměrné protažení na taženém okraji a poměrné stlačení v krajních vláknech tlačného okraje zkušebního trámku stanovit vztahem:

$$\varepsilon_{fc,ci} = (4,0 \cdot \delta_{tk,c} + 1,67 \cdot \Delta \delta_{ti}) \cdot \xi_i = (4,0 \cdot 0,10 + 1,67 \cdot 0,095) \cdot 0,516 = 0,288 \text{ ‰}$$

Dále můžeme určit šířku trhliny v dolních vláknech kritického průřezu při průhybu δ_{ti} pomocí vztahu:

$$w_i = \left[1,2 \cdot \delta_{tk,c} \cdot \left(2 - \frac{1}{(1-\xi_i)} \right) + \Delta \delta_{ti} \right] \cdot (1-\xi_i) =$$

$$= \left[1,2 \cdot 0,10 \cdot \left(2 - \frac{1}{(1-0,516)} \right) + 0,095 \right] \cdot (1-0,516) = 0,042 \text{ mm}$$

a délku těchto trhlin l_{wi} pomocí součinitele λ_{wi} ,

kde

$$\lambda_{wi} = \frac{l_{wi}}{h} = (1-\xi_i) \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{fc,tk,c}}{\varepsilon_{fc,ti}} \right) = (1-0,516) \cdot \left(1 - \frac{0,21}{0,27} \right) = 0,108$$

kde $\varepsilon_{fc,tk,c}$ je poměrné protažení krajních tahových vláken na $(CLS)_k$

$\varepsilon_{fc,tk,i}$ je celkové poměrné protažení na taženém okraji zkušebního trámku

Platí tedy při h (v mm) vztah:

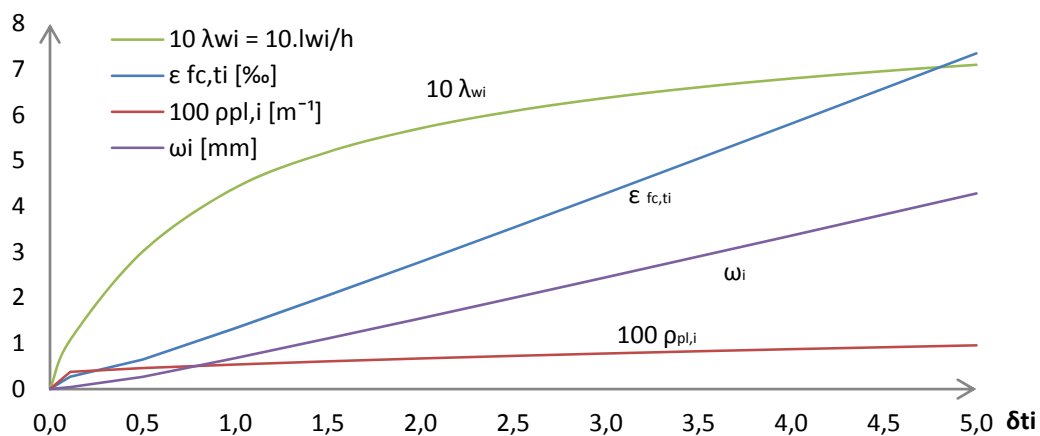
$$l_{wi} = 150 \cdot \lambda_{wi} = 150 \cdot 0,108 = 16,2 \text{ mm}$$

Dále lze stanovit i křivost v kvaziplastickém kloubu kritického průřezu zkušebního trámku při $\varepsilon_{fc,ti}$ podle vztahu:

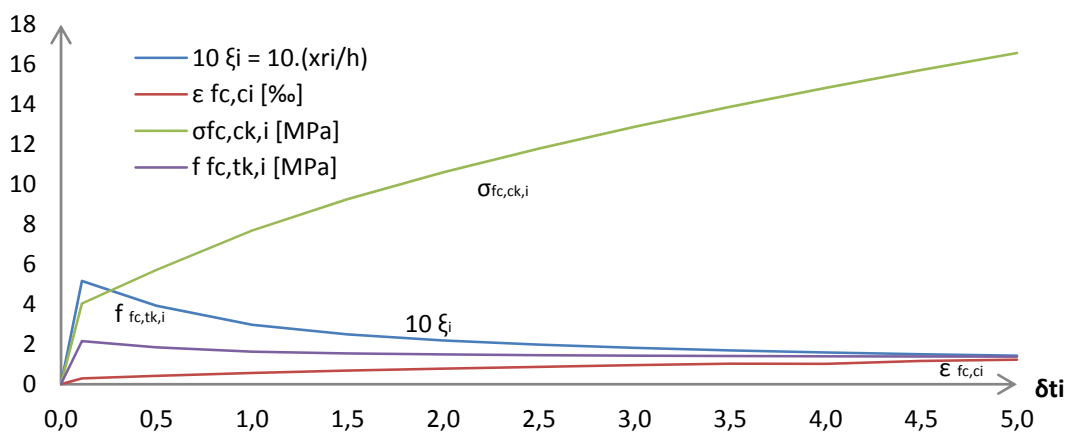
$$\rho_{pl,i} = 0,0067 \cdot \frac{\varepsilon_{fc,ti}}{(1-\xi_i)} = 0,0067 \cdot \frac{0,270}{(1-0,516)} = 0,004 \text{ m}^{-1}$$

Z uvedených vztahů lze sestavit diagramy závislosti pro:

- 1) $(10 \cdot \xi_i - \delta_{ti})_k$
- 2) $(f_{fc,tk,i} - \delta_{ti})_k$
- 3) $(\varepsilon_{fc,ti} - \delta_{ti})_k$
- 4) $(\sigma_{fc,ck,i} - \delta_{ti})_k$
- 5) $(\varepsilon_{fc,ci} - \delta_{ti})_k$
- 6) $(w_i - \delta_{ti})_k$
- 7) $(10 \cdot \lambda_{wi} - \delta_{ti})_k$
- 8) $(100 \cdot \rho_{pl,i} - \delta_{ti})_k$



Graf 72: Základní charakteristiky odvozené z diagramu odolnosti



Graf 73: Základní charakteristiky odvozené z diagramu odolnosti

3 Odvození charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu

Při vyhodnocení charakteristického diagramu odolnosti $(F_R - \delta_t)_k$ získáme hodnoty charakteristik potřebných pro odvození charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu v centrickém tahu $(\sigma_{fc,tk} - \varepsilon_{fc,t})$. Pro charakteristický pracovní diagram vláknobetonu v dostředném tlaku $(\sigma_{fc,ck} - \varepsilon_{fc,c})$ lze využít zásady, které jsou uvedené pro beton v ČSN EN 1992 – 1 – 1 upravené podle chování vláknobetonu především při jeho poměrném stlačení při mezním stavu únosnosti. Obě části charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu slouží dále především k odvození jeho návrhového pracovního diagramu.

Tahová část charakteristického pracovního diagramu je dána hodnotou charakteristické pevnosti vláknobetonu v dostředném tahu při vzniku trhliny vztahem:

$$f_{fc,tk} = \frac{f_{fc,tk,fl}}{1,45} = \frac{3,67}{1,45} = 2,53 \text{ MPa}$$

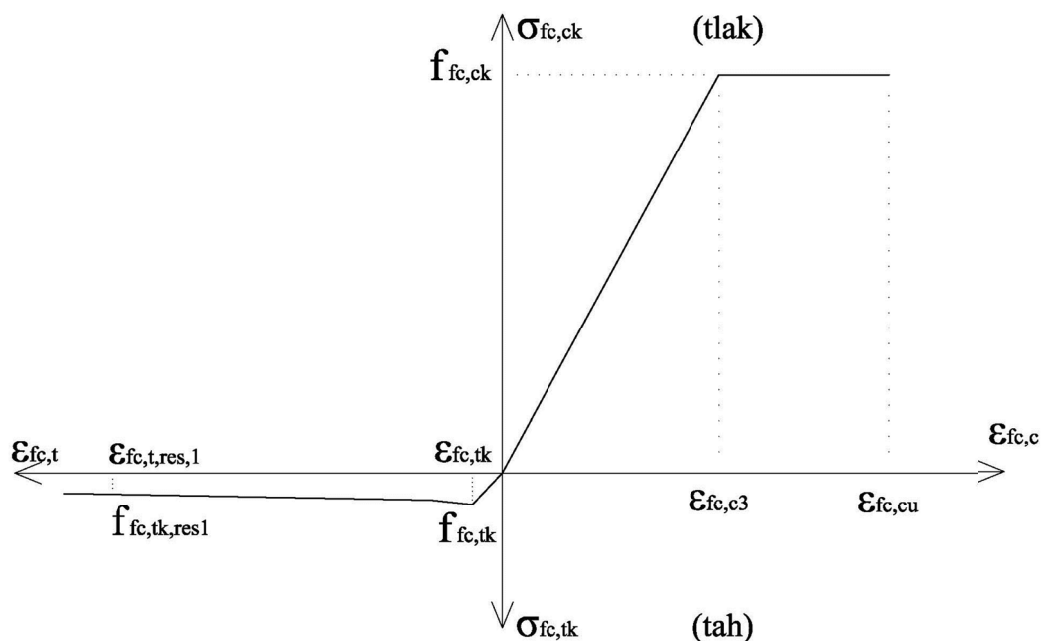
kde $f_{fc,tk,fl}$ je charakteristická pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu při (CLS)_k

Pro odpovídající poměrné protažení $\varepsilon_{fc,tk}$ a při zachování předpokladu rovinnosti průřezu při přetvoření platí vztah:

$$\varepsilon_{fc,tk} = \varepsilon_{fc,c3} \cdot \frac{f_{fc,tk}}{f_{fc,ck}} = 2,0 \cdot \frac{2,53}{27} = 0,187 \text{ ‰}$$

kde $\varepsilon_{fc,c3}$ je poměrné stlačení vláknobetonu (pro běžné vláknobetony do $f_{fc,ck} \leq 50 \text{ MPa}$ je $\varepsilon_{fc,c3} = 2,0 \text{ ‰}$)

Tlaková část charakteristického pracovního diagramu je dána charakteristickou hodnotou pevnosti vláknobetonu v dostředném tlaku $f_{fc,ck}$ a jeho poměrným stlačením na mezi plasticity $\varepsilon_{fc,c2}$ při parabolicko - rektangulárním pracovním diagramu podle ČSN EN 1992 – 1 – 1. Pro prvky z prostého vláknobetonu lze místo parabolického průběhu napětí $\sigma_{fc,ck}$ v pracovním diagramu do meze plasticity při poměrném stlačení $\varepsilon_{fc,c2}$ užít kvazi lineárněpružný průběh napětí až do meze plasticity při $\varepsilon_{fc,c3}$.



