

Fakulta stavební
Konstrukce pozemních staveb

**Doplnění a analýza databáze výsledků měření
vzduchotěsnosti budov**

**Extending and analysis of the database of building
airtightness**

BAKALÁŘSKÁ práce

Russell Crosby

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Novák, Ph.D.

Praha, 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Crosby** Jméno: **Russell** Osobní číslo: **477269**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra konstrukcí pozemních staveb**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce pozemních staveb**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Doplnění a analýza databáze výsledků měření vzduchotěsnosti budov

Název bakalářské práce anglicky:

Extending and anylysis of the database of building airtightness

Pokyny pro vypracování:

- doplnění stávající databáze výsledků měření o záznamy z posledních let
- kontrola a vyčištění získaných dat
- analýza získaných dat - vývoj vzduchotěsnosti v čase a vliv vybraných vlastností budovy na vzduchotěsnost
- jednoduchá výpočetní analýza vlivu vzduchotěsnosti na energetickou náročnost budov s využitím získaných statistických údajů

Seznam doporučené literatury:

- Jiří Novák, Vzduchotěsnost obvoových plášťů budov, 2008
- Adeline Bailly Mélois, Improving building envelope knowledge from analysis of 219,000 certified T on-site air leakage measurements in France, 2019
- V. Dorer, Airtightness of buildings, 2004
- Wanzu R. Chan, Building air leakage databases in energy conservation policies: analysis of selected initiatives in 4 European countries and the USA, 2012

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Novák, Ph.D. katedra konstrukcí pozemních staveb FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **22.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jiří Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma "**Doplnění a analýza databáze výsledků měření vzduchotěsnosti budov**" zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 14.5.2022

.....
Russell Crosby

Poděkování

Děkuji Ing. Jiří Novák, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování bakalářské práce.

Anotace

Bakalářská práce se zaměřuje na doplnění a analýzu databáze výsledků měření vzduchotěsnosti budov v České republice. Používaná data v bakalářské práci byla získána od Asociace Blower Door CZ ve oboru vzduchotěsnosti v počtu 892 výsledků měření se zkoumá statistickou analýzou. Hlavní stavební materiál ve všech typech budov a hlavní vzduchotěsnicí vrstva u dřevostaveb ukazuje vliv na intenzitu výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Analyzovány byly i další parametry, jako jsou změny kvality obálky z pohledu vzduchotěsnosti budovy a zkoumání korelace mezi vnitřním objemem a vzduchotěsností budovy. Kromě toho byly porovnány novostavby a budovy po rekonstrukci dle intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Na závěr práce byla použita výpočetní analýza s využitím získaných statistických údajů, podle kterých se ukazuje značný vliv vzduchotěsnosti na potřebu tepla pro vytápění budovy.

Klíčová slova:

obálka budovy; vzduchotěsnost; měření; databáze; intenzita výměny vzduchu; pasivní domy.

Summary

This bachelor thesis focuses on extending and analysing the database of building airtightness measurement results in the Czech Republic. The data is obtained from the Czech Association in the field of airtightness. The quantity of 892 measurements was written down in the database and then examined by statistical analysis. The main material in all types of buildings and the main airtight layer in timber constructions affect the air change rate under the pressure difference of 50 Pa. Other parameters were also analysed, such as changes in the quality of the building's envelope over the years, examining the correlation between internal volume, and airtightness for new buildings and buildings after reconstruction. A computational analysis uses the obtained statistical data to investigate the effect of airtightness on energy building efficiency, which shows the significant effect of airtightness on the energy needed in heating.

Key words:

building envelope; airtightness; measurement; database; air change rate; passive houses.

Obsah:

1. Úvod.....	8
2. Postup práce.....	9
3. Práce s databází.....	10
4. Přehled výsledků vzduchotěsnosti.....	16
5. Analýza výsledků.....	21
5.1. Změny v průběhu let.....	21
5.2. Vliv hlavního materiálu na vzduchotěsnost.....	25
5.3. Vnitřní objem budovy.....	30
5.4. Porovnání novostaveb a budov po rekonstrukci.....	33
6. Výpočetní analýza vlivu vzduchotěsnosti na energetickou náročnost.....	36
6.1. Výpočetní analýza pro běžnou budovu s přirozeným větráním.....	37
6.2. Výpočetní analýza pro běžnou budovu se ZZT.....	39
6.3. Výpočetní analýza pro pasivní dům.....	40
6.4. Závěr kapitoly.....	43
7. Závěr.....	45
8. Slovník značek a definic.....	49
9. Seznam použité literatury.....	50
Příloha A: Formulář pro odevzdání výsledků měření (nová verze)	
Příloha B: Protokol - Běžná budova s přirozeným větráním	
Příloha C: Protokol - Běžná budova s ZZT	
Příloha D: Protokol - Pasivní dům	
Příloha E: Protokol - Protokol měření	

1. Úvod

Zlepšení kvality obálky budovy z pohledu vzduchotěsnosti je v současné době jedním z nejhlavnějších témat ve stavebnictví ke snížení energie spotřebované budovami souvisejících emisí uhlíku, které mají za následek změny klimatu Země. Špatná vzduchotěsnost budovy může mít dopad nejen na potřeby tepla na vytápění, ale i na kvalitu vnitřního vzduchu a pohodlí obyvatel. Pokud obálka není dostatečně vzduchotěsná, může hrozit degradace konstrukce a zkrácení její životnosti. Tlakový rozdíl způsobuje prosakování vlhkého vzduchu zevnitř spárami a netěsnostmi do konstrukce pláště, což může mít za následek kondenzaci vodních par a růst plísní [1].

Důvodem pro výběr tohoto tématu je výše uvedený stoupající trend v udržitelných výstavbách která s mého pohledu v budoucnosti bude velmi významná. Během mého bakalářského studia hodně zajímal o snížení spotřeby energie a zlepšení energetické účinnosti pozemní výstavby. V této problematice plánuji pokračovat i nadále v svém magisterském studiu.

Cílem téhle bakalářské práce je tedy práce s výsledky měření vzduchotěsnosti budov z databáze. Úkolem je doplnění, kontrola a vyčištění získaných dat z posledních let, které byly získány od České asociace a následně její zanesení do databází. Databáze shromažďuje výsledky měření vzduchotěsnosti obálky a charakteristiky měřené budovy, podmínek a související data měření. Z databáze se statistické analyzuje hlavní materiál měřených budov, hlavní vzduchotěsnicí vrstvy u dřevostaveb, změny kvality vzduchotěsnicí obálky budovy během posledních let, zkoumaní korelace mezi vnitřním objemu a vzduchotěsnosti budovy. Kromě toho jsou v studii se porovná novostavby a budovy po rekonstrukci dle intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa.

Na závěr práce je jednoduchá výpočetní analýza vlivu vzduchotěsnosti na energetickou náročnost budov s využitím získaných statistických údajů pro tři energetické odlišné budovy.

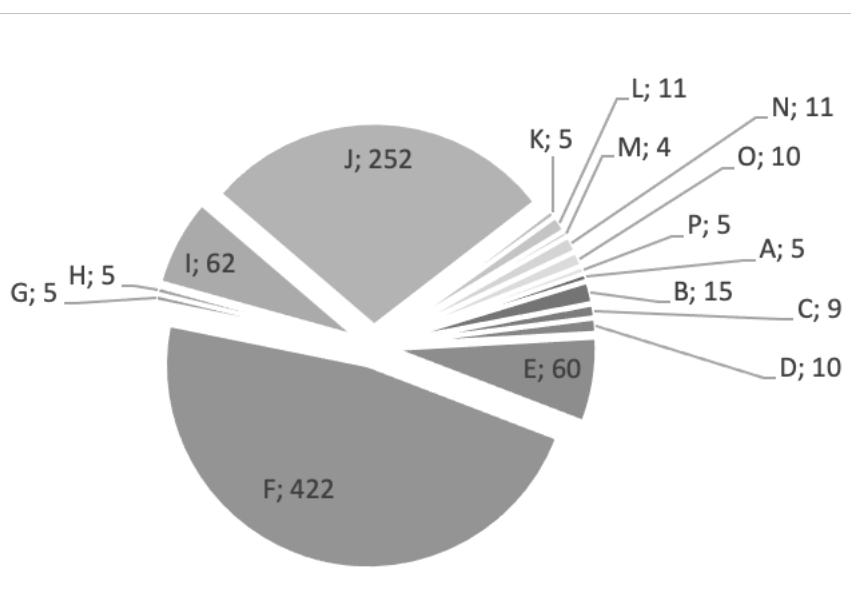
2. Postup práce

Následující body popisují postup pro bakalářskou práci:

1. přenos dat z protokolu o měření a formulářů předchozího typu do formulářů nového typu (Příloha A);
2. kontrola a případné odmítnutí neodpovídajících formulářů;
3. přenos vyhovujících formulářů do databází;
4. statistická analýza získaných dat;
5. seznámení se statistickými údaji a modelování rodinného domu;
6. jednoduchá výpočetní analýza vlivu vzduchotěsnosti na energetickou náročnost budov;
7. závěr práce.

3. Práce s databází

Databáze měření vzduchotěsnosti byla sestavena z výsledku měření, které byly získány od 16 zkoušejících techniků (jejich jména byla nahrazena písmeny z abecedy A až O). Zkoušející technici jsou členy Asociace Blower Door CZ, která je dobrovolné profesní nepolitické sdružení osob v České republice. Tito členové se zabývají měřením vzduchotěsnosti budov a jsou povinni odevzdat každé 2 roky minimálně 5 jimi vybraných měření. Celkem bylo získáno 956 výsledků, které byly odevzdány členy asociace mezi roky 2012 až 2020. Výsledky byly odevzdány ve formě Excel formulářů (Příloha A) a protokolů o měření (Příloha E). V koláčovém *grafu 3.1.* jsem znázornil rozdělení číselného poměru výsledků měření podle zkoušejících. Z *grafu 3.1.* se dá říct, že převažující množství bylo od zkoušejících „F“, „J“, „I“, „E“, které dávají dohromady kolem 89 % od celkového objemu. Z histogramu (*Graf 3.2.*) vyplývá, že výsledky od zkoušejících jsou uspořádány nerovnoměrně podle roku stavby a také ukazuje, že nejvíce měření má v letech 2012 až 2014 zkoušející „J“. Zkoušející „F“ má nejvíce měření mezi roky 2015 a 2020.



Graf 3.1. Počet měření dle zkoušejících techniků

Mezi odevzdávanými formuláři se vyskytovaly dva typy. Jeden z nich se využíval do roku 2014, a novější formulář byl náhradou předchozího formuláře,

který je znázorněn příloze A. Zadávací parametry, které se objevily ve formuláři, jsou dále ilustrovány:

- informace od zhotovitele měření a identifikační informace o měření;
- informace o objektu:
 - výška budovy;
 - počet nadzemních podlaží;
 - poloha budovy (samostatně stojící, řadová, jiná);
- informace o měřené části budovy:
 - účel objektu (rodinný dům, bytový dům atd.);
 - rozsah (celá budova, jedna část budovy);
 - převažující způsob větrání (přírozené otevíráním oken, mechanický systém atd.);
 - energetická náročnost (běžná budova, nízkoenergetický dům, pasivní dům atd);
 - stáří budovy (novostavba, starší budova - po rekonstrukci atd);
 - rok výstavby;
 - rok rekonstrukce (pro starší budovy po rekonstrukci);
 - vnitřní objem V ;
 - cílová hodnota n_{50} ;
 - plocha obálky A_E ;
 - podlahová plocha A_F ;
 - stav v okamžiku měření: budova (ne-)dokončená, SVO (ne-)dokončený, (ne-)zakrytý;
- informace o měření vzduchotěsnosti:
 - datum měření;
 - metoda měření (metody měření podle ČSN EN ISO 9972 / ČSN EN 13829 a jiné);
 - cíl měření (kontrola v průběhu výstavby, deklarace dosaženého stavu, jiný);
- informace o výsledcích:
 - výsledek platí pro (budovu jako celek, ucelenou část budovy - více místností atd);

- výsledek byl získán (měřením jedné tlakové zóny, měřením více tlak. zón a přepočtem, jinak);
- objem. tok vzduchu q_{50} ;
- intenzita výměny vzduchu n_{50} ;
- součinitel proudění - podtlak C_L^- ;
- exponent proudění - podtlak n^- ;
- součinitel proudění - přetlak C_L^+ ;
- exponent proudění - přetlak n^+ ;
- vzduchová propustnost q_{E50} ;
- měrný objem. tok vzduchu q_{F50} ;
- ekvivalentní plocha netěsnosti EAL_4 ;
- ekvivalentní plocha netěsnosti EAL_{10} ;
- poznámky k výsledkům;
- informace o obvodových stěnách (konstrukční řešení, hlavní vzduchotěsnicí vrstvy, poloha hl. vzduchotěsnicí vrstvy);
- informace o střeších (konstrukční řešení, hlavní vzduchotěsnicí vrstvy, poloha hl. vzduchotěsnicí vrstvy);
- informace o podlahách (konstrukční řešení, hlavní vzduchotěsnicí vrstvy, poloha hl. vzduchotěsnicí vrstvy);
- informace o přítomnosti zvláštních prvků (komínové těleso, nadokenní roletové boxy atd);
- informace o zjištěné netěsnosti.

