

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta stavební

Katedra pozemního stavitelství



Doktorská disertační práce

Determinační faktory vzduchotěsnosti energeticky efektivních budov

The Determinative Factors of Airtightness of Energy Efficient Buildings

Studijní program:

P 3607 Stavební inženýrství

Studijní obor:

3607V025 Teorie konstrukcí

Student:

Ing. Michal Kraus

Školitel:

prof. Ing. Darja Kubečková, Ph.D.

Ostrava 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou doktorskou disertační práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením školitelky doktorského studia a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 05. 09. 2014

.....

Ing. Michal Kraus

„Nikdo na světě nemá víc nepřátel než upřímný, hrdý a cituplný muž, který bere osoby a věci tak, jak jsou, a ne, jaké by chtěly být.“

Sébastien-Roch Nicolas de Chamfort

Poděkování

V úvodu své disertační práce bych rád poděkoval své školitelce, prof. Ing. Darji Kubečkové, Ph.D. za její vedení v průběhu studia, konzultace, cenné připomínky a především čas, který mi věnovala při četných diskuzích nejen nad tématem mé doktorské disertační práce.

Mé poděkování za technickou a finanční podporu patří taktéž Fakultě stavební VŠB – Technické univerzity Ostrava, v rámci jejichž projektů OP VK CZ.1.07/2.3.00 /20.0013 a SGS SP2012/31, SP2013/27 a SP2014/18 je tato disertační práce vypracována.

Motto v úvodu je poděkováním mým přátelům, kolegům, mé rodině a všem, kteří mi věnovali pochopení, povzbuzení a odvalu začít ...

Anotace

Předmětem doktorské disertační práce je deskripce a analýza determinačních faktorů vzduchotěsnosti obálky energeticky efektivních budov. Vzduchotěsnost je spolu s ostatními faktory jako je součinitel prostupu tepla, měrná potřeba tepla na vytápění a měrná potřeba primární energie základními faktory, dle nichž je možné hodnotit energetický výkon budovy. Vyjma nižší energetické náročnosti minimalizuje kvalitně provedená vzduchotěsná obálka budovy riziko poškození konstrukce související se šířením tepla a vodní páry v konstrukci. Cílem je definovat a především analyzovat rozhodující faktory ovlivňující vzduchotěsnost budov pomocí analytických a statistických metod. Odvozeným příčinám je nutno věnovat zvýšenou pozornost v celém procesu vzduchotěsnosti obálky budovy. Důsledně provedenou analýzou jsou získány informace a doporučení pro zvýšení kvality a omezení chybovosti.

Klíčová slova

Energeticky efektivní budovy, vzduchotěsnost, průvzdušnost obálky budovy, energetická náročnost.

Abstract

The subject of the doctoral dissertation thesis is a description and analysis of the determinative factors affecting the airtightness of energy-efficient buildings. Airtightness along with other factors such as heat transfer coefficient, the mean heat transfer coefficient, specific heat for heating and the specific primary energy consumption are the basic factors for the evaluation of the energy performance of buildings. The quality of airtight building envelope except for low energy consumption also minimizes the risk of damage to the structure associated with the spread of the heat and water vapor in the structure. The objective is to define and analyze relevant factors influencing the airtightness of buildings using analytical and statistical methods. It is necessary to pay attention to the derivative factors in whole process of building of airtightness. Carefully and thoroughly conducted analysis provides information and recommendations for improving the quality and limitations of error

Key words

Energy efficient buildings, airtightness, air permeability, energy performance.

Obsah

1	Úvod.....	8
2	Obsah a cíle disertační práce.....	9
3	Metody zpracování disertační práce.....	10
4	Energeticky efektivní výstavba.....	12
4.1	Principy trvale udržitelného rozvoje.....	12
4.2	Energetická náročnost budov a související legislativa.....	14
4.3	Energeticky efektivní výstavba.....	16
5	Vzduchotěsnost obvodového pláště budov.....	19
5.1	Fyzikální souvislosti vzduchotěsnosti.....	19
5.2	Tlaková diference.....	20
5.2.1	Tlaková diference vyvolaná rozdílem teplot.....	21
5.2.2	Tlaková diference vyvolaná účinky větru.....	22
5.2.3	Tlaková diference vyvolaná větracím zařízením.....	23
5.3	Hodnocení vzduchotěsnosti obvodového pláště budov.....	23
5.3.1	Referenční tlaková diference.....	24
5.3.2	Celková intenzita výměny vzduchu.....	24
5.3.1	Vzduchová propustnost.....	24
5.3.2	Ostatní hodnotící veličiny.....	25
5.3.3	Přepočet hodnotících veličin.....	25
5.4	Měření a kontrola vzduchotěsnosti obálky budovy.....	26
5.4.1	Metoda tlakového spádu – Blower Door Test.....	26
5.4.2	Vývoj a historie Blower Door Testu.....	27
5.4.3	Aparatura a příslušenství Blower Door Test.....	28
5.4.4	Princip a postup měření průvzdušnosti metodou Blower Door Test.....	29
5.4.5	Vyhodnocení měření a výsledky.....	30
5.5	Požadavky na vzduchotěsnost a šíření vzduchu konstrukcí a budovou.....	32
5.5.1	Průvzdušnost spár lehkých obvodových plášťů.....	32
5.5.2	Průvzdušnost spár a netěsností ostatních konstrukcí obálky budovy.....	32
5.5.3	Celková průvzdušnost obálky budovy.....	33
5.5.4	Průvzdušnost místnosti s nuceným větráním nebo klimatizací.....	33
5.5.5	Intenzita větrání nevyužívané a užívané místnosti.....	34
5.5.6	Zpětné získávání tepla při nuceném větrání.....	34
5.6	Komparace výsledků vzduchotěsnosti obálky budovy.....	35
5.6.1	Význam vzduchotěsnosti v kontextu energetické bilance budovy.....	37
6	Proces návrhu, realizace a kontroly vzduchotěsnosti budov.....	39
7	SWOT analýza významu vzduchotěsnosti obálky budovy.....	40