Graf 74: Charakteristický pracovní diagram vláknobetonu

Při stanovení poměrného stlačení na mezi únosnosti je možné využít prostorového působení vláken v tlakové oblasti vláknobetonového průřezu, tj. částečného ovinutí této oblasti, pro zvětšení poměrného mezního stlačení $\varepsilon_{fc,cu}$ platí vztah:

$$\varepsilon_{fc,cu} = \varepsilon_{cu,3} + 0,05 \cdot \frac{f_{fc,tk,res,1}}{f_{fc,ck}} = 3,5 + 0,05 \cdot \frac{0,336}{27} = 3,501\%$$

kde $\varepsilon_{cu,3}$ je mezní poměrné stlačení betonu podle ČSN EN 1992 – 1 - 1 při bilineárním průběhu napětí $\sigma_{fc,ck}$ v tlakové části charakteristického pracovního diagramu při $f_{ck} = f_{fc,ck}$ (pro běžné betony při $f_{ck} = 50$ MPa je $\varepsilon_{cu,3} = 3,5 \text{ ‰}$)

$f_{fc,tk,res,1}$ je charakteristická hodnota reziduální pevnosti vláknobetonu v tahu pro zvolenou charakteristiku při $\varepsilon_{fc,tk,res,1}$.

EKONOMICKÉ ZOHLEDNĚNÍ

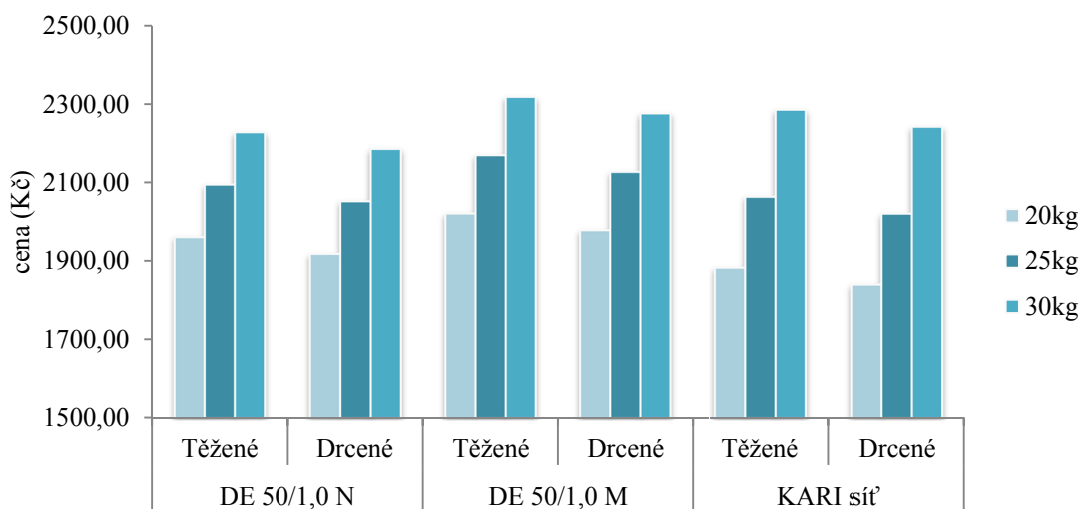
Pro zjednodušený výpočet ceny byly použity platné ceníky, které jsou volně dostupné na internetu. Vzhledem k velkému množství dodavatelů a patřičným cenovým rozdílům by se mohla skutečná cena lišit. Proto byla snaha, najít cenu vstupního materiálu, který byl použit na výrobu zkušebních těles.

Následující jednotkové ceny jsou uvedeny včetně daně z přidané hodnoty, která činí 20%.

Tab. 68: Jednotkové ceny použitého materiálu

popis	MJ	jednotková cena
cement portlandský CEM I 42.5 R	t	3 240,00
popílek pro stavební účely	t	395,00
struska granulovaná vysokopecní 420	t	1 710,00
univerzální plastifikátor do betonu	l	20,00
kamenivo přírodní těžené 8/16 Náklo	t	336,00
kamenivo přírodní těžené 11/22 Náklo	t	336,00
kamenivo přírodní těžené 0/4 Zaječí	t	216,00
kamenivo přírodní drcené 8/16 Luleč	t	306,00
kamenivo přírodní drcené 11/22 Luleč	t	294,00
síť výztužná svařovaná KARI KH 30 11 139 3 x 2 m D 6 mm	kus	687,00
síť výztužná svařovaná KARI KD 35 11 139 3 x 2 m D 5 mm	kus	488,00
síť výztužná svařovaná KARI KA 16 11 139 3 x 2 m D 4 mm	kus	324,00
kroužek distanční plastový Ultrafix 30/5-16	kus	3,60
drátky DE 50/1,0 N	kg	27,00
drátky DE 50/1,0 M	kg	30,00

Pro názornost byl použit 1 m³ betonu ve formě desky o tloušťce 150 mm, k určení krytí KARI sítě posloužily 4 distanční kroužky na 1 m².



Graf 75: Porovnání jednotlivých cen 1m³ betonu v závislosti na receptuře

ZÁVĚR

V souladu se zadáním byla tato diplomová práce zaměřena na popis vlivu druhu a dávky rozptýlené výztuže na vybrané vlastnosti betonu, a to zejména na pevnost v tahu za ohybu dle TP FC 1-1.

V teoretické části je úvodem věnována pozornost popisu složení betonu. Dále byla popsána používaná vlákna, jejich výroba, možnosti použití a porovnání prostého betonu s vláknobetonem.

V experimentální části byla na dané receptuře ověřována zejména závislost mezi dávkou vláken, typem vláken, použitého kameniva a pevností. Jako první vlastnosti byly zkoušeny konzistence čerstvého betonu metodou sednutí Abramsova kužele a metodou rozlití. Veškeré směsi byly namíchány na třídu S4, se sednutím od 160 do 210 mm a na třídu F4, s rozlitím od 490 do 550 mm. Dále bylo ověřeno, že s rostoucí dávkou vláken stoupá i obsah vzduchu v čerstvém betonu. Výjimku tvořila pouze záměs obsahující vlákna typu DE 50/1,0 M a drcené kamenivo.

Vzhledem k malému rozptylu hodnot bylo zjištěno, že množství a typ vláken, ani použité kamenivo nijak výrazně pevnost v příčném tahu neovlivňují. Při porovnání hranolových pevností bylo zjištěno, že s rostoucí dávkou vláken klesá pevnost až o 19,2 % v případě použití vláken typu DE 50/1,0 N a drceného kameniva, u ostatních záměsí dojde k poklesu o 5,9 %. V rámci diplomové práce byl vytvořen vlastní kalibrační vztah pro výpočet informativní pevnosti z rychlosti šíření ultrazvuku z trojrozměrného prostředí: $R_{be} = 69,69 \cdot v_{13}^2 - 544,31 v_{13} + 1106$. Původní vztah dle ČSN 73 1371 již neodpovídal novodobým betonům, hodnoty vycházely o 49 až 68 % nižší, než byla reálná pevnost betonu v tlaku.

Co se týče pevností betonu v tahu za ohybu, z uvedených hodnot průměrných pevností vláknobetonu je zřejmé, že pevnosti až tolik nezáleží na množství obsahu vláken, typu použitého kameniva a typu drátků. Nejvyšších pevností dosahovala sada obsahující 30 kg DE 50/1,0 M v kombinaci s drceným kamenivem, u ostatních hodnot nedošlo k žádnému výraznějšímu rozptylu.

V ekonomické části diplomové práce byla porovnána cena 1m³ betonu. Drátky typu DE 50/1,0 M dodávané společností KrampeHarex s.r.o. jsou vyráběny pouze na zakázku, v praxi se s nimi setkáme minimálně. V případě použití drceného kameniva je

cena betonu o 1,9 % nižší než při použití kameniva těžného. Jako nejlevnější varianta se jeví při dávkování 30 kg vláken (odpovídá výztuži Ø 6) použít vlákna typu DE 50/1,0 N v kombinaci s drceným kamenivem. Jeho cena za 1 m³ je o 2,6 % nižší, než cena betonu s KARI sítí.