Jedním z mých úkolů bylo přenášení dat z protokolu o měření do formulářů nového typu.

$$q_{ref} = C \cdot \Delta p^n$$

kde	q	je objemový tok vzduchu [m^3/h];
	C	je součinitel proudění [$m^3/(h \cdot Pa^n)$];
	Δp	je tlakový rozdíl [Pa];
	n	je exponent proudění [-];

Vzorec 3.1. Empirická rovnice proudění

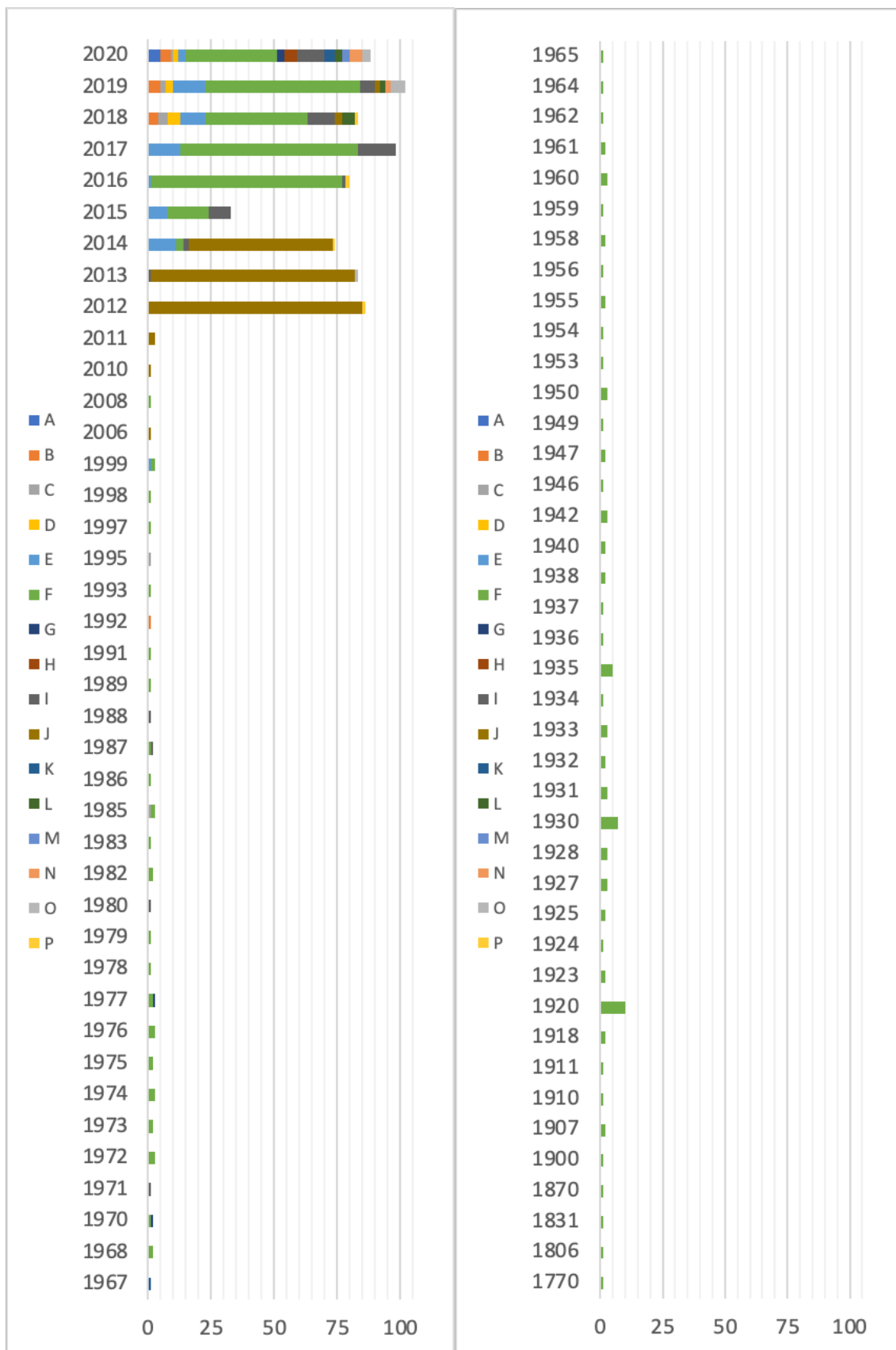
Dalším úkolem bylo zkontrolovat a případně odmítnout nevyhovující formuláře, které byly zadány zkoušejícími techniky. Kontrola spočívala v tom, že se dopočítávala hodnota z odevzdaných dat a porovnávala se s výsledkem, který byl spočítán zkoušejícím technikem. Například průtok vzduchu q_{50} [m^3/h] se počítal dle empirické rovnice proudění (Vzorec 3.1.) a porovnal se se zadanou hodnotou zkoušejícím technikem. Současně k průtoku vzduchu byly stejným způsobem kontrolovány další spočítané hodnoty: intenzita výměny vzduchu n_{50} [$1/h$], měrná průvzdušnost podlahou q_{F50} [$m^3/(m^2 \cdot h)$], ekvivalentní plocha netěsnosti ELA_4 [m^2] a ekvivalentní plocha netěsnosti ELA_{10} [m^2]. Hodnoty ELA_4 , ELA_{10} jsou kontrolovány s tolerancí 5 % a ostatní veličiny 2,5 %.

Dalším krokem bylo přenést data do databází. Databáze shromažďuje výsledky měření vzduchotěsnosti obálky a charakteristiky měřené budovy, podmínek a související data měření (Obr. 3.1.). Každý řádek v databázi reprezentuje jeden test a každý svislý sloupec reprezentuje zakódované třímístné číslo kategorie. Výsledky měření, které byly zadány zkoušejícími techniky, formulář překládal a kódoval do jednotlivých řádků o 99 polích. Problém vznikl při práci s formuláři starého typu, kde bylo jiné kódování a vznikl zde tedy úkol přepsat tyto formuláře do aktuální verze.

201	202	203	204	205	206	207	301	302	303	304	305	306	307	308	309	
2	2	-1	1	1	4,9	-1	1	1	1	2	1	2020	-1	326	4,5	3
2	2	-1	1	1	6,0	-1	1	1	3	2	1	2020	-1	397	1,0	4
2	2	-1	1	1	6,0	-1	1	1	2	2	1	2020	-1	309	1,5	3
2	2	-1	1	3	9,5	-1	1	1	3	3	1	2020	-1	658	0,6	.
2	2	-1	1	1	5,3	-1	1	1	3	2	1	2020	-1	355	1,0	3
2	2	-1	1	2	-1,0	-1	1	1	3	1	2	1992	2017	826	2,5	5
2	2	-1	1	2	-1,0	-1	1	1	3	3	1	2018	-1	480	0,6	3
2	2	-1	1	1	-1,0	-1	1	1	3	1	1	2018	-1	184	0,6	2
2	2	-1	1	1	-1,0	-1	1	1	3	3	1	2018	-1	263	0,6	3
2	2	-1	1	1	-1,0	-1	1	1	3	3	1	2018	-1	225	0,6	2
1	2	-1	1	2	7,0	špenopisek	1	1	3	3	1	2019	-1	751	0,6	6
2	2	-1	1	3	9,0	-1	1	1	3	1	2	-1	2019	589	2,5	6
1	2	-1	1	2	7,0	vápenopisek	1	1	3	3	1	2019	-1	680	0,6	5
2	2	-1	1	2	7,0	úřevostavba	1	1	3	3	1	2019	-1	544	0,6	5
2	2	-1	1	2	7,0	vostavos, Pa	1	1	3	3	1	2019	-1	229	0,6	2
1	2	-1	1	2	7,0	-1	1	1	3	3	1	2020	-1	284	0,6	.
2	2	-1	1	2	7,0	-1	1	1	1	1	1	2019	-1	385	0,6	4
1	2	-1	1	2	8,0	-1	1	1	3	3	1	2020	-1	510	0,6	6
1	2	-1	1	2	-1,0	-1	1	1	3	4	1	2020	-1	472	0,6	4
1	2	-1	1	2	9,0	-1	1	1	3	3	1	2020	-1	477	0,6	4
2	2	-1	1	1	6,9	-1	2	2	1	2	1	2018	-1	133	1,5	.
2	2	-1	1	1	6,9	-1	2	2	1	2	1	2018	-1	133	1,5	.
2	2	-1	1	2	7,9	-1	2	1	1	2	1	2018	-1	283	1,0	.
2	2	-1	1	2	8,7	-1	2	1	3	2	1	2018	-1	420	2,5	.
2	2	-1	1	2	5,1	-1	1	2	2	2	1	2019	-1	614	0,6	.
2	2	-1	1	1	7,1	-1	1	2	2	2	1	2019	-1	278	0,6	.
2	2	-1	1	1	8,3	-1	1	1	3	2	2	1985	2020	289	2,0	.
2	2	-1	1	2	9,2	-1	1	1	3	98	2	1995	2020	459	3,0	.

Obr. 3.1. Výstřižek z databází

Celkem bylo do databází schváleno a zapsáno 892 z 956 měření (93,3 %).
Důvodem odstranění formulářů bylo nesplnění podmínky kontroly (popsané
výše) a chybějící podstatná data.



Graf 3.2. Počet měření od zkoušejících A až O dle roku výstavy objektu

4. Přehled výsledků vzduchotěsnosti

V této kapitole se nachází přehled výsledků vzduchotěsnosti, které poslouží jako základ pro následnou analýzu.

V tabulce (*Tab. 4.1.*) je znázorněno, že z odevzdaných měření bylo 828 případů rodinných domů (92,8 %), což je zároveň převažující většina; 39 případů bytových domů (obytný prostor) (4,4 %) a 25 případů ostatních druhů objektů (4,8 %). Z důvodu nedostatečného množství dat pro ostatní účely provozu objektu, tato data nebyla vyhodnocována.

Účel měřených objektů	Počet měření	Procentní rozdělení
rodinný dům	828	92,8 %
bytový dům (obytný prostor)	39	4,4 %
administrativní budova	1	0,1 %
škola, školka, vzdělávací zař.	8	0,9 %
zdravotnické zařízení	1	0,1 %
výrobní budova	1	0,1 %
skladová budova	6	0,7 %
individuální rekreace	5	0,6 %
jiné	3	0,3 %
Celkem	892	100,0 %

Tab. 4.1. Počet zkoušek vzduchotěsnosti v databázi dle účelu objektů.

Dle energetické náročnosti objektů v databázi (*Tab. 4.2.*) se vyskytují nejvíce 3 tyto druhy objektů: 141 případů běžných budov (15,8 %), 138 případů nízkoenergetických domů (15,5 %), a převažující většina je 601 případů pasivních domů (67,4 %). Velký výskyt pasivních domů v databázi je způsobený zvýšeným požadavkem kladeným na vzduchotěsnost dle normy ČSN 73 05 40.

Energetická náročnost objektu	Počet měření	Procentní rozdělení
běžná budova	141	15,8 %
nízkoenergetický dům	138	15,5 %
pasivní dům	601	67,4 %
dům blízký nulové spotřebě	1	0,1 %
jiná	7	0,8 %
nezjištěno / neuvedeno	4	0,4 %
Celkem	892	100,0 %

Tab. 4.2. Počet zkoušek vzduchotěsnosti v databázi dle energetické náročnosti.

V další tabulce (Tab. 4.3.) je znázorněn úspěch dosažení cílových hodnot n_{50} . Úspěšnost dosažení hodnot n_{50} je podle údajů u všech typů energetické náročnosti více méně podobná a pohybuje se kolem 85 %.

Stáří budovy	Počet měření	Procentní rozdělení	Počet měření	Procentní rozdělení	Počet měření	Procentní rozdělení
	běžná budova		nízkoenergetický dům		pasivní dům	
Budovy, které dosáhly cílové hodnoty n_{50}	124	87,9 %	117	84,8 %	513	85,5 %
Budovy, které <u>nedosáhly</u> cílové hodnoty n_{50}	17	12,1 %	21	15,2 %	87	14,5 %
Celkem	141	100,0 %	138	100,0 %	600	100,0 %

Tab. 4.3. Počet dosažených hodnot n_{50} při zkoušení vzduchotěsnosti obálky

Dále se v tabulce (Tab. 4.4.) popisuje stav budovy a systém vzduchotěsnicích opatření SVO, kde převažující většina objektů byla v dokončeném stavu 56,1 %. Bohužel se zde nedá udělat žádný relevantní závěr z důvodu nedostatečného množství dat měření. Otázka o stavu budovy byla volitelná, nezodpovězena byla však ve 314 formulářích (35,2 %).

Stav budovy	Počet měření	Procentní rozdělení
budova dokončená, SVO dokončený, zakrytý	500	56,1 %
budova <u>nedokončená</u> , SVO dokončený, zakrytý	35	3,9 %
budova <u>nedokončená</u> , SVO dokončený, <u>nezakrytý</u>	35	3,9 %
budova <u>nedokončená</u> , SVO <u>nedokončený</u>	8	0,9 %
nezjištěno / neuvedeno	314	35,2 %
Celkem	892	100,0 %

Tab. 4.4. Stav budovy v okamžiku měření

Dále další tabulka (Tab. 4.5.) znázorňuje měření dle rozsahu měření v objektu. Z této tabulky je zřejmé, že měření probíhala z drtivé většiny pro celou budovu. Z důvodu nedostatečného množství dat pro konkrétní části měřených objektů v počtu 51 měření (5,7 %), data dále nebyla vyhodnocena ani se nerozlišovala v analýze dle rozsahu měření.

Rozsah měření	Počet měření	Procentní rozdělení
Celá budova	840	94,3 %
Jedna část budovy	51	5,7 %
Celkem	891	100,0 %

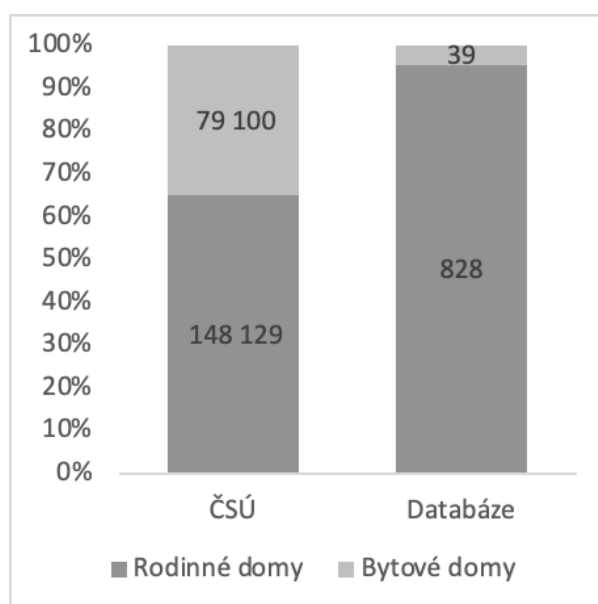
Tab. 4.5. Počet měření dle rozsahu

V tabulce (Tab. 4.6.) se znázorňuje způsob větrání, kde převažující je mechanický systém větrání se zpětným získáváním tepla. Z důvodu nedostatečného množství dat v databázi, data nebyla vyhodnocena v analýze dle způsobu větrání.

Převažující způsob větrání	Počet měření	Procentní rozdělení
přirozené otevírání oken	43	4,8 %
mechanický systém	38	4,3 %
mechanický systém + ZZT	807	90,6 %
hybridní	3	0,3 %
Celkem	891	100,0 %

Tab. 4.6. Převažující způsob větrání

Z výše uvedeného můžeme říct, že databáze víceméně reprezentuje rodinné



Graf 4.1. Poměr rodinných a bytových vestaveb v databáze a podle ČSÚ za období 2012 - 2020

domy. Graf 4.1. znázorňuje poměr rodinných domů ku bytovým domům dle dokončených objektů v letech 2012 až 2020. Ostatní typy budov dle účelu v grafu nebyly uvedeny z důvodu chybějících data v Českém statistickém úřadu (ČSÚ). Z tohoto grafu je zřejmé, že ve databázi převažují rodinné domy 95,5 % ku bytovým domům a dle Českého statistického úřadu (ČSÚ) dokončené rodinné domy 65,8 % ku bytovým domům po celé České republice. Tohle ukazuje, že databáze nerepresentuje náhodný

výběr ze současného fondu budov v České republice. Dle mého názoru může být větší výskyt rodinných domů ve sledované databázi, než dle údajů ČSÚ, způsobené dvěma možnými důvody. Prvním je jednodušší návrh a provedení jednotlivých konstrukcí a detailů, které mají významný vliv na vzduchovou těsnost obálky. Jako druhý důvod bych uvedl instalování vzduchotechnických jednotek s rekuperačními výměníky, které se vyskytovaly u 90,6 % měřených objektů. Cena těchto jednotek se může diametrálně lišit dle provedení, průtoku vzduchu a dalších faktorů. Vzduchotechnické jednotky instalované do rodinných

domů mohou být násobně levnější než ty, které by měly obsluhovat celý bytový komplex. Dále je zde značná jednoduchost v umístění samostatné vzduchotechnické jednotky, ve vedení rozvodů potrubí a osazování distribučních a dalších prvků, nutných pro správný chod, který by zajistil požadované vnitřní prostředí. V porovnání se složitějším a větším obytným domem s například několika desítkami obytných jednotek, se náročnost provedení takového systému zvyšuje a spolu s ním i počet jednotlivých potrubních elementů, které je nutné pravidelně revidovat.