7.1	Princip analýzy a matice SWOT	40
7.2	Aplikace SWOT analýzy	41
8	Determinace faktorů vzduchotěsnosti budov	43
8.1	Výzkum vzduchotěsnosti obálky budovy u nás a v zahraničí	43
8.2	Diagram příčin a následků	46
	8.2.1 Princip Ishikawova diagramu	46
	8.2.2 Analýza příčiny a následků nedostatečné vzduchotěsnosti obálky budovy	47
8.3	Vyhodnocení diagramu příčin a následků	49
	8.3.1 Paretova analýza	49
9	Sběr a zdroje dat	53
10	Základy statistických metod a testování hypotéz	55
10.1	Klasifikace determinovaných proměnných	56
10.2	Exploratorní statistika	58
10.3	Interferenční statistika	60
	10.3.1 Ověření normality výběru	62
	10.3.2 Ověření homoskedasticity	63
	10.3.3 Kruskal – Wallisův test	63
	10.3.4 Korelační analýza	64
	10.3.5 Spearmanův koeficient pořadové korelace	65
	10.3.6 Spearmanův test nezávislosti	65
	10.3.7 Koeficient determinace	66
11	Exploratorní analýza vzduchotěsnosti obálky budov	67
12	Statistická verifikace determinačních faktorů	71
12.1	Lokalita, nadmořská výška a větrná oblast	72
	12.1.1 Expozice objektu	72
	12.1.2 Geografická poloha	73
	12.1.3 Nadmořská výška	74
	12.1.4 Větrné oblasti	76
12.2	Konstrukční charakteristika a typ budovy	79
	12.2.1 Lehké konstrukce	79
	12.2.2 Masivní konstrukce	80
	12.2.3 Kombinovaná konstrukce	81
12.3	Stavební materiál svislých nosných konstrukcí	85
12.4	Materiál hlavní vzduchotěsné vrstvy	89
12.5	Komínové těleso	93
12.6	Realizace a kvalita provedení energeticky pasivních budov	95
12.7	Podlažnost objektu	98
12.8	Tvarové řešení budovy	100

12.9	Ukazatele velikosti objektu	103
12.10	Vývojové trendy vzduchotěsnosti - rok výstavby objektu	107
12.11	Statistická verifikace významnosti vzduchotěsnosti budov	111
13	Výsledky disertační práce s uvedením nových poznatků	113
14	Konkrétní závěry pro další rozvoj vědního oboru.....	115
15	Summary	117
16	Zdroje a použitá literatura	118
17	Seznam vlastních publikací autora.....	122
17.1	Publikace evidované v databázi SCOPUS (Conference Paper)	122
17.2	Publikace v českém recenzovaném časopise.....	123
17.3	Další nehodnocené publikace	123
18	Seznam obrázků	125
19	Seznam tabulek	126
20	Seznam grafů.....	127
21	Seznam zkratk	128
22	Profesní životopis.....	129
23	Seznam příloh.....	131



1 Úvod

Současné trendy stavební praxe se zaměřují především na snižování energetické náročnosti, omezení produkce emisí skleníkových plynů a na úsporu neobnovitelných zdrojů v souladu s principy trvale udržitelného rozvoje. Stavební sektor se neustále rozrůstá, což má za následek neustálou gradaci spotřeby energie. V současnosti sektor budov zaujímá více než 40% podíl na spotřebě energie a 36% podíl na produkci emisí skleníkových plynů v zemích Evropské Unie. [11]

V souladu s energetickými standardy a principy trvale udržitelné výstavby je nutné přijmout opatření vedoucí ke snížení energetické závislosti a poklesu emisí oxidu uhličitého. Revidovaná Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU o energetické náročnosti budov z 19. května 2010 (EPBD II) [1] je základním legislativním dokumentem stanovující rámec povinností vedoucí ke snížení spotřeby energií. Racionální a uvážlivé využívání energie z neobnovitelných zdrojů, které jsou v přítomnosti hlavním zdrojem energie, v kombinaci s využitím alternativních přírodních zdrojů představuje možnosti značného snížení potřeby energie a zachování energetických zdrojů pro následující generace dle principů trvale udržitelného rozvoje. [11]

Součástí implementace požadavků do národních předpisů je značná pozornost věnována také vzduchotěsnosti obálky budov. Vzduchotěsnost budovy je velmi aktuálním a diskutovaným tématem. Mezi další faktory ovlivňující energetický výkon budovy patří kromě vzduchotěsnosti součinitel prostupu tepla, měrná potřeba tepla na vytápění a měrná potřeba primární energie.

Vzduchotěsnost, schopnost obálky budovy nepropouštět vzduch, je jedním ze základních předpokladů energeticky efektivní výstavby vedoucí ke snížení energetické náročnosti. Za předpokladu nedostatečně těsné obálky budovy dochází povětšinou roku k úniku tepla z interiéru do exteriéru skrze netěsnosti, trhliny a spáry, což značně zvyšuje tepelné ztráty prostupem, které se negativně odrážejí na celkové energetické bilanci budov.