Do budoucna by bylo dobré se dále věnovat této problematice a dále experimentálně ověřovat veškeré dosavadní poznatky v oblasti navrhování a zkoušení konstrukčních vláknobetonů, které se v současné době dostávají do popředí zájmu ve stavebnictví.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SOUČEK, Petr. *Moduly pružnosti moderního betonu*. In: 9. konference Technologie betonu 2010. 1. vyd. Pardubice: ČNB Servis, s.r.o., 2010, s. 5-11. ISBN 978-80-97158-23-4.
- [2] TP FC 1-1: *Technické podmínky 1: Vláknobeton – Část 1: Zkoušení vláknobetonu – vyhodnocení destruktivních zkoušek a stanovení charakteristického pracovního diagramu vláknobetonu pro navrhování vláknobetonových konstrukcí*, Praha, Českomoravský beton, a.s. 2007. 34s.
- [3] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-2647-5.
- [4] KRÁTKÝ, Jiří, Karel TRTÍK a Jan VODIČKA. *Drátkobetonové konstrukce*. Praha: ČKAIT, 1999. ISBN 80-86364-00-3.
- [5] CIKRLE, Petr, Ondřej ANTON, Petr DANĚK, Barbara KUCHARCZYKOVÁ a Petr MISÁK. *NDT ZKOUŠENÍ VE STAVEBNICTVÍ: příručka kurzu CŽV*. VUT v Brně, 2010. ISBN 978-80-214-4198-9
- [6] VESELÝ, Vladislav, Stanislav SMÍŘINSKÝ a Václav BLÍŽKOVSKÝ. *Příručka technologa*. 1. vyd. BETOTECH s.r.o., 2010.
- [7] *Za betonem do Evropy*. Praha: TIRA, 1998.
- [8] VODIČKA, Jan. *Praktické použití vláknobetonu*. In: BETON. 2. vyd. Praha: Beton TKS, 2010, s. 53-55.
- [9] KOHOUTKOVÁ, Alena. *VLÁKNOBETONY – Blyská se na lepší časy?* In: BETON. 2. vyd. Praha: Beton TKS, 2010, s. 3-5.
- [10] VODIČKA, Jan. *Specifika z technologie vláknobetonu*. In: BETON. 2. vyd. Praha: Beton TKS, 2010, s. 38-42.
- [11] VODIČKA, Jan. *Zkoušky konstrukčního vláknobetonu*. In: BETON. 2. vyd. Praha: Beton TKS, 2010, s. 43-47.

POUŽITÉ NORMY

ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.* Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.* Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12390-1. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 1: Tvar, rozměry a jiné požadavky na zkušební tělesa a formy.* Svaz výrobců betonu ČR, 2001.

ČSN EN 12390-2. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti.* Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.* ÚNM, 2009.

ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles.* Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles.* Svaz výrobců betonu ČR, 2010.

ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.* ÚNM, 2009.

ČSN EN 12350-1. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Odběr vzorků.* Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 1: Zkouška sednutím.* Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím.* Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody.* Svaz výrobců betonu ČR, 2009.

ČSN EN 1097-5. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně.* Svaz výrobců betonu ČR, 1999.

ČSN EN 1097-6. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Svaz výrobců betonu ČR, 2001.

ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*. Svaz výrobců betonu ČR, 2012.

ČSN EN 933-4. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 4: Stanovení tvaru zrn - Tvarový index*. Svaz výrobců betonu ČR, 2008.

ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. ÚNM, 2011.

ČSN ISO 6784. *Beton. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. ÚNM, 1993.

ČSN EN 206 - 1. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. ČNI, 2001.

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

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$B_{m,red}$	redukována průměrná ohybová tuhost zkušebního trámku
E_c	modul pružnosti betonu podle ČSN EN 1992 – 1 - 1
$E_{fc,eq}$	ekvivalentní modul pružnosti vláknobetonu pro kvazilineárně pružné chování prvku až do pevnosti $f_{fc,ck}$ při $\varepsilon_{fc,c3}$
F_R	vnitřní odolnost prvku při zatížení F_E
$F_{Rk,c}$	charakteristická hodnota odolnosti prvku při mezním stavu vzniku trhliny
$F_{Rk,i}$	charakteristická hodnota odolnosti prvku po překročení mezního stavu vzniku trhliny
$F_{Rm,c}$	průměrná hodnota odolnosti prvku při mezním stavu vzniku trhliny
$F_{Rm,res}$	průměrná hodnota reziduální odolnosti zkušebního prvku
$F_{Rm,res,l}$	průměrná hodnota reziduální odolnosti zkušebního prvku při jeho dohodnutém průhybu δ_{tl}
V_f	objem vláken
V_{fc}	objem vláknobetonu
$f_{fc,ck}$	charakteristická (válcová) pevnost vláknobetonu v tlaku
$f_{fc,tk}$	charakteristická pevnost vláknobetonu v dostředném tahu
$f_{fc,tk,fl}$	charakteristická pevnost vláknobetonu v tahu za ohybu
$f_{fc,tk,i}$	reziduální (zbytková) pevnost vláknobetonu v charakteristickém dostředném tahu při deformaci δ_{ti}
$f_{fc,tk,res,l}$	reziduální (zbytková) pevnost vláknobetonu v charakteristickém dostředném tahu při dohodnutém průhybu δ_{tl}
$f_{fc,tk,sp}$	charakteristická pevnost vláknobetonu v příčném tahu
$f_{fc,tm}$	průměrná hodnota pevnosti vláknobetonu v tahu
$f_{fc,tm,fl}$	průměrná hodnota pevnosti vláknobetonu v tahu za ohybu
$f_{fc,tm,res,l}$	průměrná reziduální pevnost vláknobetonu v dostředném tahu při dohodnutém průhybu zkušebního prvku δ_{tl}
$f_{fc,tm,eq,l}$	průměrná ekvivalentní pevnost vláknobetonu v dostředném tahu při dohodnutém průhybu zkušebního prvku δ_{tl}
h	výška průřezu
h_{tc}	výška tahové oblasti průřezu do mezního stavu vzniku trhliny
h_{ti}	výška tahové oblasti průřezu po překročení mezního vztahu vzniku trhliny

l_{wi}	délka trhliny v kritickém průřezu při průhybu δ_{ti}
m_f	hmotnost vláken
w_i	šířka trhliny v krajních tažených vláknech kritického průřezu
x_{ri}	výška tlakové oblasti při průhybu δ_{ti} zkušebního prvku po překročení mezního stavu vzniku trhliny
z	rameno vnitřních sil po překročení mezního stavu vzniku trhliny
$z_{u,i}$	rameno vnitřních sil v plastické kloubu kritického průřezu
ΔF_{Rg}	přírůstek síly odolnosti od stálého zatížení zkušebního trámku
$\Delta \delta_{ti}$	přírůstek průhybu řízeného časem při zatížení zkušebního tělesa v čase t_i
$\Delta \varepsilon_{fc,ti}$	přírůstek poměrného protažení v krajních vláknech průřezu v důsledku otevírání makrotrhliny
α_{fc}	poměr válcové a krychelné pevnosti vláknobetonu
α_{sp}	opravný součinitel pro odvození charakteristické pevnosti vláknobetonu v dostředném tahu z průkazných zkoušek v příčném tahu
δ_{ti}	průhyb řízený časem t_i při zatížení F_{Ei}
$\delta_{tk,c}$	charakteristická hodnota průhybu při mezním stavu vzniku trhliny
δ_{tmc}	průměrná hodnota průhybu při mezním stavu vzniku trhliny
$\varepsilon_{cu,3}$	mezní poměrné stlačení betonu při bilineárním pracovním diagramu
$\varepsilon_{fc,c3}$	prostá hodnota poměrného stlačení vláknobetonu při $f_{c,ck}$
$\varepsilon_{fc,cu}$	mezní poměrné stlačení vláknobetonu
$\varepsilon_{fc,m,c}$	průměrné poměrné přetvoření krajních vláken průřezu vláknobetonového prvku při mezním stavu vzniku trhliny
$\varepsilon_{fc,ti}$	celkové poměrné protažení krajních vláken průřezu při průhybu δ_{ti} zkušebního prvku po překročení mezního stavu vzniku trhlín
$\varepsilon_{fc,tk}$	charakteristické poměrné protažení vláknobetonového prvku při dostředném tahu a mezním stavu vzniku trhliny
$\varepsilon_{fc,tk,c}$	charakteristické poměrné protažení krajních vláken průřezu při ohybu a mezním stavu vzniku trhliny
λ_{wi}	poměr délky trhliny l_{wi} k výšce průřezu h
$\rho_{V,f}$	objemový stupeň ztužení struktury kompozita vlákny
ρ_f	objemová hmotnost vláken v závislosti na použitém materiálu vláken
$\rho_{pl,i}$	křivost kvaziplastického kloubu v kritickém průřezu při δ_{ti}
$\sigma_{fc,ck,i}$	charakteristické napětí v tlaku krajních vláken průřezu při průhybu δ_{ti} vláknobetonového zkušebního prvku

ξ_c	poměr výšky tlakové oblasti k celkové výšce průřezu do mezního stavu vzniku trhliny
ξ_i	poměr výšky tlakové oblasti k celkové výšce průřezu po překročení mezního stavu vzniku trhliny a při průhybu zkušebního trámku δ_{ti}
ξ_{ui}	poměr výšky plně zplastizované oblasti průřezu k jeho celkové výšce

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Vodní součinitel.....	14
Obr. 2: Různé druhy ocelových vláken	20
Obr. 3: Polypropylenové vlákna	21
Obr. 4: Nesprávný způsob promíchání	23
Obr. 5: Pracovní diagram vláknobetonu ve srovnání s prostým betonem	25
Obr. 6: čtyřbodové zatěžování trámku.....	29
Obr. 7: Tříbodové zatěžování trámku se zářezem	30
Obr. 8: použité drátky DE 50/1,0 N.....	36
Obr. 9: příprava zkušebních těles	36
Obr. 10: Příklad uložení zkušebního trámce.....	56
Obr. 11: zkouška pevnosti v tahu ohybem.....	57
Obr. 12: Zkušební trámec č.3 při zkoušení pevnosti v tahu ohybem.....	87
Obr. 13: Zkušební trámec č.1 při zkoušení pevnosti v tahu ohybem.....	88
Obr. 14: Zkušební trámec č.1 při zkoušení pevnosti v tahu ohybem.....	89
Obr. 15: Napjatost krit. průřezu zkušebního trámku před plným zplastizováním	97