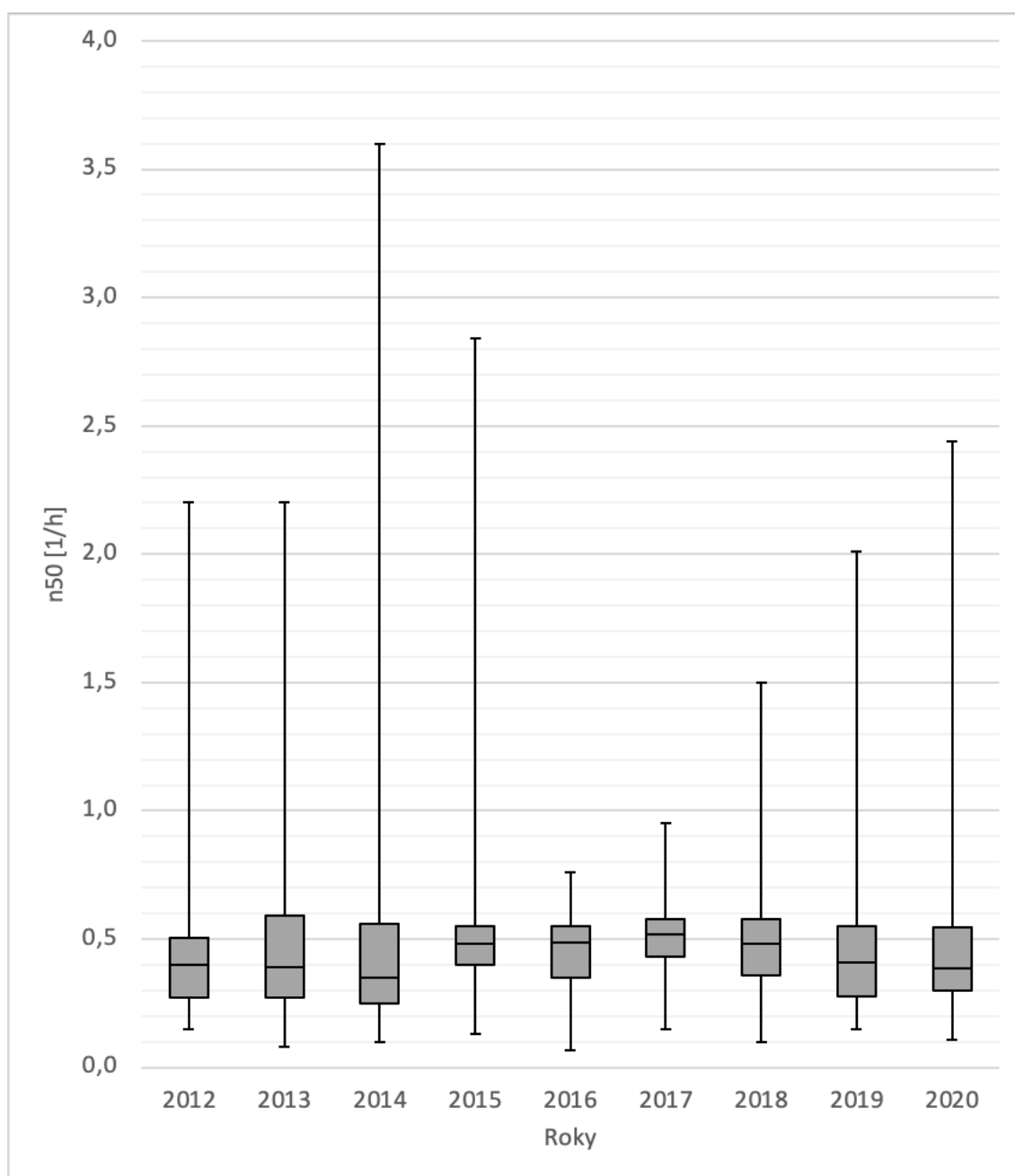
Z hlediska energetické náročnosti více než polovina dat tvoří pasivní domy (67,4 %), zůstatek tvoří běžné budovy (15,8 %) a nízkoenergetické domy (15,5 %). Nicméně, dle slov ředitele Centra pasivního domu Tomáše Vanického [5] bylo dokončeno v roce 2020 zhruba 1600 pasivních domů, což je 8,1 % od celkového počtu dostavených budov v roce 2020 po celé České republice. Tohle také ukazuje, že databáze nereprezentuje náhodný výběr ze současného fondu budov v České republice. Při podrobném zkoumání dat se zjistilo, že běžné budovy v databázi jsou po rekonstrukci (68,8 %), nejvíce novostaveb jsou nízkoenergetické domy (78,4 %) a pasivní domy (99,0 %).

Dále se ukázalo, že 85 % dat z databází splňuje cílové hodnoty intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Avšak úspěšnost dosažení cílové hodnoty může být zkreslena, protože členové asociace odevzdali pouze jimi vybraná měření. 56,1 % budov v databázi jsou ve stavu dokončeném a mají i dokončený systém vzduchotěsnících opatření SVO.

5. Analýza výsledků

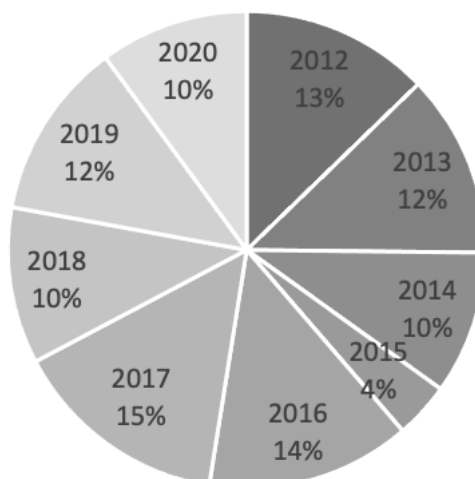
V dalších 4 podkapitolách se pokusím položit otázky ve vzduchotěsnosti obálky budovy, na které se následně zkusím zanalyzovat a pokusím na nich odpovědět.

5.1. Změny v průběhu let



Graf 5.1.1. Výsledky n_{50} seřazené podle roku výstavby pro pasivní budovy

V podkapitole “5.1. Změny v průběhu let” byla položena otázka o vývoji vzduchotěsnosti obálky budovy během posledních let v České republice. Zde se budu snažit odpovědět na otázky jako: co ovlivňuje změny v obálce budov, zda stoupá, klesá nebo zda se kvalita vzduchotěsní obálky budovy nezměnila během let.



Graf 5.1.2. Počet měření dle roku

V grafu (*Graf 5.1.1.*) je znázorněno krabíčkovým grafem vývoj hodnoty intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa u pasivních budov seřazených dle roku jejich výstavby. Pro graf bylo zvoleno období od roku 2012 do roku 2020, díky velkému počtu měření v celkovém počtu 574 (více *Graf 5.2.*). V tomto krabíčkovém grafu je medián (druhy kvartil) reprezentován uvnitř středovou horizontální linií, spodní a horní okraj obdélníku jsou 25. (první kvartil) a 75. percentil (třetí kvartil). Úsečky se rozšiřují do maximálních a minimálních hodnot měření.

Koláčový graf (*Graf 5.1.2.*) znázorňuje procentuální rozložení počtu dat dle roku pro krabíčkový graf (*Graf 5.1.1.*). Je poměrně stejný a pohybuje se kolem 10% až 15% s výjimkou dat za rok 2015, kde počet dat k celkovému počtu je jen 4 %.

Ke stanovení korelace dat byl použit Pearsonův korelační koeficient [7] (vzorec 5.1.1.) a následně byla data hodnocena podle Evansovy příručky [8]:

- 0,00 - 0,19 “velmi slabá”
- 0,20 - 0,39 “slabá”
- 0,40 - 0,59 “střední”
- 0,60 - 0,79 “silná”
- 0,80 - 1,00 “velmi silná”

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

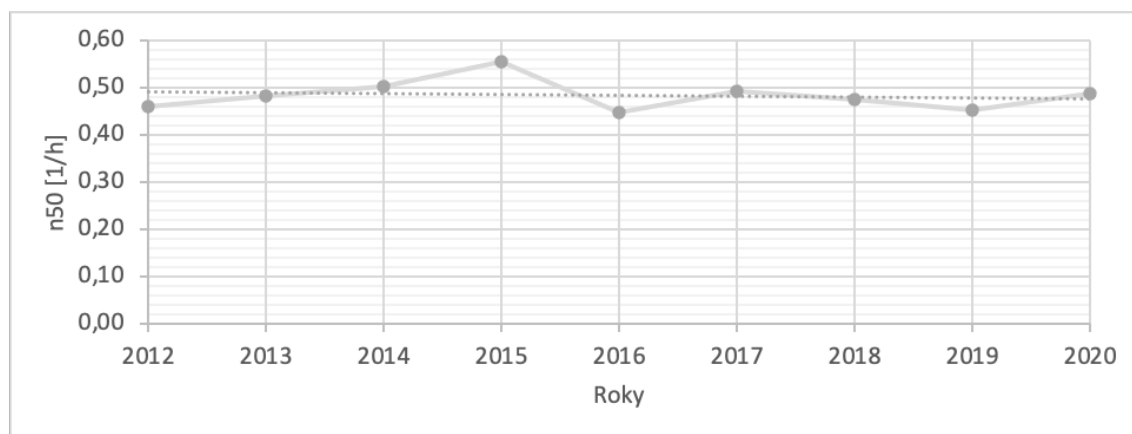
Vzorec 5.1.1. Pearsonův korelační koeficient

V krabíčkovém grafu (*Graf 5.1.1.*) dle dat z *tabulky 5.1.1.*, v které jsou znázorněny korelační koeficienty, je zřejmé, že neexistuje žádná korelace.

Název	r	Korelace	n ₅₀ [1/h]
Maximum	0,09	“velmi slabá”	min.: 0,08 (2013), max.: 0,15 (2012)
1. kvantil	0,22	“slabá”	min.: 0,25 (2014), max.: 0,43 (2017)
Medián	-0,18	“velmi slabá”	min.: 0,35 (2014), max.: 0,52 (2017)
2. kvantil	-0,15	“velmi slabá”	min.: 0,51 (2014), max.: 0,59 (2013)
Maximum	-0,29	“slabá”	min.: 0,76 (2016), max.: 3,60 (2014)

Tab. 5.1.1. Počet měření dle rozsahu

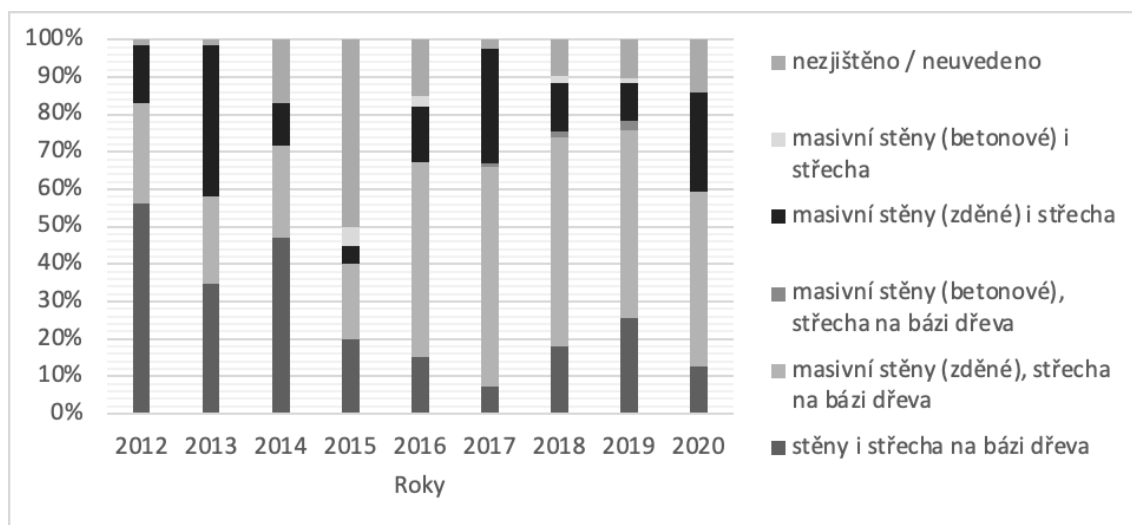
Následně, v grafu (*Graf 5.1.3.*), je uveden průměr hodnoty intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa, seřazených podle roku výstavby. Tečky zde reprezentují průměry měření za roky a čárkovaná čára ukazuje převládající směr průměrů dle metody nejmenších čtverců. Ukázala se velmi nízká závislost dat, kde korelační koeficient se rovná $r = -0,138$.



Graf 5.1.3. Průměr hodnot n₅₀ seřazených podle roku výstavby pro pasivní budovy

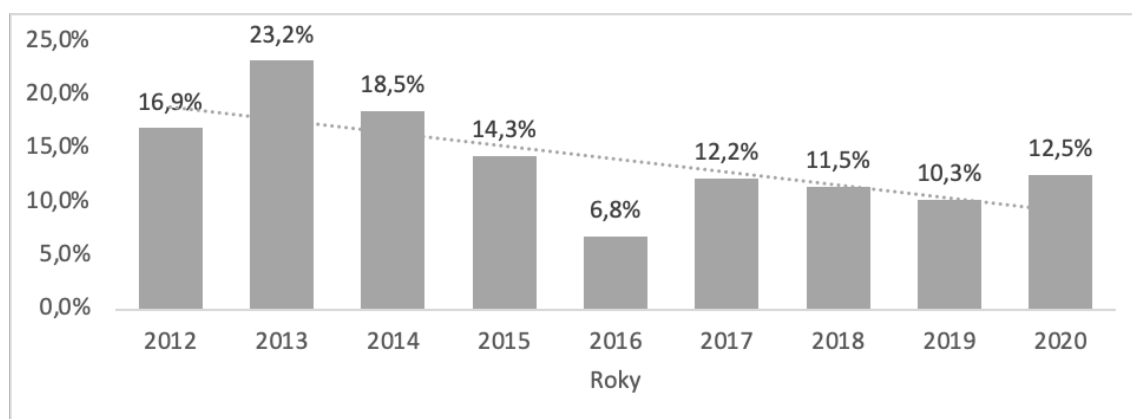
V měření také byly zanalyzovány hlavní stavební materiály dle roku (*Graf 5.1.4.*), které mohly ovlivnit výsledky v krabicovém grafu (*Graf 5.1.1.*). Zde od roku 2012 do roku 2014 bylo větší množství dřevěných staveb než v ostatních letech. Během dalších let (2015 - 2020) se navýšil objem masivních staveb s dřevěnou střechou a klesnul počet dřevěných staveb. Zároveň mohly být výsledky analýzy také ovlivněny různými zkoušejícími, kde mezi lety 2012 a

2014 byla převažující většina měření od zkoušejícího “J” a mezi lety 2015 a 2020 byla převažující většina měření od zkoušejícího “F”.