Kromě zvýšené energetické náročnosti také hrozí riziko poškození a degradace konstrukce. Vnitřní vlhký vzduch vlivem tlakové diference proniká z interiéru skrz netěsnosti a spárami do konstrukce pláště budovy, což může vést ke kondenzaci vodní páry a vzniku plísní. Dokonale vzduchotěsná obálka budov je charakteristická absencí větracích spár a netěsností obvodového pláště.



2 Obsah a cíle disertační práce

S ohledem na současný trend snižování energetické náročnosti budov je důležité definovat a vymežit klíčové faktory, které z hlediska vzduchotěsnosti obálky budovy ovlivňují její energetickou bilanci. Snižování spotřeby energií nejenže vede k individuálním úsporám jednotlivců, ale také přináší celospolečenskou pozitivní externalitu v podobě podpory principů trvale udržitelného rozvoje.

Hlavním cílem doktorské disertační práce je definovat a především diagnostikovat dosavadní vývoj v oblasti vzduchotěsnosti staveb pomocí statistických metod a analytických nástrojů řízení kvality. Cílem disertační práce je pomocí vhodných statistických nástrojů řízení kvality a výpočtového aparátu vyvodit závěry, závislosti, definice slabých a silných míst procesu, jejich příčiny a důsledky v oblasti měření vzduchotěsnosti staveb.

Kvalita a profesionální přístup je nutný nejen u provádění samotné vzduchotěsné vrstvy, ale také již při jejím plánování a navrhování. Vzduchotěsná obálka budovy je definována nejen schopností použitých materiálů propouštět vzduch, ale především kvalitně provedenými kritickými místy jako jsou styky a napojení jednotlivých konstrukcí, zejména styk svislé nosné a střešní konstrukce a dále napojení základů, podlahy a svislé nosné konstrukce. Dalšími kritickými místy jsou styky konstrukcí se stavebními otvory, jako jsou okna a dveře a prostupy vedení technického zařízení budov, např. kanalizace a vzduchotechnika. [13]

V disertační práci jsou testovány a analyzovány parametry budovy (např. lokalita, konstrukční systém, stavební materiály, zastavěná plocha, užitná plocha, obestavěný prostor, vytápěný prostor, ochlazovaná obálka budovy a objemový faktor budovy A/V), které jsou stanoveny na základě vstupní analýzy problematiky vzduchové neprůzvučnosti obvodového pláště. Neméně důležitou částí práce je ověření statisticky významného vlivu parametrů na vzduchotěsnost obálky budovy. Datová základna doktorské disertační práce vychází zejména ze sekundárních zdrojů, získaných z volně dostupných, ovšem relevantních databází (FAST VŠB – TUO, Centrum pasivních domů [5]).

Přínos disertační práce spočívá v komplexním zmapování procesu, a to od návrhu až po konečné testování vzduchotěsnosti obálky budovy. Přičemž jsou definována zejména úzká místa procesu, kterým je zapotřebí věnovat zvýšenou pozornost. Zároveň jsou zjišťovány i ty kroky procesu, které sice mají významný vliv na energetickou náročnost samotné výstavby, ovšem v konečném důsledku neovlivní vzduchotěsnost objektu.



3 Metody zpracování disertační práce

Disertační práce je vypracována a členěna v souladu s adjustovaným metodickým postupem Seven Step Solving Problem (SSSP), který ve značné míře využívá statistické nástroje a kvalitativní metody řízení kvality. Metoda SSSP vede k optimálnímu a efektivnímu vyřešení problémů s cílem dosažení lepších výsledků. Adjustace metody spočívá v eliminaci posledních tří kroků metodologického postupu, jelikož tyto části není možné zpracovat v časovém horizontu zpracování disertační práce, neboť vyžadují dlouhodobé sledování procesu a navržených změn. I přes tuto úpravu lze metodologický postup považovat za velmi přínosný v oblasti teoretického a praktického zkoumání vzduchotěsnosti budov.

Finální adjustovaná metodologie SSSP, respektive FSSP (Four Step Solving Problem) se skládá ze čtyř kontinuálních částí, které reflektují řešení disertační práce:

1. **Problem** – Definování problému,
2. **Data** – Sběr a analýza dat,
3. **Cause** – Diagnostika příčin,
4. **Solution** – Vyhodnocení a implementace řešení.

První část metodologie (FSSP) se zabývá samotným definováním zkoumaného problému, zároveň se stanovují klíčové parametry očekávaného zlepšení procesu v přímé návaznosti na řešenou problematiku vzduchotěsnosti energeticky efektivních budov. V úvodních kapitolách disertační práce je věnována pozornost teoretickým východiskům a základní charakteristice problému, konkrétně trvale udržitelnému rozvoji, deskripci energeticky efektivní výstavby dle současných standardů a jejich vlivem na energetický výkon budov.

Ve druhé části se přistupuje ke sběru a analýze dat, přičemž dochází k exploratorní diagnostice dat a následně k ověření statistické významnosti datové základny. Pro účely disertační práce se počítá s využitím sekundárních dat. Pro zvýšení validity a reliability dat výběrového souboru je výběrový soubor doplněn o měření energeticky efektivních domů prováděných kolektivem techniků Fakulty stavební, VŠB – TU Ostrava.

Třetí část postupu se zaměřuje na analýzu a diagnostiku příčin řešeného problému, přičemž se plánuje využití základních statistických a kvalitativních nástrojů řízení kvality. Součástí je také aplikace SWOT analýzy, Ishikawa diagramu a Paretovy analýzy. Vyhodnocení



Ishikawa diagramu Paretovou analýzou umožní definovat příčiny, které negativně ovlivňují vzduchotěsnost obálky budovy. Předpokládá se statistické testování hypotéz parametrickými i neparametrickými testy v závislosti na verifikaci normálního rozložení a homoskedasticity dat, například jedno-faktorová analýza rozptylu (ANOVA), Kruskal-Wallisův test, Spearmanova pořadová korelace, apod.