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Dávkování drátků ve vybraných konstrukcích (zdroj: Podlahy 2008).....	27
Tab. 2: Porovnání odlišností zkoušek (zdroj: Beton 2/2010)	29
Tab. 3: Vlastnosti použitého popílku	35
Tab. 4: Vybrané vlastnosti typů drátků.....	36
Tab. 5: Referenční receptura na m ³ betonu	37
Tab. 6: Receptura obsahující drcené kamenivo na m ³ betonu (drátky typu N i M).....	37
Tab. 7: Receptura obsahující těžené kamenivo na m ³ betonu.....	37
Tab. 8: rozlití čerstvého betonu	38
Tab. 9: Výsledky zkoušky sednutí čerstvého betonu.....	39
Tab. 10: Výsledky zkoušek čerstvého betonu	40
Tab. 11: Výsledky pevnosti betonu v tlaku (drcené kamenivo + drátky N).....	42
Tab. 12: Výsledky pevnosti betonu v tlaku (drcené kamenivo + drátky M)	43
Tab. 13: Výsledky pevnosti betonu v tlaku (těžené kamenivo + drátky N)	43
Tab. 14: Výsledky pevnosti betonu v tlaku (těžené kamenivo + drátky N)	43
Tab. 15: Výsledky pevnosti betonu v příčném tahu (drcené kamenivo + drátky N).....	45
Tab. 16: Výsledky pevnosti betonu v příčném tahu (drcené kamenivo + drátky M)	46
Tab. 17: Výsledky pevnosti betonu v příčném tahu (těžené kamenivo + drátky N)	46
Tab. 18: Výsledky pevnosti betonu v příčném tahu (těžené kamenivo + drátky M).....	46
Tab. 19: Výsledky zkoušek hranolové pevnosti (drcené kamenivo + drátky N).....	48
Tab. 20: Výsledky zkoušek hranolové pevnosti (drcené kamenivo + drátky M).....	48
Tab. 21: Výsledky zkoušek hranolové pevnosti (těžené kamenivo + drátky N)	48
Tab. 22: Výsledky zkoušek hranolové pevnosti (těžené kamenivo + drátky M)	48
Tab. 23: Hodnoty modulu pružnosti dle ČSN EN 1992-1-1	55
Tab. 24: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	58
Tab. 25: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	58
Tab. 26: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	59
Tab. 27: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	60
Tab. 28: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	60
Tab. 29: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	61
Tab. 30: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	62
Tab. 31: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	62
Tab. 32: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	63

Tab. 33: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	64
Tab. 34: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	64
Tab. 35: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	65
Tab. 36: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	66
Tab. 37: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	66
Tab. 38: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	67
Tab. 39: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	68
Tab. 40: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	68
Tab. 41: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	69
Tab. 42: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	70
Tab. 43: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	70
Tab. 44: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	71
Tab. 45: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	72
Tab. 46: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	72
Tab. 47: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	73
Tab. 48: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	74
Tab. 49: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	74
Tab. 50: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	75
Tab. 51: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	76
Tab. 52: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	76
Tab. 53: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	77
Tab. 54: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	78
Tab. 55: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	78
Tab. 56: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	79
Tab. 57: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	80
Tab. 58: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	80
Tab. 59: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	81
Tab. 60: Vyhodnocení C25/30 drcené kamenivo	82
Tab. 61: Vyhodnocení C25/30 drcené kamenivo	82
Tab. 62: Vyhodnocení C25/30 těžené kamenivo.....	83
Tab. 63: Vyhodnocení C25/30 těžené kamenivo.....	83
Tab. 64: Specifická lomová energie, směrodatná odchylka, variační koeficient.....	84
Tab. 65: Vyhodnocení trámů obsahující KARI Ø 4	87
Tab. 66: Vyhodnocení trámů obsahující KARI Ø 5	88

Tab. 67: Vyhodnocení trámců obsahující KARI Ø 6	89
Tab. 68: Jednotkové ceny použitého materiálu	102

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Porovnání křivky zrnitosti (těžené x drcené kamenivo).....	34
Graf 2: Porovnání křivky zrnitosti (těžené x drcené kamenivo).....	35
Graf 3: Porovnání výsledků zkoušky rozlitím	38
Graf 4: Vyhodnocení zkoušky sednutí čerstvého betonu	39
Graf 5: Informativní pevnost betonu v tlaku	42
Graf 6: Přehledné vyhodnocení pevnosti betonu v tlaku	44
Graf 7: Přehledné vyhodnocení pevnosti betonu v příčném tahu	47
Graf 8: Grafické zobrazení výsledků zkoušek hranolové pevnosti	49
Graf 9: Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{bu}	51
Graf 10: Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{brL} (podélné kmitání)	51
Graf 11: Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku E_{brF} (příčné kmitání)	52
Graf 12: Porovnání dynamického Poissonova koeficientu	53
Graf 13: Průběh zatěžování náhodně vybraného trámce	54
Graf 14: Grafické porovnání statických modulů pružnosti v tlaku	55
Graf 15: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	58
Graf 16: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	58
Graf 17: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	59
Graf 18: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	59
Graf 19: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	60
Graf 20: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	60
Graf 21: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	61
Graf 22: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	61
Graf 23: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	62
Graf 24: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	62
Graf 25: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	63
Graf 26: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N drcené kamenivo	63
Graf 27: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	64
Graf 28: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	64
Graf 29: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	65
Graf 30: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	65
Graf 31: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	66
Graf 32: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	66

Graf 33: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	67
Graf 34: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	67
Graf 35: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	68
Graf 36: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	68
Graf 37: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	69
Graf 38: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M drcené kamenivo	69
Graf 39: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	70
Graf 40: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	70
Graf 41: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	71
Graf 42: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	71
Graf 43: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	72
Graf 44: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	72
Graf 45: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	73
Graf 46: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	73
Graf 47: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	74
Graf 48: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	74
Graf 49: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	75
Graf 50: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 N těžené kamenivo	75
Graf 51: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	76
Graf 52: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	76
Graf 53: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	77
Graf 54: Vyhodnocení C25/30 20 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	77
Graf 55: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	78
Graf 56: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	78
Graf 57: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	79
Graf 58: Vyhodnocení C25/30 25 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	79
Graf 59: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	80
Graf 60: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	80
Graf 61: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	81
Graf 62: Vyhodnocení C25/30 30 kg DE 50/1,0 M těžené kamenivo.....	81
Graf 63: Vyhodnocení C25/30 drcené kamenivo	82
Graf 64: Vyhodnocení C25/30 těžené kamenivo	83
Graf 65: Specifická lomová energie	84
Graf 66: Charakteristické hodnoty drceného kameniva	85

Graf 67: Charakteristické hodnoty těženého kameniva	85
Graf 68: Vyhodnocení trámců obsahujících KARI Ø 4	87
Graf 69: Vyhodnocení trámců obsahujících KARI Ø 5	88
Graf 70: Vyhodnocení trámců obsahujících KARI Ø 6	89
Graf 71: Vyhodnocení zkoušek normových trámků ohybem	90
Graf 72: Základní charakteristiky odvozené z diagramu odolnosti	99
Graf 73: Základní charakteristiky odvozené z diagramu odolnosti	99
Graf 74: Charakteristický pracovní diagram vláknobetonu	101
Graf 75: Porovnání jednotlivých cen 1m ³ betonu v závislosti na receptuře	102

SEZNAM PŘÍLOH

A. FOTODOKUMENTACE ZKOUŠEK.....	1
B. ZKOUŠENÍ ČERSTVÉHO BETONU	4
C. PEVNOST BETONU V TLAKU	5
D. PEVNOST BETONU V PŘÍČNÉM TAHU	8
E. DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI V TAHU A TLAKU, STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI.....	11
F. DYNAMICKÝ POISSONŮV KOEFICIENT	12
G. PEVNOST V TAHU ZA OHYBU.....	14

A Fotodokumentace zkoušek



Obr. 1: Pevnost v příčném tahu



Obr. 2: Tlaková pevnost



Obr. 3: Statický modul pružnosti



Obr. 4: Pevnost v tahu za ohybu – vláknobeton



Obr. 5: Pevnost v tahu za ohybu – referenční beton



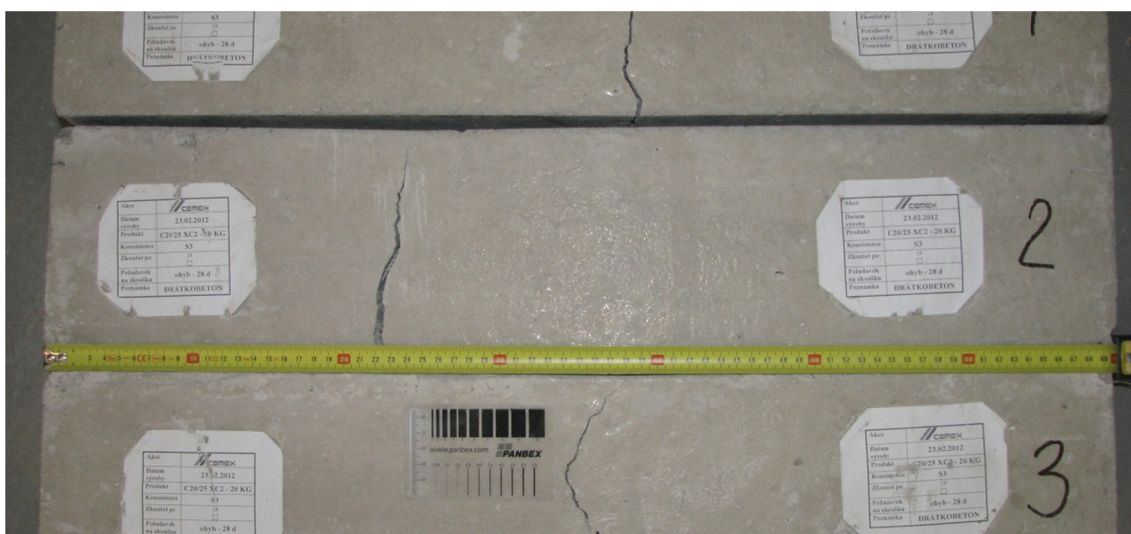
Obr. 6: Pevnost v tahu za ohybu – KARI síť