Graf 5.1.4. Počet měření dle hlavního stavebního materiálu, seřazených podle roku výstavby

Graf 5.1.5. znázorňuje procentní hodnoty nedosažených cílových hodnot intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa, seřazených podle roku výstavby. Z grafu je zřejmé, že výsledky se zlepšují během let a ukazuje se , že výsledky mají “silné” korelace ($r = -0,677$).



Graf 5.1.5. Procentní hodnoty nedosažených cílových hodnot n_{50} seřazených podle roku výstavby

Na závěr podkapitoly můžeme konstatovat, že předpoklad nesplnil očekávání a nebyla nalezena žádná souvislost. Může to ovlivňovat hodně faktorů. Zkoušející technici odevzdali pouze jimi vybrané výsledky. Zároveň roky výstavby objektů,

kteře byly vřše prezentovány jsou za malė obdobř, tj. za 9 let, coř mřže břt předpokladem neřpsřchu. Nicmėnė, v grafu (*Graf 5.1.5.*) se ukázalo, že bėhem let klesaly pořty nedosaženřch cřlovřch hodnot k pomėřu dosaženřch hodnot intenzity vřmėny vzduchu př tlařovėm rozdřlu 50 Pa.

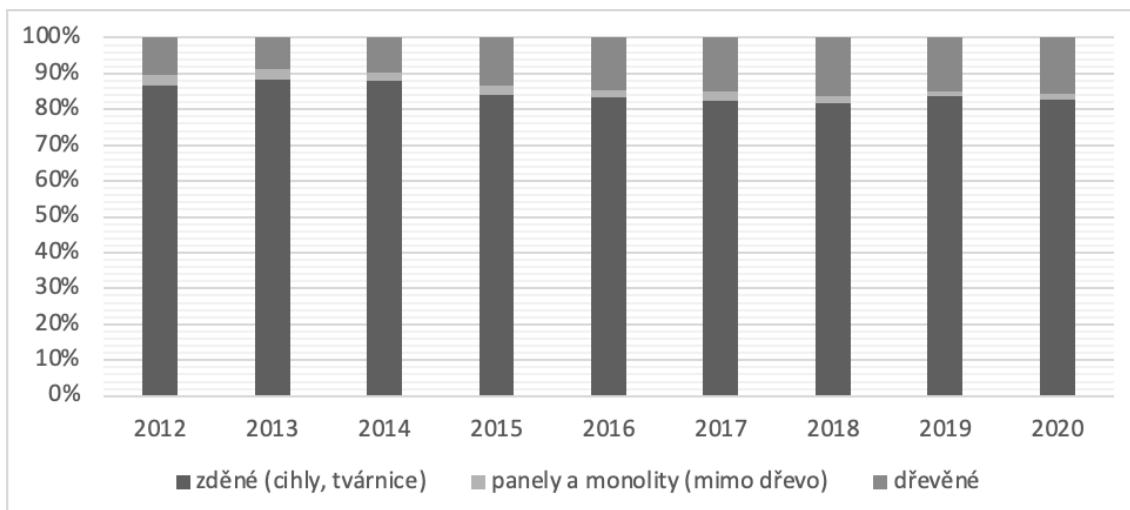
5.2. Vliv hlavnřho materiálu na vzduchotėsnost



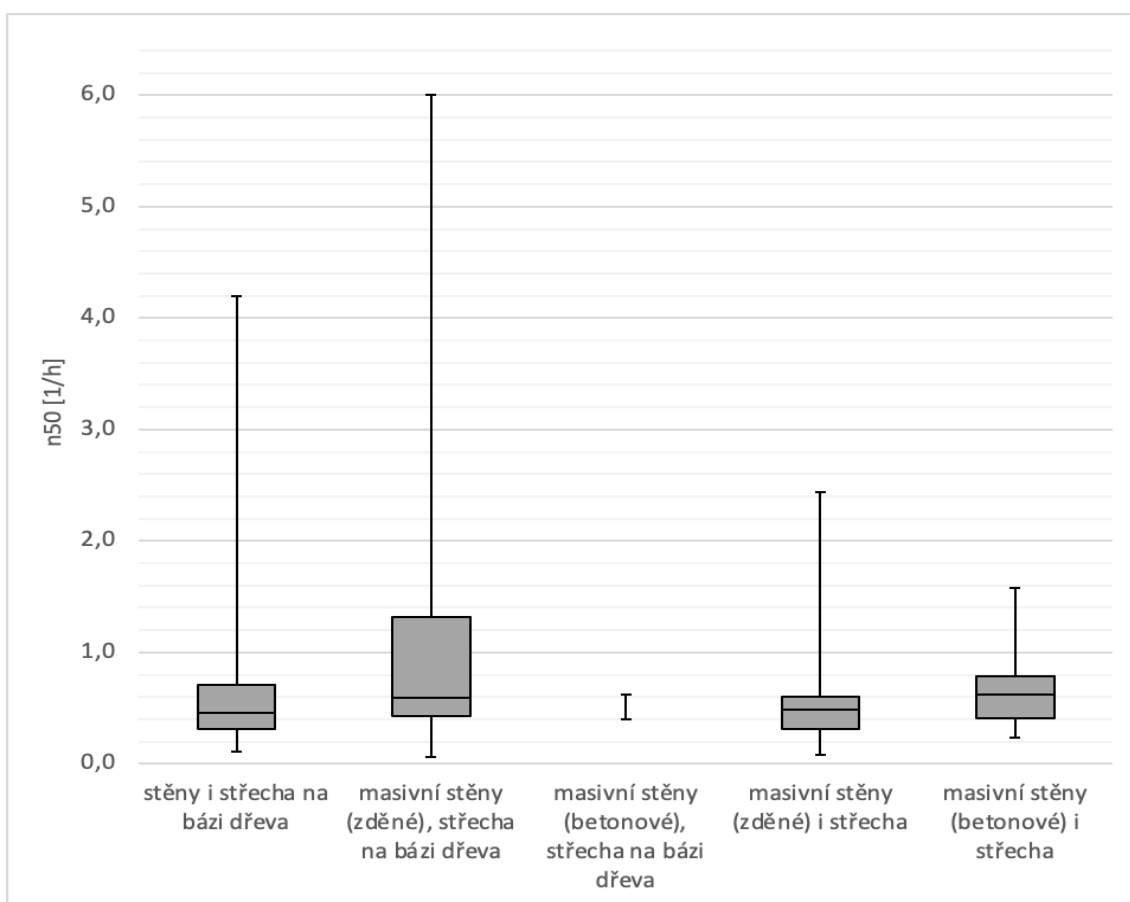
Graf 5.2.1. Pořet mėření dle hlavnřho stavebnřho materiálu

V podkapitole “5.2. Vliv hlavnřho stavebnřho materiálu na vzduchotėsnost” byla polořena otāzka o vlivu hlavnřho stavebnřho materiálu na vzduchotėsnřcř obālky budovy. Jakė materiály jsou jednoduřř na nāvřh obālky tak, aby splnily cřlovė hodnoty na intenzitu vřmėny vzduchu př tlařovėm rozdřlu 50 Pa.

V databāzi se vyskytuje řirokā řkāla hlavnřch stavebnřch materiālř: zdivo, betonovė panely, dřevėnė panely, řelezobeton, kovovė sendviřovė panely, kazety s TI vřplnř, apod. Aby bylo mořnė provėst analřzu, byly hlavnř stavebnř materiály pro přehlednost seřazeny do 5 skupin, kteře jsou uvedeny v kolāřovėm grafu (*Graf 5.2.1.*) a jejich procentuālř hodnoty. Z grafu je zřejmė, že 3 skupiny jsou převařujřcř: zdnė s rřznřmi typy střech a dřevostavby. Tyto pomėřy hlavnřch stavebnřch materiālř v databāzi neodpovřdāj pomėřřm, kteře jsou uvedeny v Āeskėm statistickėm řřadu (ĀSŘ) (viz *Graf 5.2.2.*). Stěny na bāzi betonu s rřznřmi typy střech jsou pouze v 15 mėřeních (~2 %), a proto nebudou do analřzy zahrnuty.



Graf 5.2.2. Počet měření z ČSÚ dle hlavního nosného svislého stavebního materiálu

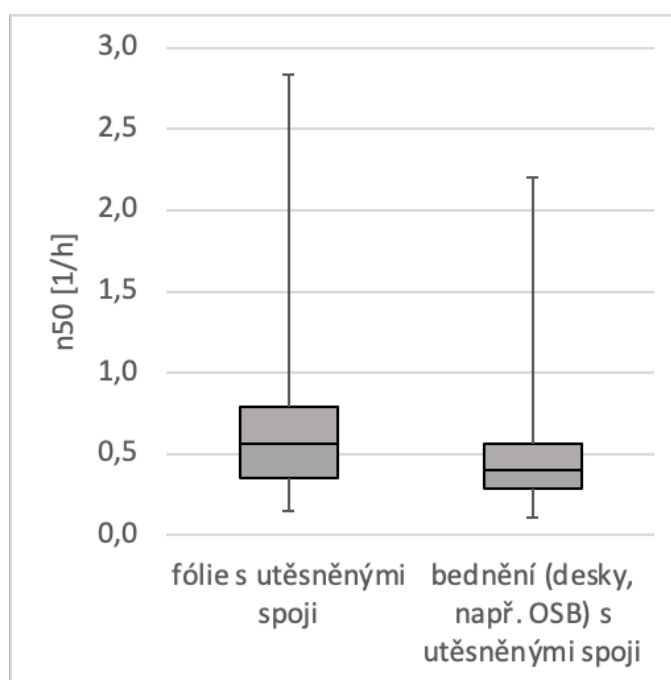


Graf 5.2.3. Vliv hlavního materiálu na vzduchotěsnost

Krabicový graf 5.2.3. ukazuje, že u dřevěných budov se rozptyl pohybuje od 0,11 až do 4,20 [1/h], střední hodnota je 0,46 1/h, 1. kvantil je 0,32 1/h a 3.

kvantil je 0,71. Masivní zděné budovy s dřevěnou střechou mají největší rozptyl, který se pohybuje od 0,07 až do 6,00 [1/h] střední hodnota je 0,59 1/h, 1. kvantil je 0,43 1/h a 3. kvantil je 1,32 1/h. Masivní zděné budovy s masivní střechou mají rozptyl, který se pohybuje od 0,08 až do 2,44 [1/h] střední hodnota je 0,63 1/h, 1. kvantil je 0,41 1/h a 3. kvantil je 0,79 1/h.

Masivní betonové budovy mají rozptyl hodnot intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa od 0,40 do 0,62 [1/h] s dřevěnou střechou a od 0,24 do 1,58 [1/h] s masivní střechou. Střední hodnota, 1. a 2. kvantil u masivních betonových domů s dřevěnou střechou nebyly vypočteny z důvodu nedostatečného množství dat. U budov s masivní střechou je střední hodnota 0,63 1/h, 1. kvantil je 0,41 1/h a 3. kvantil je 0,79 1/h. Nicméně, hodnoty pro masivní betonové budovy, které jsou v počtu 15 měření, mohou mít zkreslený průběh.

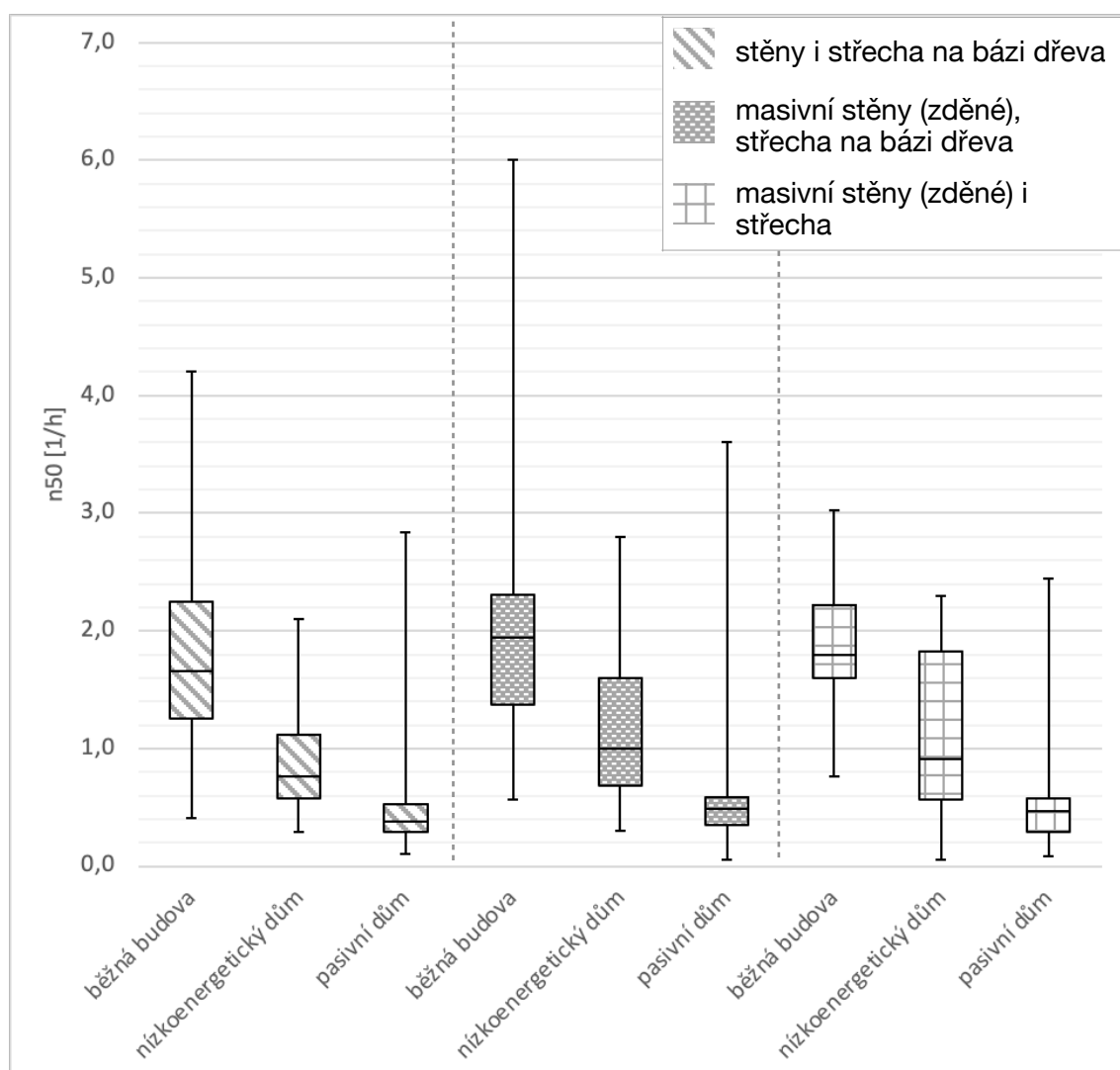


Graf 5.2.4. Výsledky n_{50} dle HVV pro dřevostavby

Z grafu 5.2.3. je zřejmé, že masivní zděné budovy s dřevěnou střechou mají nejhorší výsledky. Tohle může způsobovat kvalita provedení dřevěné střechy a její napojení na stěny. Masivní zděné budovy s masivní střechou ukazují nejlepší výsledky ve vzduchotěsnosti, kde je rozdílem pouze druh střechy.