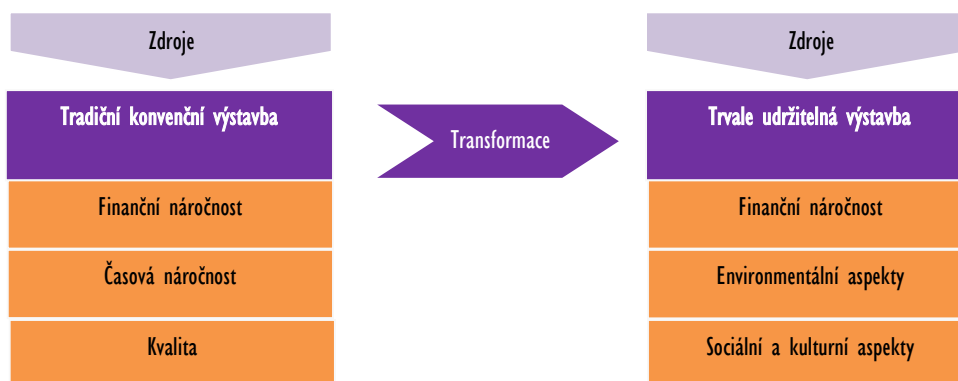
Poslední čtvrtá část postupu přistupuje k vyhodnocení a implementaci zjištěných výstupů. Odvozeným příčinám je nutno věnovat zvýšenou pozornost v celém procesu vzduchotěsnosti obálky budovy (od samotného návrhu až po uvedení do provozu a konečné kontroly). Pečlivě a důsledně provedenou analýzou jsou získány informace a doporučení pro zvýšení kvality a omezení chybovosti.

4 Energeticky efektivní výstavba

Jak již bylo zmíněno v úvodu, stavební sektor se významnou měrou podílí na spotřebě energií a neobnovitelných energetických zdrojů. Sektor budov je také jedním z hlavních zdrojů znečištění životního prostředí a producentem emisí skleníkových plynů. Při tradiční konvenční výstavbě jsou kladeny požadavky především na časovou náročnost, finanční náročnost a kvalitu provedení. Principy trvale udržitelného rozvoje reagují na tyto aspekty a zároveň stanovují nová kritéria pro výstavbu, údržbu a provoz budov. [12]

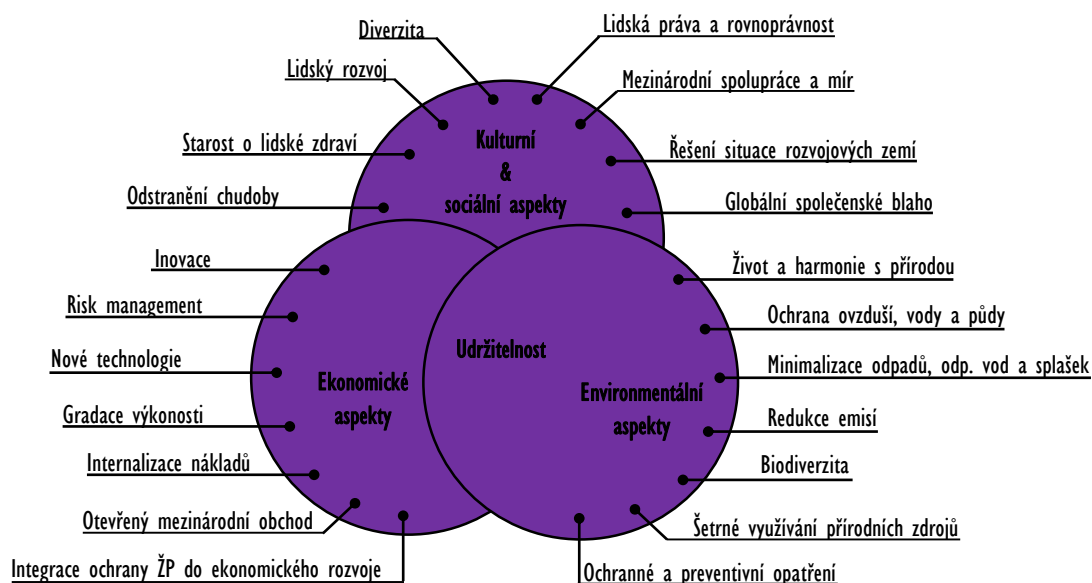
4.1 Principy trvale udržitelného rozvoje

Kritéria trvale udržitelného rozvoje lze rozdělit do tří skupin: ekologické aspekty, finanční náročnost a kulturně - sociální aspekty. Tyto tři skupiny kritérií tvoří základní pilíře udržitelného rozvoje. Kritéria a úroveň požadavků udržitelného rozvoje jsou stanoveny na základě uspokojení potřeb současné generace, aniž by byly ohroženy potřeby budoucích generací. Samozřejmě nesmí být ohroženy potřeby ostatních národů. Obr. č. 1 znázorňuje transformační proces tradiční konvenční výstavby dle principů a požadavků trvale udržitelného rozvoje. [12]



Obr. č. 1: Transformační proces konvenční výstavby na trvale udržitelnou výstavbu [12]