Obr. 7: C20/25 25kg DE 50/1,0 N drčené kamenivo



Obr. 8: C25/30 referenční beton, drčené kamenivo



Obr. 9: C20/25 20kg DE 50/1,0 N drčené kamenivo

B Zkoušení čerstvého betonu

Tab. 1: Výsledky zkoušek čerstvého betonu

třída betonu	Drátky (kg)	sednutí (mm)	rozliti (mm)	vzduch (%)
C 16/20 drcené kamenivo drátky typu N	20	160	490	-
	25	170	505	-
	30	160	490	2,6
	0	170	520	2,2
C 20/25 drcené kamenivo drátky typu N	20	170	525	-
	25	160	515	-
	30	165	525	2,7
	0	170	540	2,1
C 25/30 drcené kamenivo drátky typu N	20	170	520	-
	25	175	530	-
	30	170	535	2,7
	0	175	550	2,4
C 30/37 drcené kamenivo drátky typu N	20	165	525	-
	25	170	530	-
	30	170	535	2,3
	0	170	545	1,9

C 16/20 drcené kamenivo drátky typu M	20	175	520	-
	25	170	510	-
	30	165	520	2,1
C 20/25 drcené kamenivo drátky typu M	20	165	525	-
	25	170	530	-
	30	175	535	2,0
C 25/30 drcené kamenivo drátky typu M	20	175	540	-
	25	175	535	-
	30	175	530	1,8
C 30/37 drcené kamenivo drátky typu M	20	175	540	-
	25	170	535	-
	30	165	545	1,7

C 25/30 těžené kamenivo drátky typu N	20	170	530	-
	25	165	510	-
	30	175	535	2,6
	0	170	530	2,4

C 25/30 těžené kamenivo drátky typu M	20	160	500	-
	25	170	535	-
	30	175	530	2,3

C Pevnost betonu v tlaku

Tab. 2: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v tlaku

C 16/20 DE 50/1,0 N drčené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,0	150,0	151,3	7 671,0	2 254	902,8	39,8	38,7
20 kg	150,7	150,5	151,0	7 657,0	2 236	915,8	40,2	
20 kg	150,0	150,0	150,2	7 660,0	2 267	937,2	41,6	
25 kg	150,0	150,0	150,1	7 594,0	2 248	851,3	37,8	37,5
25 kg	150,0	150,2	150,2	7 589,0	2 243	862,3	38,3	
25 kg	150,0	150,0	151,2	7 656,0	2 250	859,0	37,9	
30 kg	150,0	150,0	150,4	7 717,0	2 280	919,1	40,7	39,8
30 kg	150,0	150,5	150,2	7 687,0	2 268	912,3	40,5	
30 kg	150,4	150,2	150,0	7 683,0	2 267	904,1	40,1	
REF	150,0	150,0	150,2	7 625,0	2 256	925,6	41,1	39,9
REF	150,0	150,0	150,9	7 630,0	2 247	942,7	41,6	
REF	150,0	150,0	151,1	7 651,0	2 250	916,0	40,4	

Tab. 3: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v tlaku

C 20/25 DE 50/1,0 N drčené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,0	150,0	151,3	7 774,0	2 284	1038,8	45,8	43,5
20 kg	150,5	150,4	150,8	7 743,0	2 269	1024,5	45,1	
20 kg	150,0	150,0	150,7	7 751,0	2 286	998,9	44,2	
25 kg	150,0	150,0	150,1	7 744,0	2 292	1061,0	47,1	45,4
25 kg	150,0	150,3	151,2	7 753,0	2 275	1054,6	46,5	
25 kg	150,0	150,3	150,1	7 778,0	2 299	1033,7	45,9	
30 kg	150,0	149,9	150,5	7 755,0	2 291	1082,6	47,9	47,5
30 kg	150,8	150,1	150,1	7 762,0	2 285	1078,9	47,7	
30 kg	150,5	150,1	150,0	7 755,0	2 288	1085,2	48,1	
REF	150,8	150,5	150,4	7 670,0	2 248	1048,7	46,2	45,8
REF	150,2	150,5	150,3	7 680,0	2 262	1047,8	46,4	
REF	150,0	150,0	150,5	7 670,0	2 265	1038,7	46,0	

Tab. 4: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v tlaku

C 25/30 DE 50/1,0 N drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,1	150,5	150,6	7790,0	2 290	1144,4	50,6	48,0
20 kg	150,4	151,0	151,6	7813,0	2 269	1135,4	49,8	
20 kg	150,1	150,8	150,5	7840,0	2 302	1101,9	48,8	
25 kg	150,1	150,2	150,6	7789,0	2 296	1142,5	50,6	48,9
25 kg	150,5	150,1	151,8	7785,0	2 270	1144,2	50,1	
25 kg	150,3	150,2	149,9	7750,0	2 291	1112,1	49,4	
30 kg	150,2	150,1	151,1	7971,0	2 340	1089,1	48,0	43,7
30 kg	150,3	150,5	150,7	7896,0	2 318	1035,4	45,7	
30 kg	150,5	150,3	151,5	7863,0	2 295	1033,6	45,3	
REF	150,5	150,3	150,1	7815,0	2 302	1044,5	46,2	45,8
REF	150,4	150,0	150,8	7742,0	2 277	1044,5	46,1	
REF	150,6	150,0	151,2	7862,0	2 301	1046,8	46,0	

Tab. 5: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v tlaku

C 30/37 DE 50/1,0 N drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,2	150,0	150,4	7954,0	2 348	1228,3	54,4	52,9
20 kg	150,1	150,3	150,4	7895,0	2 328	1235,0	54,7	
20 kg	150,3	150,0	150,1	7892,0	2 332	1279,7	56,7	
25 kg	150,3	150,0	150,4	7890,0	2 327	1276,9	56,5	56,2
25 kg	150,3	150,2	150,3	7895,0	2 327	1280,0	56,7	
25 kg	150,3	150,9	150,1	7885,0	2 318	1285,4	57,0	
30 kg	150,6	150,1	150,2	7890,0	2 326	1302,2	57,6	56,8
30 kg	150,3	150,2	150,2	7893,0	2 330	1310,0	58,1	
30 kg	150,3	150,0	151,6	7976,0	2 334	1302,3	57,2	
REF	150,5	150,5	150,1	7825,0	2 302	1342,1	59,4	57,6
REF	150,6	150,0	151,3	7854,0	2 298	1345,4	59,0	
REF	150,6	150,0	151,1	7808,0	2 289	1321,8	58,1	

Tab. 6: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v tlaku

C 16/20 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	149,9	150,3	150,8	7 723,0	2 274	821,6	36,3	30,2
20 kg	149,8	151,5	150,5	7 730,0	2 265	725,6	32,2	
20 kg	150,2	150,4	150,5	7 736,0	2 275	838,5	37,1	
25 kg	150,3	151,2	149,9	7 742,0	2 273	842,0	37,4	35,1
25 kg	150,5	150,5	150,5	7 721,0	2 267	843,5	37,3	
25 kg	151,4	151,3	150,0	7 673,0	2 233	812,0	35,8	
30 kg	150,2	150,1	151,0	7 807,0	2 291	895,9	39,5	38,0
30 kg	150,5	150,1	151,0	7 825,0	2 294	876,3	38,6	
30 kg	150,0	150,4	150,6	7 852,0	2 310	900,8	39,9	

Tab. 7: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v tlaku

C 20/25 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,3	150,2	151,6	7 807,8	2 281	984,8	43,2	39,9
20 kg	150,3	150,5	150,3	7 834,0	2 304	934,6	41,4	
20 kg	150,5	150,2	152,1	7 852,0	2 285	945,9	41,3	
25 kg	150,3	150,1	150,5	7 875,0	2 318	1072,5	47,4	47,1
25 kg	150,2	150,5	150,1	7 834,0	2 309	1079,3	47,9	
25 kg	150,7	150,2	150,6	7 835,0	2 299	1076,4	47,4	
30 kg	151,3	150,5	150,3	7 854,0	2 295	1040,6	45,8	44,3
30 kg	150,1	150,6	151,7	7 810,0	2 278	1019,9	44,8	
30 kg	150,4	150,4	150,9	7 870,0	2 307	1047,1	46,2	

Tab. 8: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v tlaku

C 25/30 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,6	150,7	151,5	7980,0	2 321	1167,0	51,1	50,9
20 kg	150,5	150,6	150,5	8015,0	2 352	1169,0	51,6	
20 kg	150,1	150,4	150,8	8015,0	2 354	1172,3	51,8	
25 kg	150,5	150,4	150,9	7805,0	2 286	1196,2	52,7	53,2
25 kg	150,2	150,3	150,1	7822,0	2 309	1197,8	53,1	
25 kg	149,9	149,9	149,1	7798,0	2 326	1192,1	53,3	
30 kg	149,9	150,1	150,0	7798,0	2 311	1147,6	51,0	50,4
30 kg	150,4	150,3	149,4	7790,0	2 307	1116,1	49,7	
30 kg	150,1	149,2	149,9	7854,0	2 340	1149,9	51,1	

Tab. 9: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v tlaku

C 30/37 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu v tlaku	pevnost betonu v tlaku
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		charakteristická
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,1	149,0	151,7	7820,0	2 305	1231,1	54,1	49,2
20 kg	150,9	150,4	150,1	7818,0	2 296	1432,3	63,2	
20 kg	150,1	150,0	151,2	7823,0	2 298	1503,5	66,3	
25 kg	150,2	150,7	151,5	7596,0	2 215	1355,1	59,6	46,5
25 kg	150,4	150,3	150,1	7565,0	2 230	1236,8	54,8	
25 kg	150,1	150,1	150,7	7498,0	2 208	1143,8	50,6	
30 kg	150,2	150,1	150,4	7895,0	2 329	1196,0	53,0	49,1
30 kg	150,3	150,3	150,8	7915,0	2 323	1325,0	58,5	
30 kg	150,1	149,9	150,0	7961,0	2 359	1400,0	62,2	

D Pevnost betonu v příčném tahu**Tab. 10: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v příčném tahu**