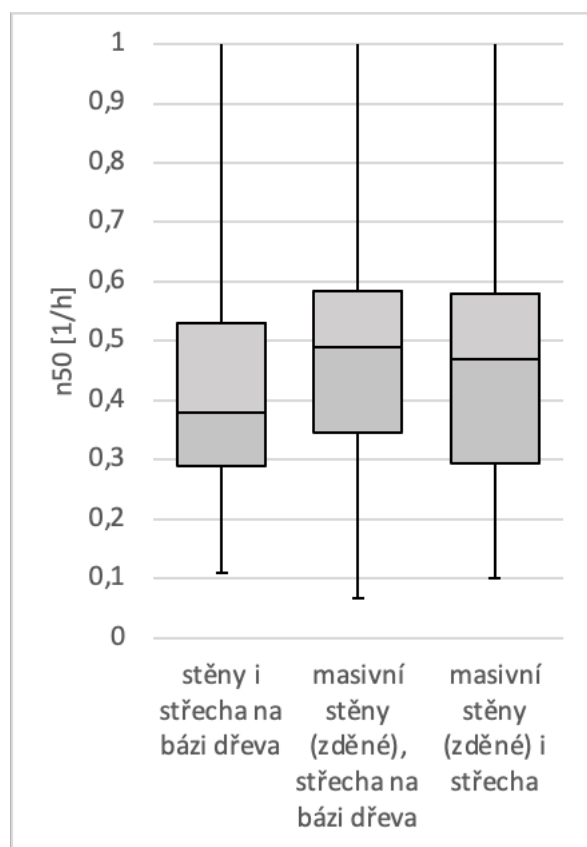
	Stěny i střecha na bázi dřeva		Masivní stěny (zděné), střecha na bázi dřeva		Masivní stěny (zděné) i střecha	
	počet	podíl (%)	počet	podíl (%)	počet	podíl (%)
Běžná budova	14	6,7 %	92	23,2 %	7	4,8 %
Nízkoenergetický dům	39	18,7 %	54	13,6 %	17	11,6 %
Pasivní dům	156	74,6 %	251	63,2 %	123	83,7 %
Celkem	209	100,0 %	397	100,0 %	147	100,0 %

Tab 5.2.1. Počet měření dle hlavního materiálu a energetické náročnosti budovy



Graf 5.2.5. Vliv hlavního materiálu na vzduchotěsnost, rozdělené dle energetické náročnosti budovy

V grafu 5.2.4. jsou znázorněny výsledky intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa dle hlavní vzduchotěsnicí vrstvy (HVV) u střechy a stěn pro dřevostavby. Celkem bylo znázorněno v grafu 173 z 219 měření dřevostaveb



Graf 5.2.6. Výsledky n_{50} dle hlavního materiálu pro pasivní budovy

(79,0 %), kde fólie s utěsněnými spoji u střech a stěn v počtu 51 měření (23,3 %), bednění (desky, např. OSB) s utěsněnými spoji u střech a stěn v počtu 122 měření (55,7 %) a ostatní, které nebyly zahrnuty do grafu kvůli velkému rozsahu druhu HVV, v počtu 46 měření (21,0 %). Střední hodnota pro fólie je 0,56 1/h, a pro desky je 0,40 1/h. Z grafu zřejmé, že HVV z desek, jsou těsnější než fólie. Dle mého názoru to může způsobovat, že fólie mají větší pravděpodobnost poškození během výstavby domu. Utěsnění spojů fólií je mnohem obtížnější kvůli její malé tuhosti než u desky na bázi dřeva.

Krabicový graf 5.2.5. znázorňuje 3 skupiny hlavních stavebních materiálů, kde každá z nich je rozdělená dle energetické náročnosti. Dá se předpokládat, že energetická náročnost ovlivňuje rozptyl krabiček, tj. čím víc je energeticky úspornější budova, tím je menší průběh rozptylu krabiček.

Na závěr této podkapitoly se dá konstatovat, že hlavní stavební materiál má důležitý vliv na vzduchotěsnost obálky budovy. Masivní betonové budovy mají větší pravděpodobnost dosažení cílových hodnot intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa, díky schopnosti stavebního materiálu (beton, zdivo, omítka).

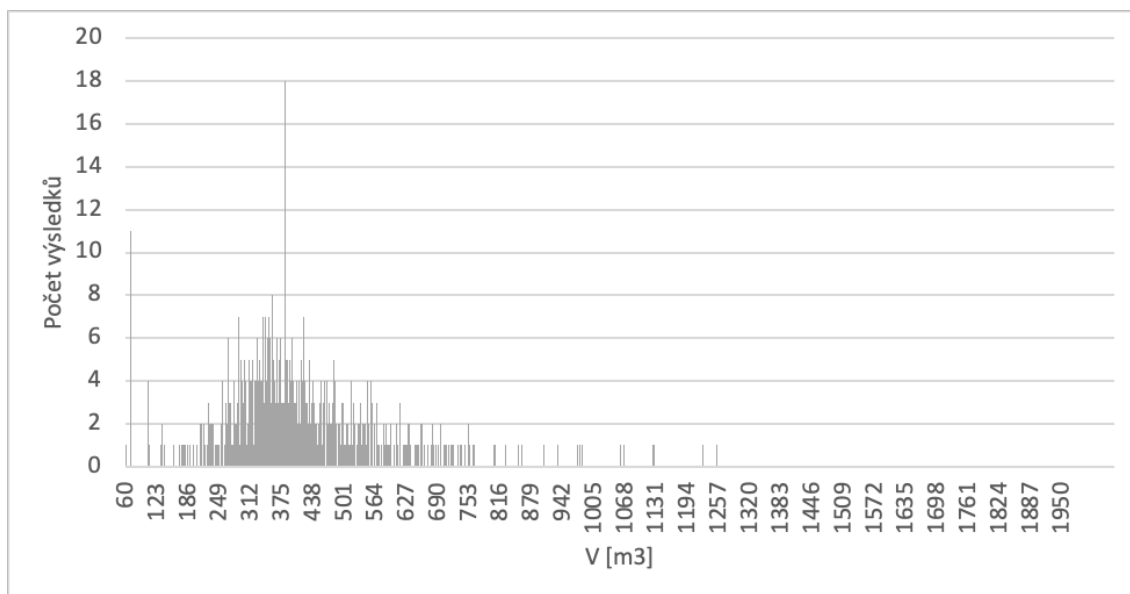
Ukázalo se, že u všech energetických náročností kombinace masivní zděné budovy s dřevěnou střechou je o miň vzduchotěsnější, než budovy s masivní střechou. Dle mého názoru kvalita vzduchotěsnící obálky budovy násobně klesá kvůli komplikovanému napojení svislých konstrukcí na střechu. U složité konstrukce střechy, která se skládá z velkého počtu detailů, může vzniknout netěsnost.

U pasivních domů na bázi dřeva (Graf 5.2.6.) jsou podle mediánu (2. kvantil) výrazně lepší výsledky než u masivních zděných staveb. Nejhorší výsledky ukazují masivní zděné stavby s dřevěnou střechou. Jeden z důvodů může být to, že projektanti vědí o velkém riziku vzniku netěsnosti v obálce, a proto dbají na větší kvalitu zpracování během návrhu a samotné realizace. Zároveň dřevostavby ukazují, že kvalita vzduchotěsnosti závisí také na hlavní vzduchotěsnící vrstvě - HVV. Ukázalo se, že desky na bázi dřeva vykazují lepší výsledky ve vzduchotěsnosti než fólie. Tuhost desek usnadňuje vytvoření kvalitních těsnících spojů mezi sebou. Bohužel fólie mají větší pravděpodobnost poškození během výstavy.

5.3. Vnitřní objem budovy

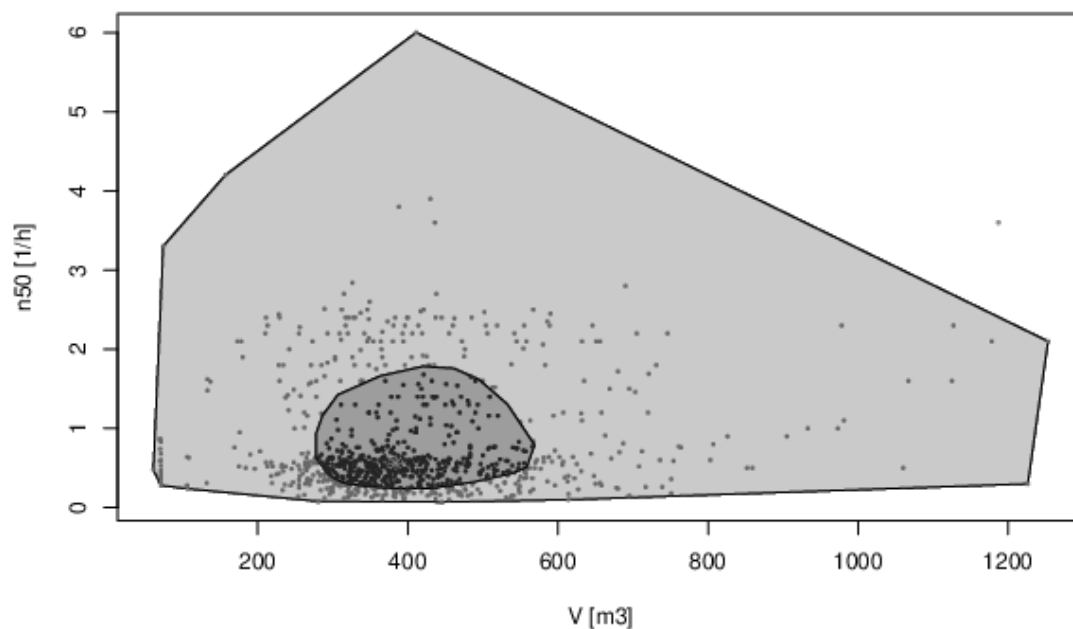
V podkapitole “5.3. Vliv hlavního materiálu na vzduchotěsnost” se bude zkoumat závislost vnitřního objemu budovy na intenzitě výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Motivace ke zjištění této korelace vedla k nalezení postupu, který mohl ovlivnit orientační hodnotu intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa, když budeme vědět vnitřní objem stavby.

Data vycházejí z databáze v počtu 890 měření, kde nejmenší hodnota vnitřního objemu je 61 m³ a největší je 326 212 m³. Analýza pro jednodušší zobrazení v grafech byla zkrácena na hodnotu 1 253 m³ a zobrazena v počtu 878 měření (98,7 % od původního souboru) v rozptylu od 61 m³ do 1 253 m³.

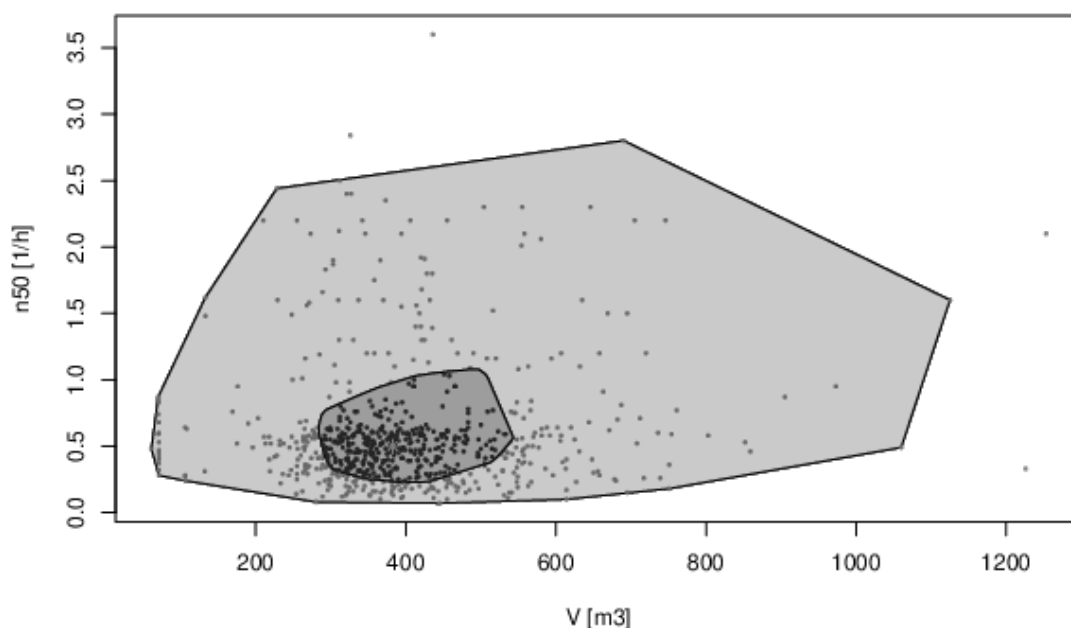


Graf 5.3.1. Počet měření dle vnitřního objemu (878 dat)

V *grafu 5.3.1.* je zobrazeno počet měření dle intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa se střední hodnotou rovnou 403 m³.



Graf 5.3.2. Závislost n_{50} na V pro všechny energetické náročnosti budov



Graf 5.3.3. Závislost n_{50} na V pro nízkoenergetické a pasivní budovy



Grafy 5.3.2. a 5.3.3. byly znázorněny pomocí “bagplot”. “Bagplot” je metoda zobrazování dvourozměrných dat a je hodně podobná krabicovému grafu. Vnitřní mnohoúhelník, který se nazývá “bag”, obsahuje 50 % datových bodů. Vnější mnohoúhelník se nazývá “loop” a obsahuje zbylých 50 % datových bodů. Bagplot se skládá ze tří vnořených polygonů, nazývaných „pytel“, „plot“ a „smyčka“. Symbol (*) poblíž středu grafu se používá k označení dvourozměrného mediánu.