V souladu se třemi pilíři udržitelného rozvoje jsou stanoveny hlavní cíle a úkoly trvale udržitelné výstavby. Jednotlivé pilíře udržitelného rozvoje jsou navzájem úzce spjaty a závislé mezi sebou. Mezi hlavní cíle patří především snížení dopadu na životní prostředí, tzv. environmentální aspekty. Jejich úkolem je zvýšení energetické účinnosti výstavby a provozu v celém životním cyklu budovy. Zvýšení energetické účinnosti zahrnuje opatření na úsporu energií, snížení spotřeby neobnovitelných zdrojů, zvýšení podílu energií z obnovitelných zdrojů, recyklaci a opětovné využívání stavebního odpadu. [12]



Obr. č. 2: Základní aspekty trvale udržitelného rozvoje, vlastní zpracování na základě dat [29]

Snížení spotřeby energie a produkce emisí skleníkových plynů je také jedním z cílů směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov [1] (EPBD II přepracované znění). Je rovněž nezbytné, aby v procesu udržitelné výstavby byla efektivně využívána půda, což zahrnuje požadavky na revitalizaci brownfields a sanaci stávajících budov. Efektivní využívání materiálových zdrojů zahrnuje regulaci neobnovitelných přírodních zdrojů, zvýšení podílu využití obnovitelných zdrojů, včetně recyklace a znovu využití recyklovaných dosavadních stavebních materiálů. [12]

S environmentálními cíli jsou velmi úzce spjaty ekonomická kritéria. Cílem je optimalizovat a minimalizovat rostoucí náklady na realizaci a provoz s ohledem na minimální environmentální impakt. Také je nutné věnovat patřičnou pozornost podpoře lokální ekonomiky a politice zaměstnanosti. Kulturní a sociální aspekty jsou zaměřeny především na kvalitu vnitřního a vnějšího prostředí a jejich bezpečnost. Mimo jiné je také cílem zachovat kulturní dědictví a zachovat historické či technické památky pro následující generace. [12]

Globální orientace a plnění cílů trvale udržitelného rozvoje je nesmírně náročný a revoluční proces vedoucí k zásadně odlišným principům a formám současné industriální civilizace. Plnění jednotlivých aspektů trvale udržitelného rozvoje (Obr. č. 2) vede k dlouhodobé sociálně-kulturní, ekonomické a ekologické rovnováze. Základními faktory vedoucí k úspěšnému procesu trvale udržitelného rozvoje jsou inovace, nové technologie a informace. [29]



4.2 Energetická náročnost budov a související legislativa

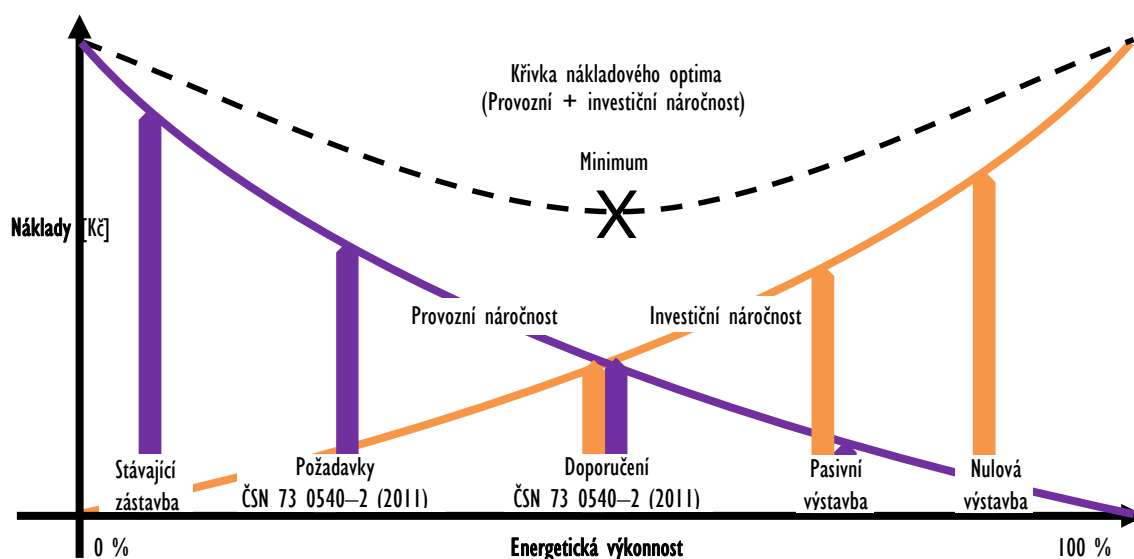
Na základě schválené revize Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/31/EU o energetické náročnosti budov z 19. května 2010 (EPBD II) mají členské státy Evropské Unie povinnost přijmout taková opatření, která povedou ke snížení potřeby energie. Mimo jiné je třeba vyvinout maximální úsilí k dodržení závazku Kjótského protokolu o změně klimatu, zachování nárůstu globální teploty pod 2 °C, i závazku snížit do roku 2020 celkové emise skleníkových plynů alespoň o 20 % ve srovnání s hodnotami z roku 1990. [11]

Novela zákona č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií ve znění pozdějších předpisů [7] s novelizovanou vyhláškou č. 78/2013 Sb. o energetické náročnosti budov [6] implementuje požadavky EPBD II do národních předpisů. Zákon stanovuje splnění požadavků na energetickou náročnost budov s ohledem na nákladově optimální úroveň pro všechny nové budovy od 1. ledna 2013. Nákladově optimální úroveň představuje optimální rovnováhu mezi investicemi a náklady na energii během životního cyklu budovy. Nákladově optimální úroveň představuje dosažení hodnot ukazatelů energetické náročnosti splňující standardizované hodnoty vyjádřené pomocí referenční budovy. Jako základní ukazatele energetické náročnosti budovy jsou považovány: celkové hodnoty celkové primární energie za rok, neobnovitelné primární energie za rok, celkové dodané energie za rok, dílčí dodané energie pro vytápění, chlazení, větrání, úpravu vlhkosti vzduchu, přípravu teplé vody a osvětlení, průměrný součinitel prostupu tepla, součinitel prostupu tepla jednotlivých konstrukcí a účinnost technických systémů. Zákon také předpokládá od roku 2020 výstavbu všech budov s téměř nulovou spotřebou energie.