C 16/20 DE 50/1,0 N drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu	pevnost betonu v př. tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,0	150,0	151,3	7 671,0	2 254	69,1	1,9	2,5
20 kg	150,7	150,5	151,0	7 657,0	2 236	110,0	3,1	
20 kg	150,0	150,0	150,2	7 660,0	2 267	89,6	2,5	
25 kg	150,0	150,0	150,1	7 594,0	2 248	111,7	3,2	3,1
25 kg	150,0	150,2	150,2	7 589,0	2 243	104,5	3,0	
25 kg	150,0	150,0	151,2	7 656,0	2 250	112,4	3,2	
30 kg	150,0	150,0	150,4	7 717,0	2 280	120,0	3,4	3,4
30 kg	150,0	150,5	150,2	7 687,0	2 268	126,9	3,6	
30 kg	150,4	150,2	150,0	7 683,0	2 267	117,8	3,3	
REF	150,0	150,0	150,2	7 625,0	2 256	105,3	3,0	3,3
REF	150,0	150,0	150,9	7 630,0	2 247	123,5	3,5	
REF	150,0	150,0	151,1	7 651,0	2 250	118,9	3,3	

Tab. 11: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v příčném tahu

C 20/25 DE 50/1,0 N drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu	pevnost betonu v př. tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,0	150,0	151,3	7 774,0	2 284	109,3	3,1	3,1
20 kg	150,5	150,4	150,8	7 743,0	2 269	107,7	3,0	
20 kg	150,0	150,0	150,7	7 751,0	2 286	115,3	3,2	
25 kg	150,0	150,0	150,1	7 744,0	2 292	131,0	3,7	3,7
25 kg	150,0	150,3	151,2	7 753,0	2 275	128,4	3,6	
25 kg	150,0	150,3	150,1	7 778,0	2 299	129,8	3,7	
30 kg	150,0	149,9	150,5	7 755,0	2 291	124,6	3,5	3,4
30 kg	150,8	150,1	150,1	7 762,0	2 285	119,7	3,4	
30 kg	150,5	150,1	150,0	7 755,0	2 288	117,8	3,3	
REF	150,8	150,5	150,4	7 670,0	2 248	127,3	3,6	2,9
REF	150,2	150,5	150,3	7 680,0	2 262	86,7	2,4	
REF	150,0	150,0	150,5	7 670,0	2 265	98,7	2,8	

Tab. 12: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v příčném tahu

C 25/30 DE 50/1,0 N drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu	pevnost betonu v př. tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,1	150,5	150,6	7790,0	2 290	110,3	3,1	3,5
20 kg	150,4	151,0	151,6	7813,0	2 269	121,1	3,4	
20 kg	150,1	150,8	150,5	7840,0	2 302	137,9	3,9	
25 kg	150,1	150,2	150,6	7789,0	2 296	116,7	3,3	3,4
25 kg	150,5	150,1	151,8	7785,0	2 270	109,8	3,1	
25 kg	150,3	150,2	149,9	7750,0	2 291	138,1	3,9	
30 kg	150,2	150,1	151,1	7971,0	2 340	132,9	3,7	3,9
30 kg	150,3	150,5	150,7	7896,0	2 318	152,8	4,3	
30 kg	150,5	150,3	151,5	7863,0	2 295	131,4	3,7	
REF	150,5	150,3	150,1	7815,0	2 302	144,5	4,1	3,9
REF	150,4	150,0	150,8	7742,0	2 277	135,6	3,8	
REF	150,6	150,0	151,2	7862,0	2 301	138,7	3,9	

Tab. 13: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v příčném tahu

C 30/37 DE 50/1,0 N drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu	pevnost betonu v př. tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,2	150,0	150,4	7954,0	2 348	137,2	3,9	4,1
20 kg	150,1	150,3	150,4	7895,0	2 328	146,7	4,1	
20 kg	150,3	150,0	150,1	7892,0	2 332	147,5	4,2	
25 kg	150,3	150,0	150,4	7890,0	2 327	153,5	4,3	4,6
25 kg	150,3	150,2	150,3	7895,0	2 327	164,2	4,6	
25 kg	150,3	150,9	150,1	7885,0	2 318	167,8	4,7	
30 kg	150,6	150,1	150,2	7890,0	2 326	160,1	4,5	4,1
30 kg	150,3	150,2	150,2	7893,0	2 330	139,5	3,9	
30 kg	150,3	150,0	151,6	7976,0	2 334	135,8	3,8	
REF	150,5	150,5	150,1	7825,0	2 302	147,4	4,2	4,4
REF	150,6	150,0	151,3	7854,0	2 298	163,8	4,6	
REF	150,6	150,0	151,1	7808,0	2 289	160,5	4,5	

Tab. 14: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v příčném tahu

C 16/20 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu	pevnost betonu v př. tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	149,9	150,3	150,8	7777,0	2 274	109,5	3,1	50,9
20 kg	149,8	151,5	150,5	7730,0	2 265	102,1	2,9	
20 kg	150,2	150,4	150,5	7 736,0	2 275	108,7	3,1	
25 kg	150,3	151,2	149,9	7 742,0	2 273	109,8	3,1	53,2
25 kg	150,5	150,5	150,5	7 721,0	2 267	116,5	3,3	
25 kg	151,4	151,3	150,0	7 673,0	2 233	112,5	3,2	
30 kg	150,2	150,1	151,0	7 807,0	2 291	135,4	3,8	50,4
30 kg	150,5	150,1	151,0	7 825,0	2 294	110,2	3,1	
30 kg	150,0	150,4	150,6	7 852,0	2 310	128,7	3,6	

Tab. 15: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v příčném tahu

C 20/25 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu	pevnost betonu v př.tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,3	150,2	151,6	7 807,8	2 281	110,6	3,1	3,4
20 kg	150,3	150,5	150,3	7 834,0	2 304	126,7	3,6	
20 kg	150,5	150,2	152,1	7 852,0	2 285	125,4	3,5	
25 kg	150,3	150,1	150,5	7 875,0	2 318	132,8	3,7	3,8
25 kg	150,2	150,5	150,1	7 834,0	2 309	135,3	3,8	
25 kg	150,7	150,2	150,6	7 835,0	2 299	135,7	3,8	
30 kg	151,3	150,5	150,3	7 854,0	2 295	142,7	4,0	3,9
30 kg	150,1	150,6	151,7	7 810,0	2 278	139,8	3,9	
30 kg	150,4	150,4	150,9	7 870,0	2 307	140,2	3,9	

Tab. 16: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v příčném tahu

C 25/30 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu	pevnost betonu v př.tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,6	150,7	151,5	7980,0	2 321	142,5	4,0	3,9
20 kg	150,5	150,6	150,5	8015,0	2 352	147,3	4,1	
20 kg	150,1	150,4	150,8	8015,0	2 354	127,9	3,6	
25 kg	150,5	150,4	150,9	7805,0	2 286	131,4	3,7	3,7
25 kg	150,2	150,3	150,1	7822,0	2 309	122,9	3,5	
25 kg	149,9	149,9	149,1	7798,0	2 326	138,3	3,9	
30 kg	149,9	150,1	150,0	7798,0	2 311	124,7	3,5	3,7
30 kg	150,4	150,3	149,4	7790,0	2 307	128,8	3,6	
30 kg	150,1	149,2	149,9	7854,0	2 340	138,3	3,9	

Tab. 17: Výsledky zkoušky pevnosti betonu v příčném tahu

C 30/37 DE 50/1,0 M drcené kamenivo	rozměry			hmotnost	objemová hmotnost	síla	pevnost betonu	pevnost betonu v př.tahu
	a ₁	a ₂	h	m	ρ	F		průměrná
	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[kg/m ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]
20 kg	150,1	149,0	151,7	7820,0	2 305	166,1	4,6	4,8
20 kg	150,9	150,4	150,1	7818,0	2 296	175,7	4,9	
20 kg	150,1	150,0	151,2	7823,0	2 298	172,8	4,8	
25 kg	150,2	150,7	151,5	7596,0	2 215	165,5	4,6	4,6
25 kg	150,4	150,3	150,1	7565,0	2 230	164,1	4,6	
25 kg	150,1	150,1	150,7	7498,0	2 208	163,8	4,6	
30 kg	150,2	150,1	150,4	7895,0	2 329	161,3	4,5	4,6
30 kg	150,3	150,3	150,8	7915,0	2 323	170,5	4,8	
30 kg	150,1	149,9	150,0	7961,0	2 359	160,8	4,5	

E Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku, statický modul pružnosti

Tab. 18: Vyhodnocení dynamických a statických modulů

C 25/30 DE 50/1,0 N drcené kamenivo	Dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku			Statický modul pružnosti
	E_{bu}	E_{brL}	E_{brf}	E_c
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
20 kg	36 875	37 100	35 250	31100
25 kg	37 225	37 200	36 100	30400
30 kg	36 850	35 425	35 100	33200
REF	35 725	37 950	36 775	33400
DE 50/1,0 M drcené kamenivo				
20 kg	36 425	38 100	37 525	33400
25 kg	34 800	35 175	33 650	32300
30 kg	35 250	35 925	34 850	31900
REF	35 725	37 950	36 775	33400
DE 50/1,0 N těžené kamenivo				
20 kg	38 300	37 750	37 200	32500
25 kg	37 550	36 925	35 600	31100
30 kg	36 025	36 175	34 875	30700
REF	37 950	37 825	37 675	33600
DE 50/1,0 M těžené kamenivo				
20 kg	34 725	35 275	35 625	31700
25 kg	31 425	34 750	33 600	30900
30 kg	38 800	37 950	38 025	30800
REF	37 950	37 825	37 675	33600

F Dynamický Poissonův koeficient

Tab. 19: Vyhodnocení dynamického Poissonova koeficientu

	dynamický Poissonův koeficient	
C 25/30	μ_{br}	průměrný
DE 50/1,0 N těžené	[-]	[-]
C 25/30 20kg	0,20	0,21
C 25/30 20kg	0,23	
C 25/30 20kg	0,21	
C 25/30 25kg	0,19	0,19
C 25/30 25kg	0,19	
C 25/30 25kg	0,20	
C 25/30 30kg	0,16	0,18
C 25/30 30kg	0,20	
C 25/30 30kg	0,19	
C 25/30 REF	0,14	0,18
C 25/30 REF	0,21	
C 25/30 REF	0,19	