V grafu 5.3.2. se zobrazují data pro všechny typy energetické náročnosti a ukazují “velmi slabé” korelace v souladu s korelačním koeficientem ($r = 0,109$).

V grafu 5.3.3. se zobrazují data pro pasivní domy a ukazují také “velmi slabé” korelace v souladu s korelačním koeficientem ($r = 0,093$).

Z analýzy je zřejmé, že vnitřní objem objektu neovlivňuje hodnoty intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa měřených domů. Nicméně, nelze říci finální závěr této podkapitoly, protože většina měření v databázi byly budovy pod 1200 m³. V teorii, která nebyla analyzována kvůli chybějícím měřením velkých staveb, tj. budovy s vnitřním objemem nad 10 000 m³, intenzita výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa mohla dosahovat dobrých výsledků při málo

těsnící obálky domů. Pro lepší pochopení jsou níže znázorněné dvě měřené budovy:

1. budova: pasivní rodinný dům Vnitřní objem V : 419 m ³ Plocha obálky A_E : 432 m ² Průtok vzduchu q_{50} : 197 m ³ /h Intenzita výměny vzduchu n_{50} : 0,47 1/h Měrná průvzdušnost obálkou q_{E50} : 0,46	 běžná budova
2. budova: skladová budova s energetickou n Vnitřní objem V : 160 102 m ³ Plocha obálky A_E : 34 038 m ² Průtok vzduchu q_{50} : 26 585 m ³ /h Intenzita výměny vzduchu n_{50} : 0,17 1/h Měrná průvzdušnost obálkou q_{E50} : 0,78 m ³ /(m ² ·h)	 nízkoenergetický dům

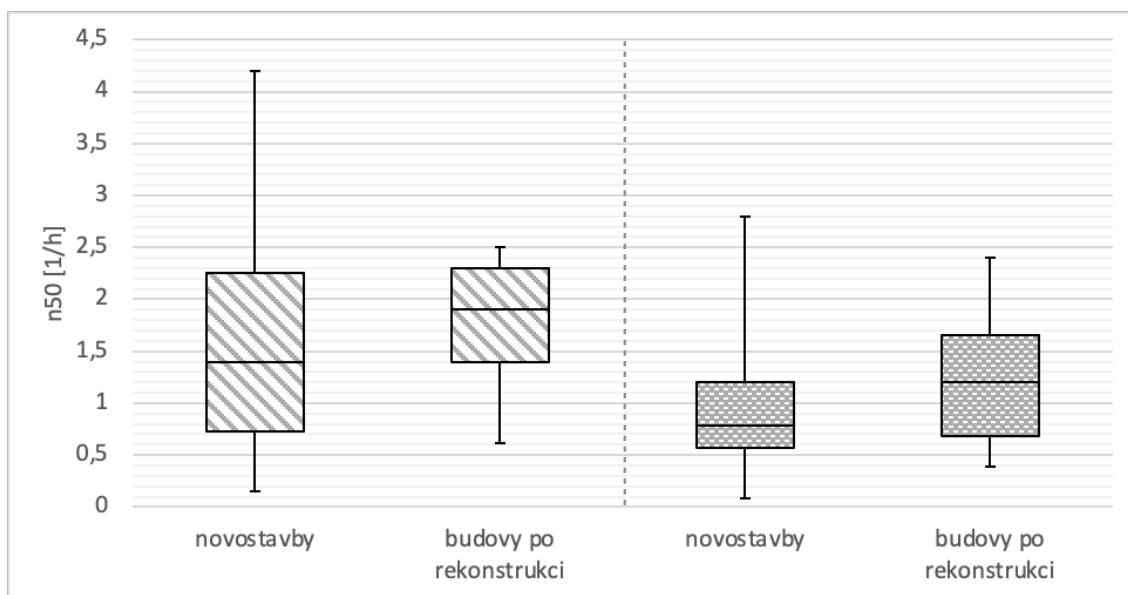
Průtok vzduchu na metr čtverční (měrná průvzdušnost obálkou q_{E50}) skrz obálku u rodinného domu byl podobný jako u skladové budovy. Při tomto předpokladu by se průtok vzduchu rovnal $q_{50} = q_{E50} \times A_E = 0,78 \times 432 = 340$ m³, a následně intenzita výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa by byla rovna $n_{50} = q_{50} / V = 340 / 419 = 0,81$ 1/h. Dle mého názoru z toho plyne, že poměr plochy budovy ku objemu vzduchu uvnitř budovy je mimořádně nevýhodný, a pro hodnocení kvality vzduchotěsnící obálky by bylo vhodnější vztahovat plochu obálky na měrnou průvzdušnost obálky u velkých budov [1].

5.4. Porovnání novostaveb a budov po rekonstrukci

Podkapitola “5.4. Porovnání novostaveb a budov po rekonstrukci” se věnuje vlivu rekonstrukce na budovu, kde byl položena otázka: může budova po rekonstrukci dosáhnout stejné vzduchotěsnosti jako u novostavby?

Níže jsou znázorněny dva grafy 5.4.1., kde se porovnávají hodnoty intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa dle stáří budovy (běžné budovy a

nízkoenergetické domy). U běžných budov převažují dle stáří budovy po rekonstrukci 68,8% a u nízkoenergetických domů převažují dle stáří novostavby 78,4 %. Pasivní budovy nebyly zanalyzovány z důvodu malého souboru dat u budov po rekonstrukci.



Graf 5.4.1. Porovnání novostaveb a budov po rekonstrukci dle n_{50} : vlevo - běžné budovy; vpravo - nízkoenergetické domy

Stáří budovy	Počet měření	Procentní rozdělení	Počet měření	Procentní rozdělení	Počet měření	Procentní rozdělení
	běžná budova		nízkoenergetický dům		pasivní dům	
novostavby	43	31,2 %	105	78,4 %	593	99,0 %
budovy po rekonstrukci	95	68,8 %	29	21,6 %	6	1,0 %
Celkem	138	100,0 %	134	100,0 %	599	100,0 %

Tab. 5.4.1. Počet měření dle stáří a energetické náročnosti budov

Ze dvou grafů (Graf 5.4.1.) můžeme konstatovat, že budovy po rekonstrukci mají menší pravděpodobnost dosažení nízkých hodnot (minimálních hodnot) intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Graf 5.4.1. (vlevo) ukazuje rozdíly v mediánu: 1,4 1/h u novostaveb a 1,9 1/h u budov po rekonstrukci. Graf 5.4.1. (vpravo) ukazuje mediány souboru: 0,8 1/h u

novostaveb a 1,2 1/h u budov po rekonstrukci. Zároveň, soubor dat pro nízkoenergetické domy reprezentující budovy po rekonstrukci má větší rozptyl a krabička je posunuta více nahoru než krabička pro novostavby. Nicméně, maximální hodnoty u obou grafů mají opačnou tendenci a nejhorší výsledky se vyskytují u novostaveb.

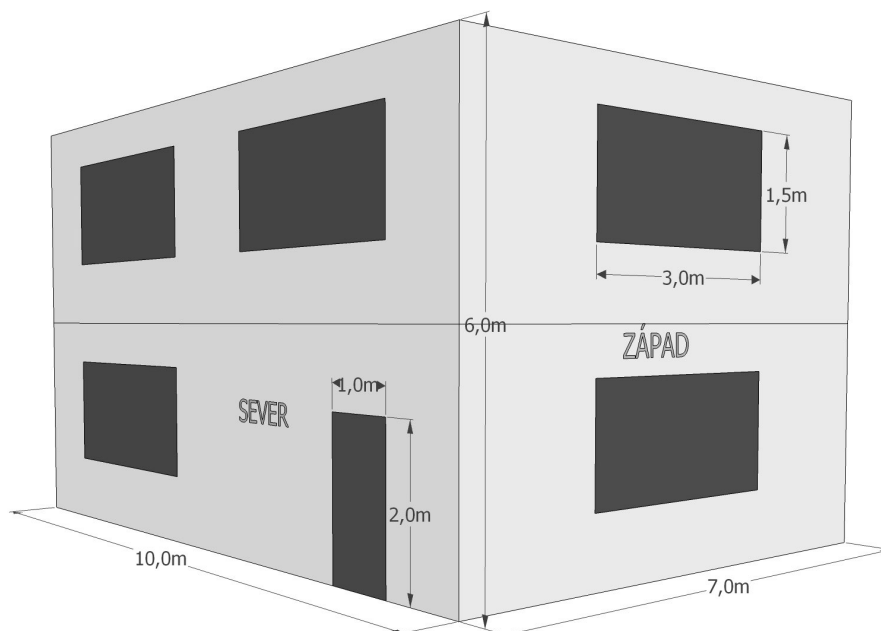
Ze souboru dat dá říci, že budovy po rekonstrukci dosahují o něco horší výsledky vzduchotěsnosti než novostavby. Nejvíce to ukazují minima souboru měření, kde novostavby dosahují lepší výsledky. Horší výsledky ve vzduchotěsnosti u rekonstrukcí mohou být způsobeny těžší možností dosažení kvalitního propojení hlavní vzduchotěsné vrstvy (HVV), kde je při rekonstrukci obtížnější se dostat do málo přístupných míst konstrukce budovy. U novostaveb to je naopak. Nad vzduchotěsností zamýšlí projektant během projektování a stavba je realizována tak, aby bylo dosaženo cílových hodnot intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa.

Nicméně, byly očekávány mnohem horší výsledky u budov po rekonstrukci, než je uvedeno výše. Dle mého názoru tento efekt může způsobovat, že budovy jsou součástí programu Nová zelená úsporám (NZÚ) pro instalaci rekuperace do stávajících rodinných domů, kde podmínkou pro získání podpory v tom to programu je dosažení průvzdušnosti obálky budovy $n_{50} \leq 2,5$ 1/h. Proto zde můžeme vidět, že hodnoty v grafu nepřesahují hodnoty 2,5 1/h. Požadavky na intenzitu výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa dle ČSN 73 0540 – 2 [11] na novostavby je 4,5 1/h až 1,0 1/h.

6. Výpočetní analýza vlivu vzduchotěsnoti na energetickou náročnost

V této kapitole představím tři výpočetní modely budov a následně jednoduchou výpočetní analýzu, kde bude se zkoumat vliv vzduchotěsnoti na energetickou náročnost budov, vypočtenou pomocí programu "Energie 2020 EDU". V analýze byla prozkoumána závislost celkové dodané energie na vytápění a intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Rodinný dům, který se využil ve výpočtech, má dle venkovních rozměrů objem 420 m³. Rozměry byly odhadnuty ze střední hodnoty vnitřního objemu ze všech dat v databázi. Střední hodnota databáze je 403 m³. Budova se nachází Praze. Jedná se o dvoupodlažní masivní konstrukci (masivní stěny i střecha), postavenou ze železobetonu s účinnou vnitřní tepelnou kapacitou konstrukce 260 kJ/m².K. Celkově energetickou vztahnou plochou bytu je 140 m². Dispozice oken a vchodové dveře:

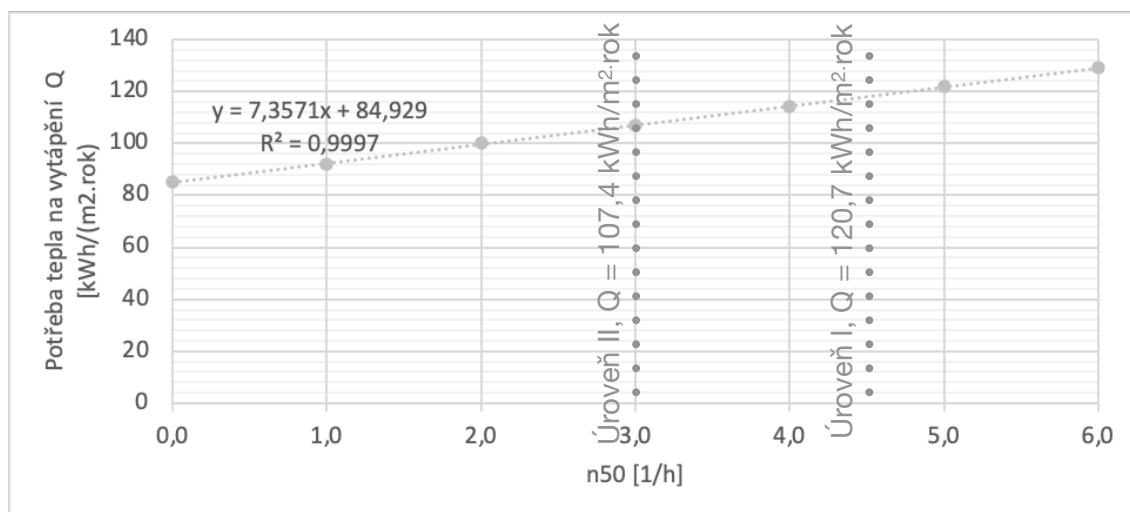
- okna 3 x 1,5 [m]: 3 ks - sever, 2 ks - západ, 4 ks - jih, 2 ks - východ;
- vchodové dveře 1 x 2 [m].



Obr. 6.1. Axonometrický pohled na navržený rodinný dům

6.1. Výpočetní analýza pro běžnou budovu s přirozeným větráním

Prvním objektem analýzy byl model s energetickou náročností běžné budovy a s přirozeným větráním. Budova byla vymodelována a navrhována tak, aby splňovala minimální požadavky dle nové vyhlášky MPO ČR č. 264/2020 Sb., §6 [10], která platí od 1.1.2022 (Tab. 6.1.1.). Úkolem bylo vytvořit nejhorší budovu z pohledu tepelné techniky a zároveň měla odpovídat novým požadavkům (průměrný součinitel prostupu tepla budovy a celková dodaná energie). Požadavek pro tuto budovu byl stanoven na průměrný součinitel prostupu tepla budovy 0,33 W/m·K, který byl splněn a kde vypočtená hodnota v modelu byla 0,33 W/m·K. Požadovaná celková dodaná energie byla rovna 147 kWh/m²·rok, tato hodnota byla také splněna pro uvažovaný model ve výši 133 kWh/m²·rok. Hodnoty byly spočítány s intenzitou výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa = 4,5 1/h a znázorněny v příloze B. Ve výpočtu byly použity parametry, které byly popsány výše a zároveň součinitel prostupu tepla konstrukce a vliv tepelných vazeb, které jsou uvedeny níže v tabulce (Tab. 6.1.2.).