Po dobu celého životního cyklu budovy, tj. od počáteční investice při výstavbě až po její případnou demolici, se pro odvození křivky nákladového optima uvažuje se dvěma proměnlivými inputy – s investiční a provozní finanční náročností. Odvození optimální nákladové úrovně vychází ze sestrojení křivky nákladového optima (Graf č. 1). Efektivita energetické výkonnosti budov je spojena s rostoucími investičními náklady a náklady na údržbu či obnovu, a to v celém jejím životním cyklu, tj. od výstavby až po případnou demolici. Životní cyklus stavby zahrnuje předinvestiční fázi, investiční fázi, provozní fázi a likvidační fázi. Investiční náklady jsou v obrázku níže reprezentovány konvexní rostoucí křivkou.

Do úvah o nákladovosti je třeba zohlednit i klesající provozní náklady na spotřebu energií a využívání obnovitelných zdrojů energie, které znázorňuje konvexní klesající křivkou. Zvyšující se energetickou výkonnost lze obecně charakterizovat jako technologie a parametry

budovy vedoucí ke snížení spotřeby energií a k větší míře využívání obnovitelných energetických zdrojů. Provozní náročnost zahrnuje veškeré náklady spojené s dodávkou energie pro technické systémy vytápění, chlazení, větrání, úpravu vlhkosti vzduchu, přípravu teplé vody a osvětlení. Spojnicí množiny bodů vzniklých sumou provozních a investičních nákladů pro jednotlivé stupně energetické výkonnosti je definována křivka nákladového optima. Její minimum stanovuje optimální poměr mezi provozními náklady a investicemi. Optimální úroveň výše nákladů na provoz a pořízení představuje průnik křivek investiční a provozní nákladovosti. [39]



Graf č. 1: Ilustrační vyjádření křivky nákladového optima [39][20][47]

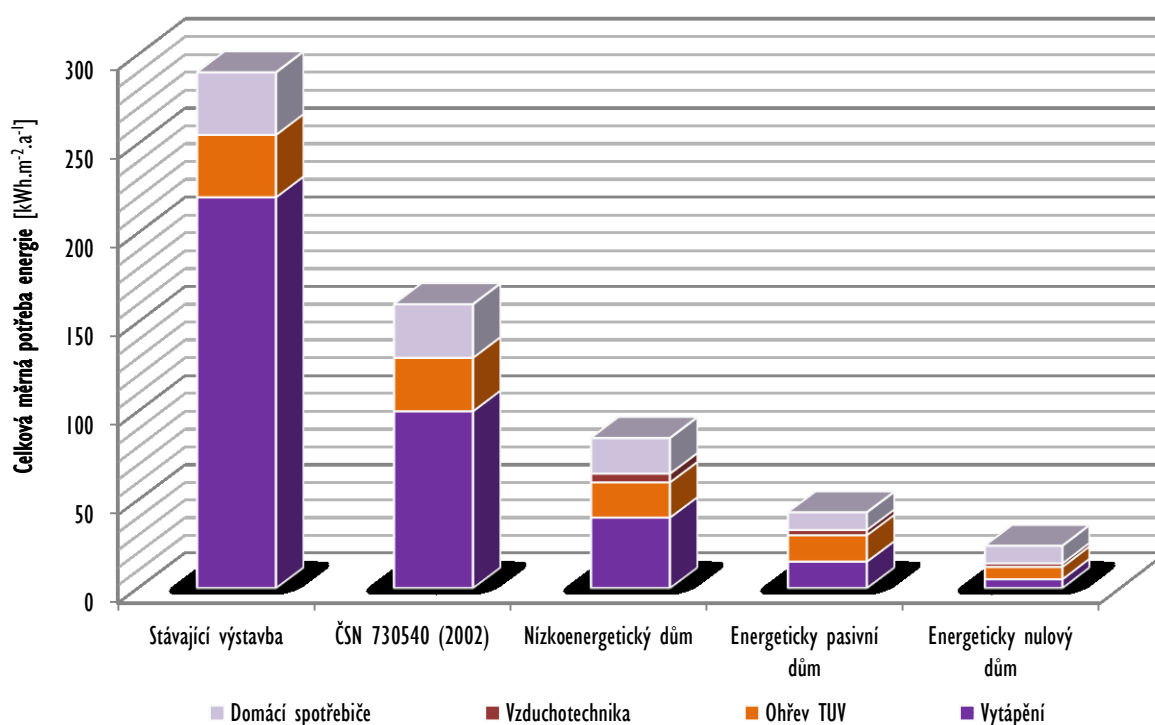
Je nutné zdůraznit, že uvedený graf je pouze ilustrační, reálné propočty nákladovosti nemusí bezpodmínečně nutně vést k symetricky orientované křivce nákladového optima a parabolickému tvaru křivek. Funkce investiční a provozní náročnosti by s největší pravděpodobností reflektovaly mocninný resp. logaritmický tvar. Podrobněji se stanovením nákladů životního cyklu budovy zaměřuje komplexní nákladová metoda LCC, jejímž cílem je optimalizace výdajů v průběhu celé etapy životnosti stavebního díla. [39]