Tab. 20: Vyhodnocení dynamického Poissonova koeficientu

	dynamický Poissonův koeficient	
C 25/30	μ_{br}	průměrný
DE 50/1,0 N těžené	[-]	[-]
C 25/30 20kg	0,18	0,20
C 25/30 20kg	0,19	
C 25/30 20kg	0,22	
C 25/30 25kg	0,22	0,20
C 25/30 25kg	0,19	
C 25/30 25kg	0,20	
C 25/30 30kg	0,20	0,21
C 25/30 30kg	0,24	
C 25/30 30kg	0,19	
C 25/30 REF	0,14	0,18
C 25/30 REF	0,21	
C 25/30 REF	0,19	

Tab. 21: Vyhodnocení dynamického Poissonova koeficientu

	dynamický Poissonův koeficient	
C 25/30	μ_{br}	průměrný
DE 50/1,0 M drcené	[-]	[-]
C 25/30 20kg	0,21	0,20
C 25/30 20kg	0,19	
C 25/30 20kg	0,20	
C 25/30 25kg	0,22	0,21
C 25/30 25kg	0,20	
C 25/30 25kg	0,20	
C 25/30 30kg	0,21	0,22
C 25/30 30kg	0,20	
C 25/30 30kg	0,24	
C 25/30 REF	0,24	0,23
C 25/30 REF	0,23	
C 25/30 REF	0,23	

Tab. 22: Vyhodnocení dynamického Poissonova koeficientu

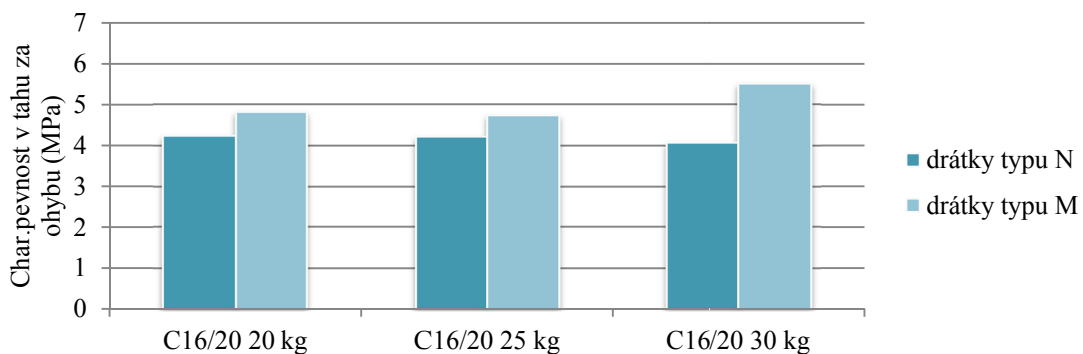
	dynamický Poissonův koeficient	
C 25/30	μ_{br}	průměrný
DE 50/1,0 N drcené	[-]	[-]
C 25/30 20kg	0,18	0,19
C 25/30 20kg	0,19	
C 25/30 20kg	0,19	
C 25/30 25kg	0,24	0,24
C 25/30 25kg	0,21	
C 25/30 25kg	0,28	
C 25/30 30kg	0,24	0,23
C 25/30 30kg	0,22	
C 25/30 30kg	0,22	
C 25/30 REF	0,24	0,23
C 25/30 REF	0,23	
C 25/30 REF	0,23	

G Pevnost v tahu za ohybu**Tab. 23: Vyhodnocení pevností v tahu za ohybu**

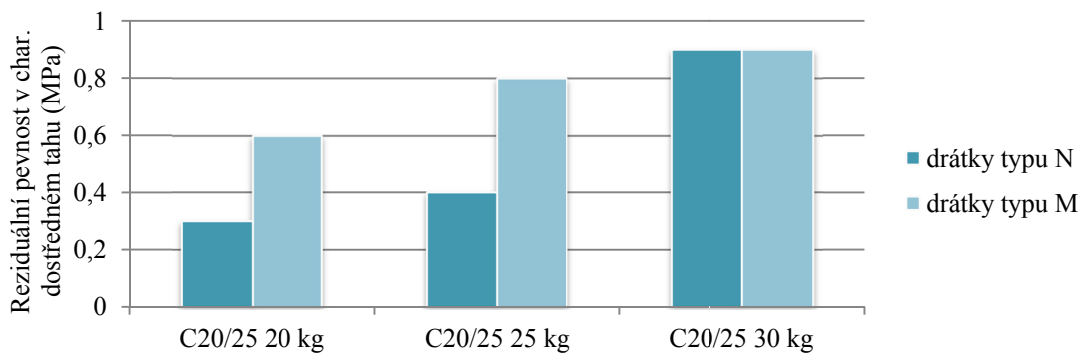
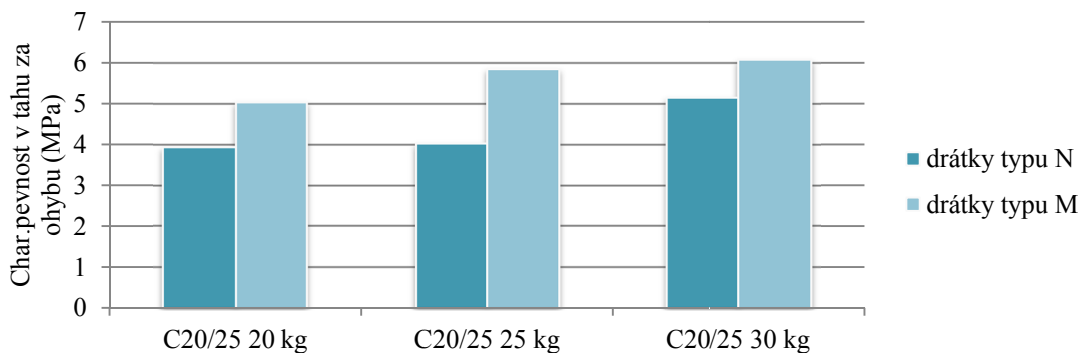
	$F_{Rm,c}$	$F_{Rk,c}$	$F_{Rm,res,1}$	$F_{Rk,res,1}$	$f_{fc,tk,\bar{n}}$	$f_{fc,tk,res,j}$
Drcené kamenivo	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]
C16/20 20 kg DE 50/1,0 N	23,43	21,29	5,07	3,84	4,23	0,3
C16/20 25 kg DE 50/1,0 N	23,30	21,94	7,20	5,75	4,21	0,5
C16/20 30 kg DE 50/1,0 N	22,50	21,26	10,73	8,42	4,07	0,7
C16/20	22,80	21,18	-	-	4,12	-
C20/25 20 kg DE 50/1,0 N	21,80	20,25	4,93	4,34	3,94	0,3
C20/25 25 kg DE 50/1,0 N	22,30	21,85	5,98	3,08	4,03	0,4
C20/25 30 kg DE 50/1,0 N	28,60	27,20	13,33	12,20	5,15	0,9
C 20/25	28,30	27,54	-	-	5,10	-
C25/30 20 kg DE 50/1,0 N	26,72	25,71	7,55	5,38	4,82	0,5
C25/30 25 kg DE 50/1,0 N	25,01	24,01	6,05	4,15	4,51	0,4
C25/30 30 kg DE 50/1,0 N	21,21	20,82	8,20	7,12	3,84	0,5
C 25/30	24,00	23,22	-	-	4,37	-
C30/37 20 kg DE 50/1,0 N	28,10	27,50	6,67	4,84	5,06	0,4
C30/37 25 kg DE 50/1,0 N	30,27	28,3	11,23	10,55	5,45	0,7
C30/37 30 kg DE 50/1,0 N	32,83	32,24	8,77	8,16	5,91	0,6
C 30/37	28,83	27,89	-	-	5,19	-
C16/20 20 kg DE 50/1,0 M	26,67	24,58	5,37	4,94	4,81	0,4
C16/20 25 kg DE 50/1,0 M	26,24	25,25	11,99	9,43	4,73	0,8
C16/20 30 kg DE 50/1,0 M	30,58	30,14	12,43	10,13	5,50	0,8
C20/25 20 kg DE 50/1,0 M	27,96	27,82	9,52	6,15	5,04	0,6
C20/25 25 kg DE 50/1,0 M	35,53	31,12	11,85	10,13	5,85	0,8
C20/25 30 kg DE 50/1,0 M	33,79	31,67	14,12	11,58	6,08	0,9
C25/30 20 kg DE 50/1,0 M	25,57	24,17	7,83	6,20	4,61	0,5
C25/30 25 kg DE 50/1,0 M	26,23	23,47	8,63	6,22	4,73	0,6
C25/30 30 kg DE 50/1,0 M	29,40	27,31	13,85	9,98	5,30	0,9
C30/37 20 kg DE 50/1,0 M	29,49	28,69	9,44	7,70	5,31	0,6
C30/37 25 kg DE 50/1,0 M	28,36	26,98	7,84	7,13	5,11	0,5
C30/37 30 kg DE 50/1,0 M	31,97	30,88	12,52	12,06	5,75	0,8

Porovnání vlivu typu drátků (DE 50/1,0 N x DE 50/1,0 M)