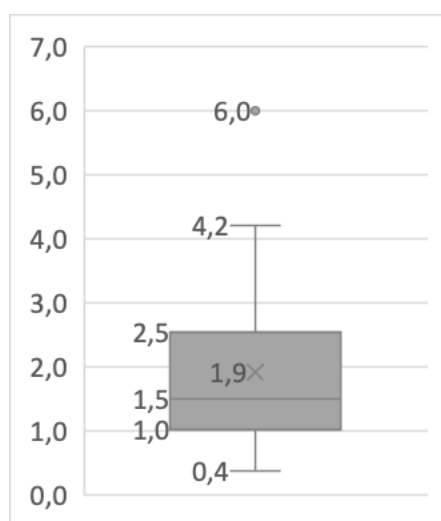
Graf 6.1.1. Závislost potřeby tepla na vytápění Q [kWh/m²·rok] na n₅₀ [1/h]

Název	Jednotka	Vypočtená hodnota	Referenční hodnota	Splněno
Průměrný součinitel prostupu tepla budovy	W/m·K	0,33	0,33	ANO
Celková dodaná energie	kWh/m ² ·rok	137	147	ANO

Tab. 6.1.1. Přehled plnění závazných požadavků vyhlášky MPO ČR č. 264/2020 Sb., §6

Název	Součinitel prostupu tepla konstrukce U [W/m.K]		
	Vypočtená hodnota	Požadavek ČSN 73 0540-2	Referenční hodnota
Stěny	0,231	0,30	0,21
Plochá střecha	0,207	0,24	0,17
Podlaha	0,318	0,45	0,32
Okna (Trojsklo)	0,900	1,50	1,05
Dvěře	1,200	1,70	1,12
Tepelné vyzby			
Vliv tepelných vazeb	0,02	-	0,014

Tab. 6.1.2. Obálka budovy



Graf 6.1.2. n_{50} pro běžné budovy s přirozeným větráním

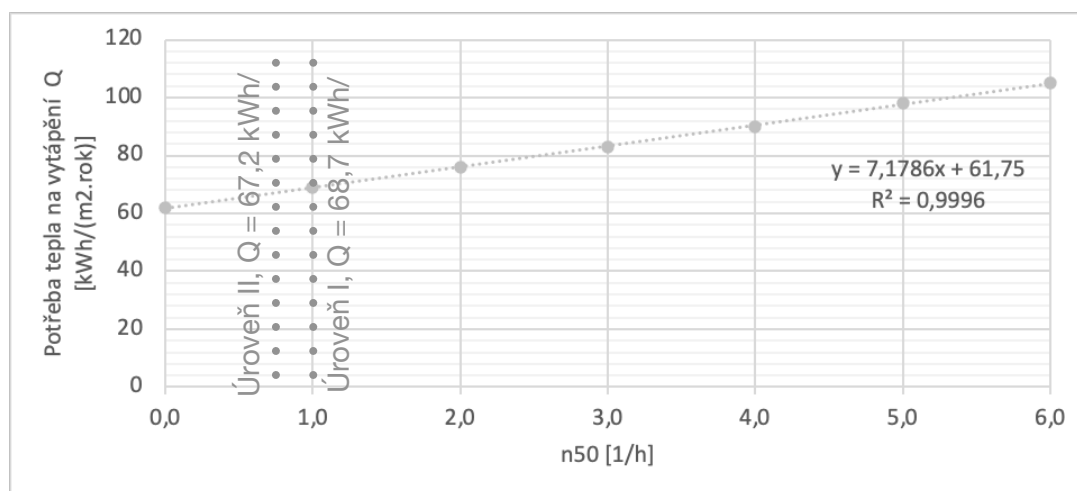
Graf 6.1.1. ukazuje závislost potřeby tepla na vytápění a intenzitě výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Z grafu je zřejmé, že čím menší vzduchotěsnost budovy, tím vyšší je tepelná ztráta, tj. je větší potřeba tepla na vytápění. Při přirozeném větrání budovy je doporučuje hodnota podle ČSN 73 0540-2 [11], která se doporučena splnit vždy (Úroveň I), je $n_{50} = 4,5$ 1/h a hodnota $n_{50} = 3,0$ 1/h se doporučuje splnit přednostně (Úroveň II). Při dosažení úrovně II z úrovně I je může snížit o 9,3 % (tj. 11,0 kWh/m²·rok)

potřeba tepla na vytápění.

Krabicový graf (*Graf 6.1.2.*) ukazuje výsledky pro běžné budovy s přirozeným větráním. Z grafu je zřejmé, že nejhorší výsledek je $n_{50} = 6,0$ 1/h. Při dosažení na doporučené hodnoty, tj. na úroveň I ($n_{50} = 4,5$ 1/h) z $n_{50} = 6,0$ 1/h by se mohla snížit potřeba na vytápění o 8,6 % (tj. 11,0 kWh/m².rok) a na úrovni II ($n_{50} = 3,0$ 1/h) mohla se by snížit potřeba tepla na vytápění až o 17,1 % (tj. 22,1 kWh/m².rok) potřeby tepla na vytápění. Při dosažení nejlepšího ($n_{50} = 0,4$ 1/h) z nejhoršího ($n_{50} = 6,0$ 1/h) výsledku z databáze se potřeba tepla na vytápění může snížit o 31,9 % (tj. 41,2 kWh/m².rok). 41,2 kWh/m².rok tepla stačí na vytápění dalších 3 pasivních domů.

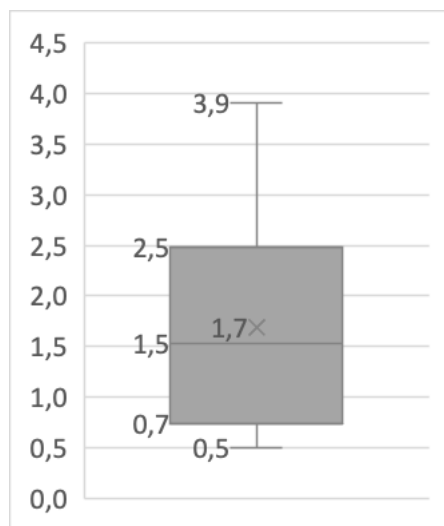
6.2. Výpočetní analýza pro běžnou budovu se ZZT

Druhým objektem analýzy byl model s energetickou náročností běžné budovy s nuceným rovnotlakým systémem větrání s využitím zpětného získávání tepla (ZZT). Tento výpočet se liší od předchozího (*Podkapitola 6.1.*) jen způsobem větrání, které ovlivňuje celková dodaná energie (89 kWh/m².rok). Mechanické větrání je perfektní řešení pro školy, administrativní budovy a tam, kde je potřeba chránit interiér před prachem, pylem a hlukem z vnějšího prostředí. Více informace o výsledcích výpočtu viz příloha C.



Graf 6.2.1. Závislost celkové dodané energie na vytápění Q [kWh/m².rok] na n_{50} [1/h]

V grafu (*Graf 6.3.1.*) se ukazuje závislost potřeby tepla na vytápění “Q” a intenzitě výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Při nuceném rovnotlakém



Graf 6.2.2. n_{50} pro běžné budovy se ZVT (107 dat)

systemu větrání s využitím zpětného získávání tepla je doporučená hodnota podle ČSN 73 0540-2 [11], která se doporučuje splnit vždy (Úroveň I), je $n_{50} = 1,0$ 1/h a hodnota $n_{50} = 0,8$ 1/h se doporučuje splnit přednostně (Úroveň II). Při dosažení úrovně II z úrovně I se může ušetřit 2,1 % (tj. 1,4 kWh/m²·rok) potřeby tepla na vytápění.

Krabicový graf (*Graf 6.2.2.*) ukazuje výsledky pro běžné budovy se ZVT. Z grafu je zřejmé, že nejhorší výsledek je $n_{50} = 3,9$ 1/h. Při dosažení na doporučenou hodnotu, tj. na úrovní I ($n_{50} = 1,0$ 1/h) z $n_{50} = 3,9$ 1/h by se mohla snížit o 23,2 % (tj. 20,8 kWh/m²·rok)

potřeba tepla na vytápění a na úrovni II ($n_{50} = 0,8$ 1/h) by se mohla snížit až o 24,8 % (tj. 22,3 kWh/m²·rok) potřeba tepla na vytápění. Při dosažení nejlepšího ($n_{50} = 0,5$ 1/h) z nejhoršího ($n_{50} = 3,9$ 1/h) výsledku z databáze se potřeba tepla na vytápění může snížit o 27,2 % (tj. 24,4 kWh/m²·rok). 24,4 kWh/m²·rok tepla stačí na vytápění další 2 pasivních domu.

6.3. Výpočetní analýza pro pasivní dům

Pro rodinný dům s energetickou náročností pasivního domu bylo vymodelováno a v budově navrženo rovnotlaké nucené větrání. Pro dosažení standardu pasivního domu musí budova splnit požadavky na měrnou potřebu tepla na vytápění a celkové dodané energie [6]. Měrná potřeba tepla na vytápění nesmí překročit 15 kWh/m²·rok, dle modelu je vypočtená hodnota 14 kWh/m²·rok, což splňuje požadavky na pasivní dům. Celková dodaná energie (topení, chlazení, teplá voda a elektřina) nesmí překročit 60 kWh/m²·rok. Dle modelu (Tab. 6.3.1.) je vypočtená hodnota 56 kWh/m²·rok, což taky splňuje požadavky na pasivní

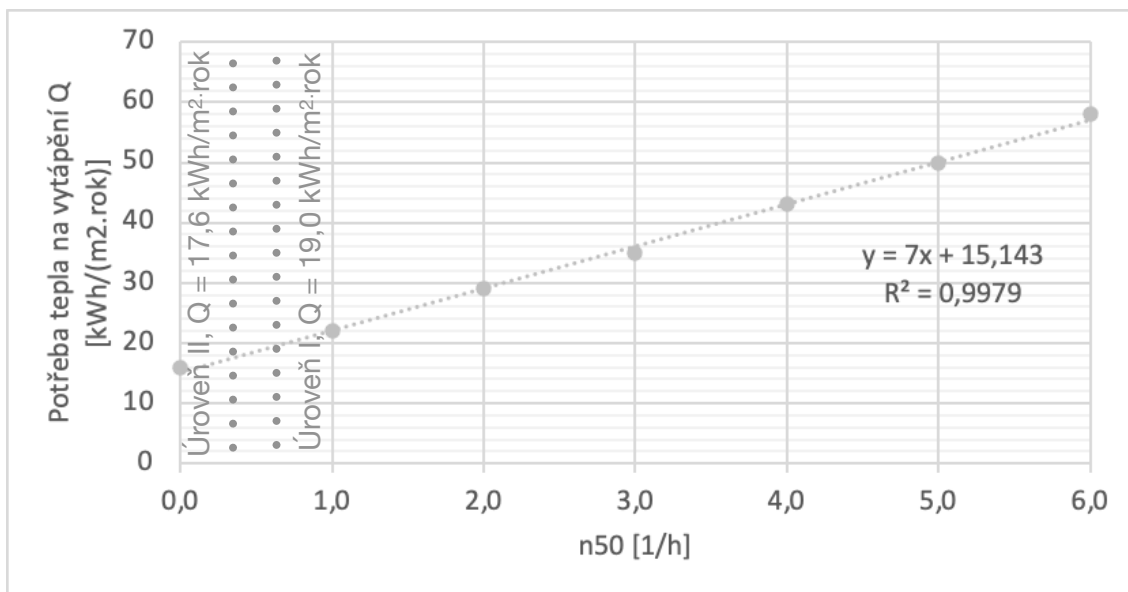
dům. Hodnoty byly spočítány s intenzitou výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. = 0,4 1/h a znázorněny v příloze D. V *tabulce 6.3.1.* je součinitel prostupu tepla konstrukce a vliv tepelných vazeb.

Název	Součinitel prostupu tepla konstrukce [W/m ² ·K]		
	Vypočtená hodnota	Požadavek ČSN 73 0540-2	Referenční hodnota
Stěny	0,112	0,30	0,21
Plochá střecha	0,086	0,24	0,17
Podlaha	0,134	0,45	0,30
Okna (Trojsklo)	0,700	1,50	0,32
Dveře	1,700	1,70	1,12
Tepelné vazby			
Vliv tepelných vazeb	0,005	-	0,014

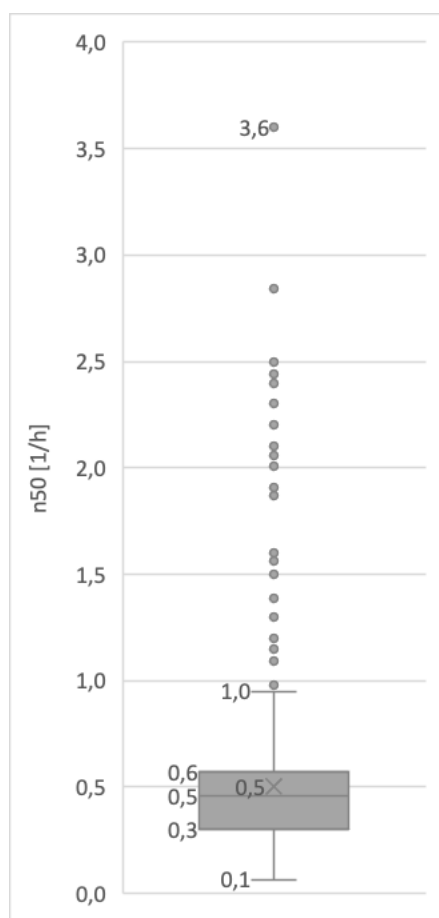
Tab. 6.3.1. Obálka budovy

Název	Jednotka	Vypočtená hodnota	Referenční hodnota	Splněno
Průměrný součinitel prostupu tepla budovy	W/m·K	0,20	0,33	ANO
Celková dodaná energie	kWh/m ² ·rok	56	147	ANO

Tab. 6.3.2. Přehled plnění závazných požadavků vyhlášky MPO ČR č. 264/2020 Sb., §6



Graf 6.3.1. Závislost celkové dodané energie na vytápění Q [kWh/m².rok] na n₅₀ [1/h]



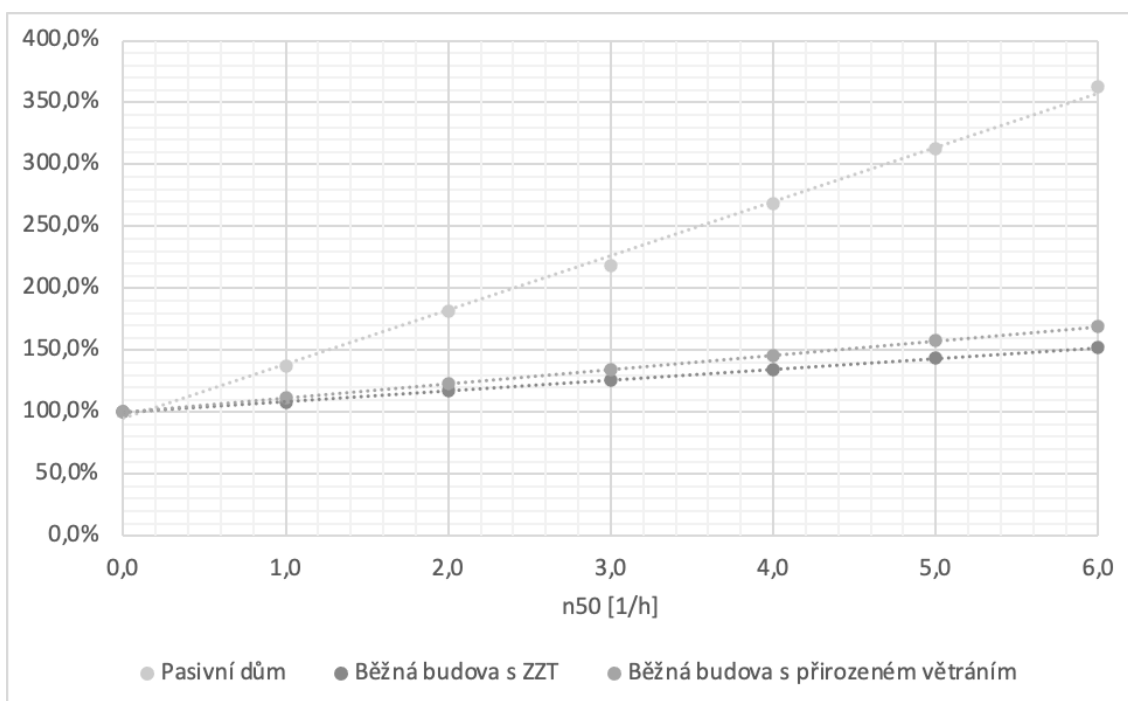
Graf 6.3.2. n₅₀ pro pasivní domy (601 dat)

V grafu (*Graf 6.3.1.*) je ukazuje závislost potřeby tepla na vytápění “Q” na intenzitě výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Při rovnotlakém nuceném větrání je doporučená hodnota podle ČSN 73 0540-2, která se doporučuje splnit vždy (Úroveň I), je n₅₀ = 0,6 1/h a hodnota n₅₀ = 0,4 1/h se doporučuje splnit přednostně (Úroveň II). Při dosažení úrovní II z úrovní I se může ušetřit 7,4 % (tj. 1,4 kWh/m².rok) potřeby tepla na vytápění.