Dle vyhlášky č. 78/2013 Sb., požadavky na energetickou náročnost budovy stanovené na nákladově optimální úrovni pro novostavby jsou splněny, pokud hodnoty ukazatelů energetické náročnosti nejsou vyšší než hodnoty ukazatelů energetické náročnosti pro referenční budovu. Referenční budovou se rozumí definovaná budova stejného druhu, stejného geometrického tvaru a velikosti, včetně prosklených ploch a částí, stejné orientace ke světovým stranám, stínění okolní zástavbou a přírodními překážkami, stejného vnitřního uspořádání a se stejným typem typického užívání a klimatických údajů jako hodnocená budova, avšak s referenčními hodnotami vlastnostmi budov, jejich konstrukcí a technických systémů. [6]



4.3 Energeticky efektivní výstavba

Energeticky efektivní výstavba se oproti běžné výstavbě splňující požadavky současných platných norem vydaných v platnost na přelomu 20. a 21. století vyznačuje nižší energetickou náročností. Základem energeticky efektivní výstavby jsou dva základní principy: „teplu, které z budovy neunikne, není potřeba doplňovat“ a „malé množství tepla obsažené ve vzduchu, které z budovy uniká, lze efektivně zhodnotit ve svůj prospěch“. Možnosti výstavby energeticky efektivních budov představují stavební a technická řešení redukcující energetickou potřebu tepla na vytápění, chlazení, přípravu teplé vody a elektrickou energii na provoz technických systémů a elektrických spotřebičů. Mimo jiné je také velmi přínosné ve značné míře využívat systémy produkce energie z obnovitelných zdrojů. [30]



Graf č. 2: Srovnání celkové měrné potřeby energie různých druhů budov bytové výstavby [14]

Nejnámějším, dnes již velmi častým a běžným představitelem energeticky efektivní výstavby jsou nízkoenergetické budovy. ČSN 73 0540-2 (2011) Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky [8] definuje nízkoenergetické domy (NED) jako budovy s roční plošnou měrnou potřebou tepla na vytápění menší než 50 kWh/(m²·a). Zároveň průměrný součinitel prostupu tepla nesmí překročit doporučenou hodnotu stanovenou dle zásad předmětné normy. Nízkoenergetického standardu lze dosáhnout zejména optimalizací stavebního řešení obálky budovy. [8]



Předmětná norma definuje kromě nízkoenergetických domů také energeticky pasivní domy (EPD). Pasivní domy jsou v českých klimatických podmínkách definovány jako budovy s roční měrnou potřebou tepla na vytápění nepřesahující 20,0 kWh/(m²·a). Pasivní budovy jsou charakterizovány minimalizovanou potřebou energie na zajištění vnitřního klimatu díky optimalizovanému stavebnímu řešení a minimalizovanou spotřebou energie z neobnovitelných zdrojů. Povinně hodnocenou vlastností je celková intenzita výměny vzduchu obálky budovy při tlakovém rozdílu 50 Pa, která nesmí překročit hodnotu $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$. Současně nemá u těchto budov měrná potřeba primární energie (spojená s provozem budovy bez započtení vlivu chlazení, elektrických spotřebičů a umělého osvětlení) přesahovat hodnotu 60,0 kWh/(m²·a). [8]

Vůbec poprvé v české legislativě, konkrétně v ČSN 73 0540-2 (2011), jsou uvedeny předběžné informace o návrhu energeticky nulových budov. V zahraničí je energeticky nulový dům (END) definován jako dům, jehož spotřeba energie se rovná téměř nule, resp. nulový dům je budova s roční měrnou potřebou tepla na vytápění nepřesahující 5,0 kWh/(m²·a). Tabulka č. 1 dle ČSN 73 0540-2:2011 stanovuje parametry a požadované hodnoty pro dosažení energeticky nulové budovy nebo hodnoty blízké energeticky nulové budovy. Je nutné zdůraznit, že s ohledem na vývoj technologií lze v brzké době očekávat upřesnění konkrétních hodnocených parametrů a zpřísnění požadovaných hodnot. [8]

Parametr		Nulový dům	Téměř nulový dům
Průměrný součinitel prostupu tepla	$U_{em} \text{ [W/(m}^2\cdot\text{K)]}$	≤ 0,25	
Měrná potřeba tepla na vytápění	$E_d \text{ [kWh/(m}^2\cdot\text{a)]}$	≤ 20,0	
Měrná potřeba primární energie	$PE_d \text{ [kWh/(m}^2\cdot\text{a)]}$	A	0,00 ≤ 80,0
		B	0,00 ≤ 30,0

Tab. č. 1: Základní požadavky na energeticky nulové budovy [8]

Pro splnění požadavků energeticky nulové budovy je vhodné, aby stavební a technické řešení bylo navrženo minimálně ve standardu energeticky pasivní budovy. Hodnocení energeticky nulových budov vychází z roční energetické bilance budovy, energetických potřeb a produkce, vyjádřené v hodnotách primární energie. Jsou stanoveny dvě základní úrovně hodnocení:

- **Úroveň A:** energetická potřeba budovy zahrnuje potřebu tepla na vytápění, chlazení, přípravu teplé vody, pomocnou energii na provoz energetických systémů, elektrickou energii na provoz umělého osvětlení a elektrických spotřebičů.