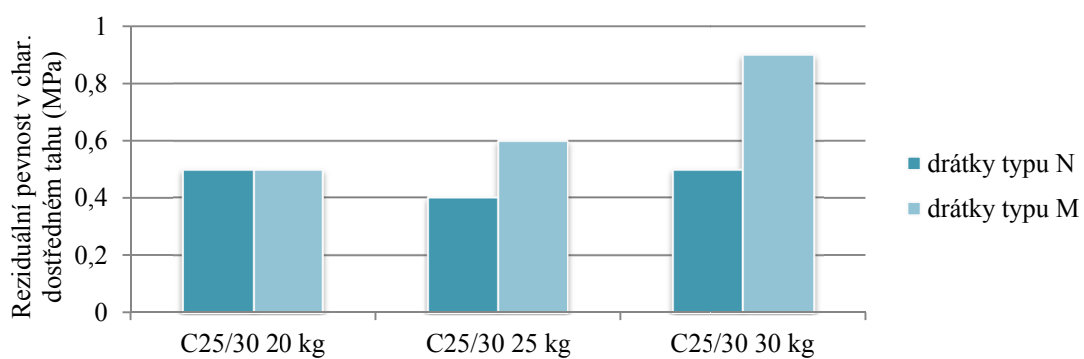
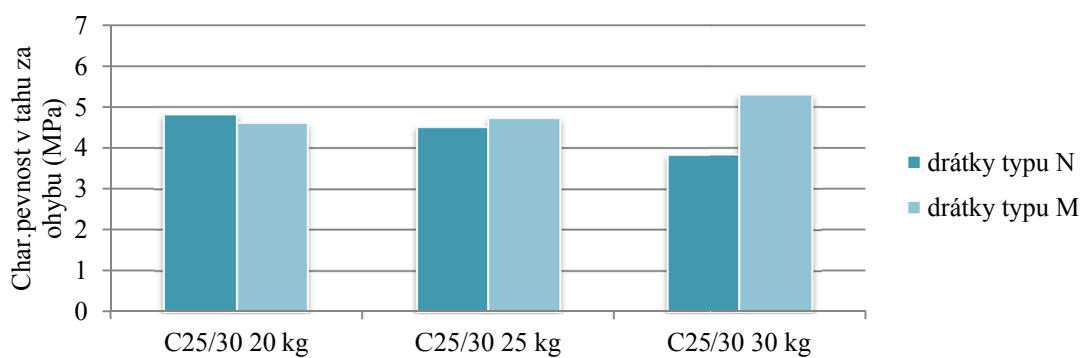
Drcené kamenivo, pevnostní třída C16/20



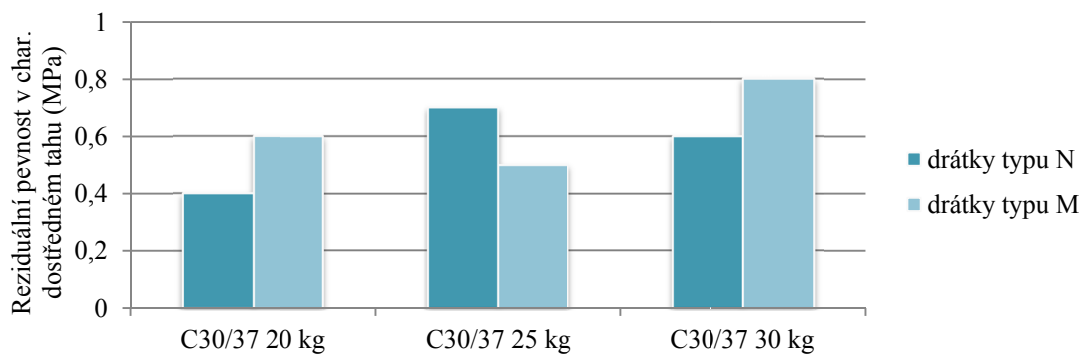
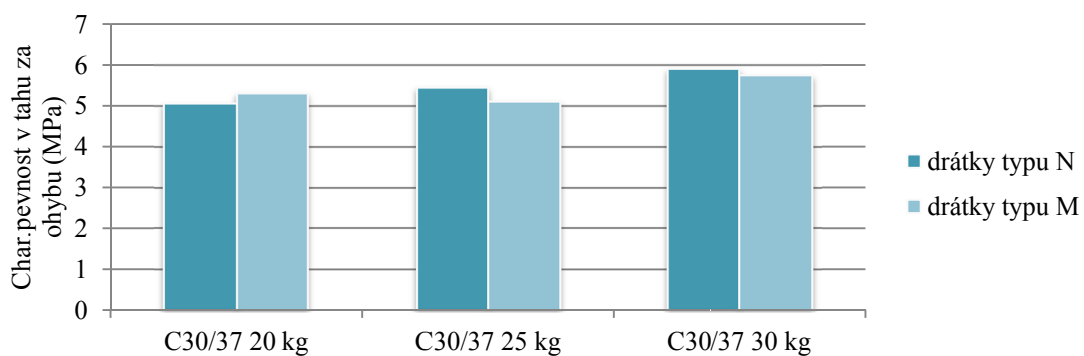
Drcené kamenivo, pevnostní třída C20/25



Drcené kamenivo, pevnostní třída C25/30

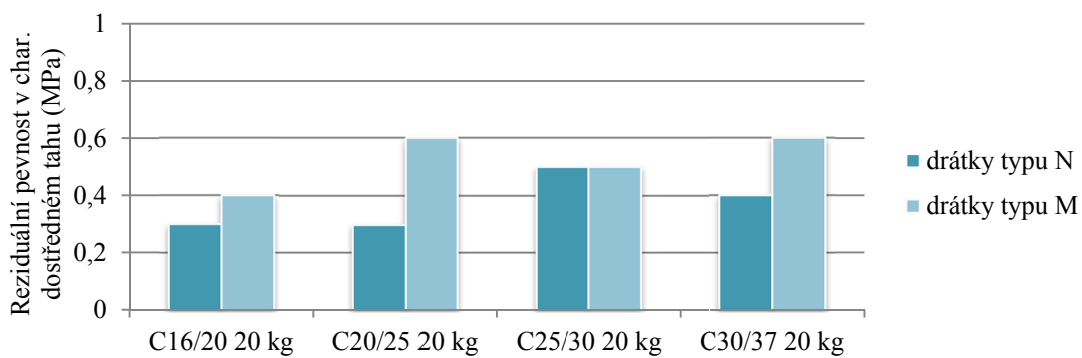
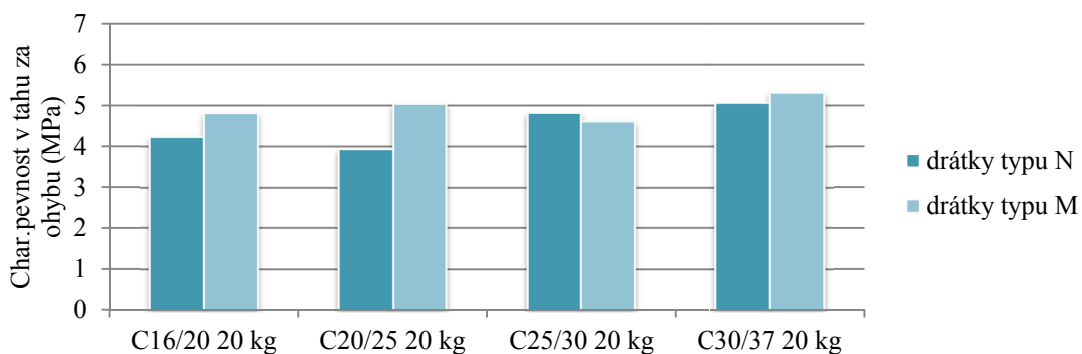


Drcené kamenivo, pevnostní třída C30/37

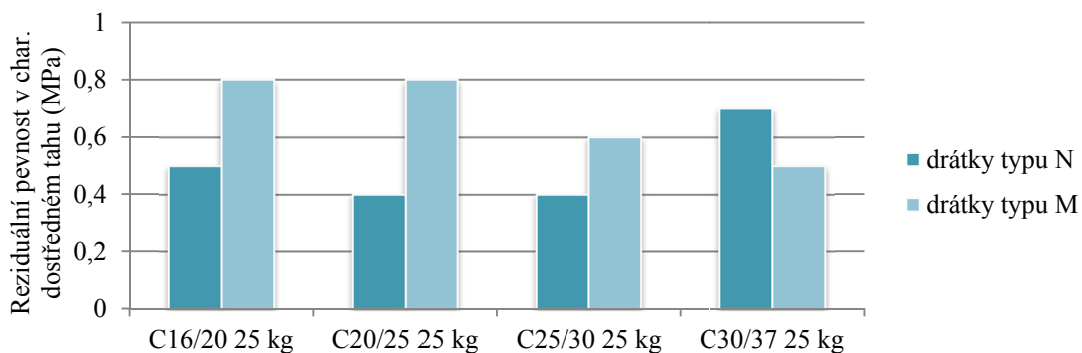
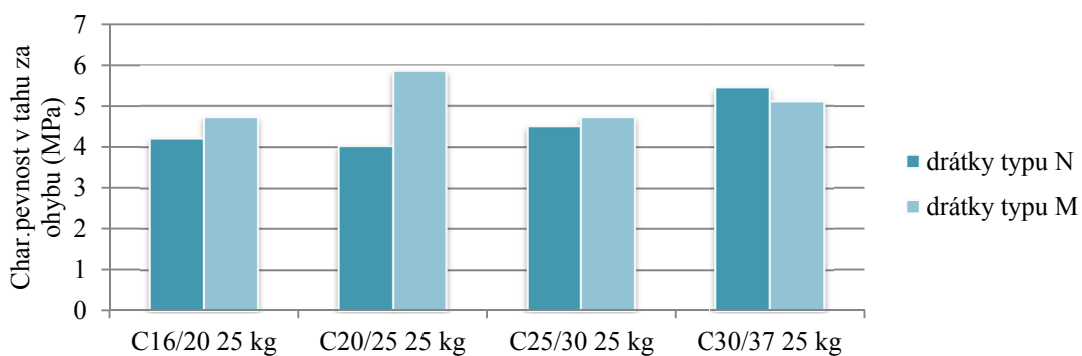


Porovnání vlivu typu drátků (DE 50/1,0 N x DE 50/1,0 M)

Drcené kamenivo, dávkování 20 kg drátků



Drcené kamenivo, dávkování 25kg drátků



Drcené kamenivo, dávkování 30kg drátků