Krabicový graf (*Graf 6.3.2.*) ukazuje výsledky pro pasivní domy. Z grafu je zřejmé, že nejhorší výsledek je n₅₀ = 3,6 1/h. Při dosažení doporučené hodnoty, tj. na úrovni I (n₅₀ = 0,6 1/h) z n₅₀ = 3,6 1/h by se mohla snížit o 52,9 % (tj. 21,3 kWh/m².rok) potřeby tepla na vytápění a na úrovni II (n₅₀ = 0,4 1/

h) by se mohla snížit až o 56,4 % (tj. 22,7 kWh/m²·rok) potřeba tepla na vytápění. Při dosažení nejlepšího výsledku ($n_{50} = 0,1$ 1/h) z nejhoršího ($n_{50} = 3,6$ 1/h) výsledku z databáze se potřeba tepla na vytápění může se snížit o 62,6 % (tj. 25,3 kWh/m²·rok). 25,3 kWh/m²·rok tepla stačí na vytápění dalších 1,7 pasivních domů.

6.4. Závěr kapitoly



Graf 6.4.1. Růst celkových dodaných energií na vytápění

V *grafu 6.4.1.* se znázorňuje chování potřeby tepla na vytápění při změně intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa, tj. 100 % reprezentuje potřebu tepla na vytápění při $n_{50} = 0$. Z grafu je zřejmé, že zvětšení o 50 % potřeby tepla na vytápění může způsobit u pasivního domu zhoršení hodnoty intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa o 1,3 1/h. V případě modelu s energetickou náročností běžné budovy s ZTZ o 4,35 1/h a u modelu s energetickou náročností běžné budovy s přirozeným větráním o 5,78 1/h.

Na základě výše uvedeného výsledku výpočetní analýzy se ukazuje, že čím je větší intenzita výměny vzduchu, tím je větší potřeba tepla na vytápění na metr

čtvereční. Hodnota se zvětšuje přibližně stejně pro všechny druhy energetické náročnosti, tzn., že nezáleží jak je dobrá obálka budovy z pohledu tepelné techniky. Pro úspornější budovy má vzduchotěsnost větší vliv z pohledu procentuálních hodnot.

7. Závěr

Práce se zabývala doplněním a analýzou databáze výsledků měření vzduchotěsnosti budov v České republice. Databáze obsahuje měření mezi lety 2012 a 2020. Obsahuje popis měřených budov, charakteristiky měření a podmínky měření, které byly získány od Asociace Blower Door CZ, která je dobrovolné profesní nepolitické sdružení osob v České republice, které se zabývá měřením vzduchotěsnosti budov. Výsledky měření v počtu 892 byly mnou zkontrolovány a následně zapsány do databází.

Během vyhodnocení databází bylo zjištěno, že poměry pasivních budov, rodinných domů a bytových domů nerepresentují náhodný výběr ze současného fondu budov v České republice. V databázi jsou nejvíce zastoupeny rodinné domy. Z hlediska energetické náročnosti dvě třetiny tvoří pasivní domy a zůstatek tvoří nízkoenergetické domy a běžné budovy. Databáze obsahuje jednu třetinu staveb po rekonstrukci, které jsou z většiny běžné budovy s rekuperací vzduchu. Dále se ukázalo, že 85 % budov splnilo zadané cílové hodnoty intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa.

První analýza zahrnovala zkoumání změn intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa u domů, které byly postaveny v České republice v letech 2012 až 2020. Výsledek analýzy byl negativní a neukázal žádný vývoj v kvalitě provedení vzduchotěsní obálky budov. Při zkoumání úspěšnosti dosažitelnosti cílových hodnot intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa se ukázalo, že existuje "silná" korelace, kde klesá poměr dosažených cílových hodnot. Dle mého názoru mohou být výsledky zkreslené, protože měření probíhalo jen za malé časové období a navíc tato měření byla selektována samotnými zkoušejícími techniky.

V druhé analýze byl zkoumán hlavní stavební materiál a jeho vliv na vzduchotěsnost obálky budovy. Zde byly zkoumány 3 skupiny (dřevostavby, masivní zděné budovy s dřevěnou střechou a masivní zděné budovy s masivní střechou). Ostatní hlavní stavební materiály na bázi betonu v analýze nebyly podrobně prozkoumány z důvodu malého počtu výsledků měření v databázi.

Avšak i malý soubor dat v nich ukazoval menší rozptyl, než u ostatních druhů materiálu. Při zkoumání dřevostaveb se ukázaly o něco lepší výsledky než u masivních zděných staveb. Dřevostavby mají nižší medián (2. kvantil) a při zkoumání pasivních dřevostaveb se ukázal menší rozptyl mezi prvním a třetím kvantilem než u ostatních budov. Dle mého názoru je to jeden z důvodů, proč je podíl dřevostaveb v České republice tak malý. Projekce a realizace mají velice dobré zkušenosti s montáží HVV. Zároveň se ví o velkém riziku vzniku netěsnosti v obálce dřevostaveb, proto se tyto objekty mnohem pečlivěji projektují a realizují oproti masivním stavbám, kde je riziko vzniku netěsnosti mnohem nižší. V případě Francie, se ukázalo že dřevostavby jsou podle jejich analýzy o něco méně vzduchotěsné, než stavby betonové a zděné, rozdíl je však nízký. Nicméně, podle autora ve Francii chybí zkušenosti s dřevěnými stavbami, které mohou vést k nesprávné montáži HVV, což vysvětluje výsledky pro dřevostavby ve francouzské analýze [2]. Zároveň ve Francii je měření vzduchotěsnosti povinné pro všechny druhy budov, které se musí následně odevzdávat do státních databází. Na rozdíl od České republiky, kde tato povinnost neexistuje, se měření většinou provádí pouze pro splnění podmínek programu NZÚ, kde musí být splněna cílová hodnota intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Proto výsledky můžou být zkreslené v České republice. Dále bylo zjištěno, že kvalita vzduchotěsní obálky závisí na hlavní vzduchotěsní vrstvě HVV. Ukázalo se, že desky na bázi dřeva dosahují lepších výsledků než fólie. Dle mého názoru je to způsobeno díky její tuhosti, která usnadňuje vytvoření kvalitních těsnících spojů mezi deskami a zároveň fólie mají větší pravděpodobnost poškození během výstavby. Nejhorší výsledky, tj. největší rozptyl v souboru ukazují masivní zděné stavby s dřevěnou střechou. Jeden z důvodů dle mého názoru může být, že je problém v propojení HVV u svislé nosné konstrukce s dřevěnou konstrukcí, pokud nebude dodržena dostatečná opatrnost a pozornost při realizaci stavby.

V třetí analýze byla zkoumána korelace mezi vnitřním objemem a intenzitou výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa, kde nebyla objevena žádná závislost. Nicméně, výsledek analýzy by mohl být dle mého názoru jiný - z důvodů chybějících výsledků měření v databázi budov s velkým vnitřním

objemem. Dle mého názoru je tento předpoklad lepší zkoumat z pohledu měrné průvzdušnosti obálky než dle intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa, kde poměr plochy budov ku objemu vzduchu uvnitř budov je mimořádně nevýhodný. Bohužel tohle bylo nad rámec této bakalářské práce.

V poslední analýze bylo ověřování předpokladu, že budovy po rekonstrukci mají menší pravděpodobnost dosažení nízkých hodnot (minimálních hodnot) intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa než novostavby. Analýza výsledků ukázala, že budovy po rekonstrukci dosahují o něco horší výsledky vzduchotěsnosti než novostavby. Nejvíc to ukazují minima souboru měření, kde novostavby dosahují lepších výsledků. Horší výsledky vzduchotěsnosti u rekonstrukcí mohou být způsobeny tím, že je mnohem těžší dosáhnout kvalitní ho propojení hlavní vzduchotěsné vrstvy (HVV), protože je někdy obtížné se dostat do málo přístupných míst konstrukce budovy. U novostaveb to je naopak, nad vzduchotěsností se projektant zamýšlí už během projektování a vše je realizováno tak, aby bylo dosaženo cílových hodnot intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Mohli bychom očekávat mnohem horší výsledky u budov po rekonstrukci než jsou ukázány výše. Dle mého názoru tento efekt může způsobit, že rekonstruované budovy budou splňovat podmínky programu Nová zelená úsporám (NZÚ) pro instalaci rekuperace do stávajících rodinných domů. Podmínkou pro získání podpory v tom programu je dosažení průvzdušnosti obálky budovy $n_{50} \leq 2,5$ 1/h. Proto můžeme vidět, že hodnoty v grafu nepřesahují hodnoty 2,5 1/h.

V závěru této práce byla provedena jednoduchá analýza vlivu vzduchotěsnoti na energetickou náročnost budov. Byly vymodelovány 3 typy rodinných domů se stejnými prostorovými parametry, s odlišnou v energetickou náročností (běžná budova, pasivní dům) a různými způsoby větrání (přirozené, mechanické s rekuperací). Z výpočtu se ukázalo, že kvůli podobným prostorovým parametrům změna potřeby tepla je téměř podobný pro rustu hodnoty vzduchotěsnoti pro každý model. Díky násobně nižšímu průměrnému součiniteli prostupu tepla budovou u pasivního domu než u běžné budovy z pohledu energetické náročnosti, potřeba tepla na vytápění roste násobně

rychleji při růstu hodnoty intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Toto chování může způsobit u pasivních domů dvoj až trojnásobnou potřebu tepla na vytápění při špatném projektovém návrhu.

V pokračování v rámci tohoto tématu mohlo by provést analýzu vzduchotěsnosti vnitřního objemu, hlavního stavebního materiálů, materiálů pro hlavní vzduchotěsnicí vrstvy u staveb na základě měrné průvzdušnosti obálkou. Těto předpoklad zajímavý díky tomu že tato hodnota vztahuje na plochu obálky a může líp prokazovat kvalitu zpracování obálky z pohledu vzduchotěsnosti. Oproti od intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa, která se vztahuje na objem a zvýšení objemu budovy může tento analýzu zkreslovat.

8. Slovník značek a definic

Znáčka	Veličina	Jednotka
n_{50}	intenzita výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa	1/h
q_{50} (dřív V_{50})	objemový tok vzduchu	m^3/h
V	vnitřní objem budovy	m^3
A_E	plocha obálky budovy	m^2
q_{E50}	měrná průvzdušnost obálkou	$m^3/(m^2 \cdot h)$
q_{F50}	měrná průvzdušnost podlahou	$m^3/(m^2 \cdot h)$
ELA_4	ekvivalentní plocha netěsnosti	m^2
ELA_{10}	ekvivalentní plocha netěsnosti	m^2

Hlavní vzduchotěsnicí vrstva (HVV):

Vrstva, která brání volnému proudění vzduchu mezi interiérem a exteriérem skrz obálku budovy.

System vzduchotěsnících opatření (SVO):

Souhrn všech jednotlivých vzduchotěsnících opatření navržených a realizovaných za účelem dosažení cílové úrovně vzduchotěsnosti obálky budovy.

Obálka budovy:

Tvořená konstrukcemi, které oddělují vnitřní prostředí budovy od vnějšího prostředí.

Nová zelená úsporám (NZÚ):

Dotační program Nová zelená úsporám (NZÚ) se zaměřuje se na podporu energeticky úsporných opatření v rodinných a bytových domech – od zateplení přes obnovitelné zdroje energie až po pasivní výstavbu.

9. Seznam použité literatury

1. NOVÁK, J., Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov, 2008
2. MÉLOIS, A. B., MOUJALLED, B., GUYOT, G., LEPRINCE, V. Improving building envelope knowledge from analysis of 219,000 certified T on-site air leakage measurements in France, 2019
3. DORER, V., Airtightness of buildings, 2004
4. CHAN, W. R., CARRIÉ, F. R., NOVÁK, J., LITVAK, A., RICHERI, F., SOLCHER, O., PAN, W., EMMERICH, S., Building air leakage databases in energy conservation policies: analysis of selected initiatives in 4 European countries and the USA, 2012
5. Počet nových pasivních domů v Česku loni vzrostl zhruba o třetinu [online], Brno: ČTK, 2021 [cit. 2022-05-13], Dostupné z: <https://www.pasivnidomy.cz/pocet-novych-pasivnich-domu-v-cesku-loni-vzrostl-zhruba-o-tretinu/t4861>
6. Qualitätsanforderungen an Passivhäuser [online]. Darmstadt: Passivhaus Institut [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: https://passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm
7. TAYLOR, R. J., An introduction to error analysis, 1997
8. EVANS, J. D., Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences, 1996
9. BOHM, M., BERÁNKOVÁ, J., BRICH, J., POLÁŠEK, M. SRBA, J. NĚMCOVÁ, D., ČERNÝ, R., Factors influencing envelope airtightness of lightweight timber-frame houses built in the Czech Republic in the period of 2006–2019, 2021
10. Vyhláška č. 264/2020 Sb., o energetické náročnosti budov, 2020
11. ČSN 73 0540-2 (730540) Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky, 2011
12. Asociace Blower Door CZ [online]. Rakovník [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.asociaceblowerdoor.cz>