- **Úroveň B:** reflektuje úroveň A, ovšem bez zahrnutí elektrické energie na provoz elektrických spotřebičů. [8]

Ze zahraničí se k nám v poslední době dostává několik dalších standardů energeticky efektivní výstavby. Energeticky nezávislý (autarktní) dům (EAD) pokrývá jakoukoli potřebu energie (na vytápění, přípravu teplé vody, provoz elektrospotřebičů) pouze z přímého slunečního záření, bez dodávek energií zvenku. Objekt není napojen na veřejnou elektrickou síť. Energeticky nezávislý dům vyžaduje fotovoltaický systém jako hlavní zdroj elektrické energie. Energetický zásobník a systém musí zabezpečit dodávku elektřiny v průběhu celého roku. Plusenergetický dům (PED) je dům, jehož plocha fotovoltaických panelů slouží nejen k pokrytí vlastní spotřeby, ale i k vytváření přebytku. Tento přebytek je dodáván do distribuční sítě a prodáván jejímu správci. [30]



5 Vzduchotěsnost obvodového pláště budov

Vzduchotěsnost obálky budovy se vyjadřuje mírou průvzdušnosti obvodového pláště. Pro klimatické podmínky členských států Evropské Unie, s výjimkou zemí lokalizovaných v jižní Evropě, je charakteristické, že po většinu dní jsou během roku teploty vnitřního vzduchu v interiéru vyšší než teploty venkovního vzduchu. Za předpokladu nedostatečně těsné obálky budovy dochází povětšinou roku k úniku tepla z interiéru do exteriéru netěsnostmi, trhlinami a spárami. [45]

Vzduchotěsnost je schopnost určitého stavebního prvku či celé konstrukce či obálky budovy nepropouštět vzduch. Čím je konstrukce těsnější, tím méně propouští vzduch. K propouštění vzduchu skrze konstrukci je zapotřebí splnit dvě základní podmínky. K proudění vzduchu skrze konstrukci nedochází, jestliže v konstrukci nejsou žádné netěsnosti, anebo v prostředí oddělující konstrukce není žádný tlakový rozdíl neboli tlaková diference. [32]

5.1 Fyzikální souvislosti vzduchotěsnosti

Závislost průtoku vzduchu netěsnostmi obvodového pláště na působící tlakovou diferenci lze vyjádřit empirickou rovnicí proudění:

$$\dot{V} = C \cdot \Delta p^n, \quad (1)$$

kde \dot{V} [m^3/h] je objemový tok vzduchu,

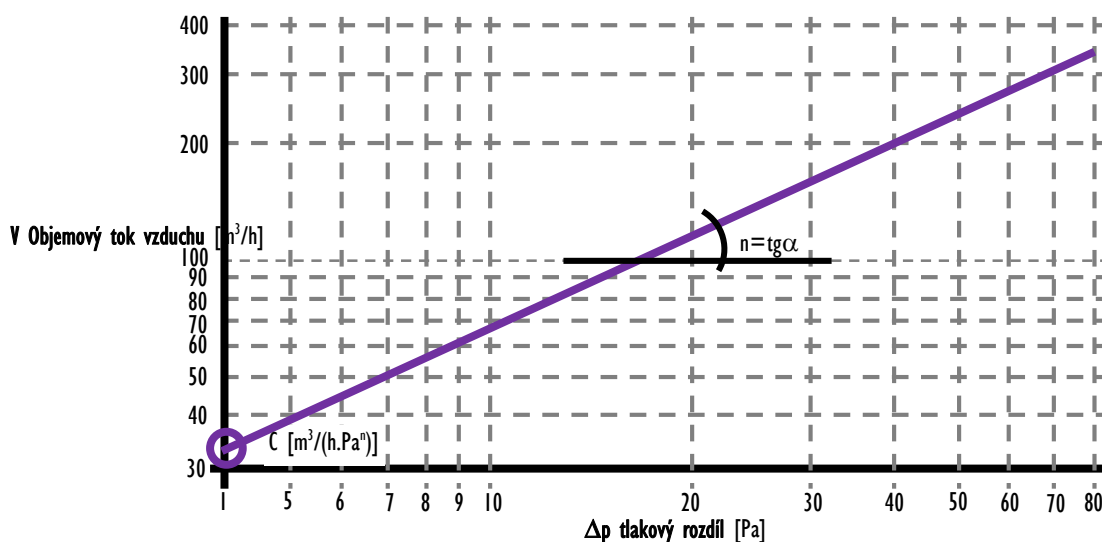
C [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$] je součinitel proudění,

Δp [Pa] je tlaková diference,

a n [-] je exponent proudění.

Součinitel proudění C [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$] a exponent proudění n [-] popisuje průvzdušnost dané konstrukce či její části. Parametry C a n určují kolik vzduchu a jakým způsobem projde skrze netěsnosti konstrukce. Součinitel proudění C odpovídá objemovému toku vzduchu při tlakovém rozdílu 1 Pa a informuje o velikosti netěsností. Exponent proudění n popisuje charakter proudění. Pro turbulentní proudění je hodnota exponentu proudění n rovna 0,5. V případě laminárního proudění je hodnota exponentu proudění n až 1,0. Exponent proudění n nabývá hodnot v intervalu od 0,5 do 1,0. V případě, že charakter proudění vzduchu není znám, je aplikována standardizovaná hodnota 0,65. [32] [38]

Při grafickém znázornění závislosti objemového toku vzduchu na tlakovém rozdílu se nejčastěji využívá logaritmické měřítko. Na vodorovnou osu se nanáší tlaková diference (rozdíl) v Pa. Na svislou osu se nanáší objemový tok vzduchu \dot{V} v $[\text{m}^3/\text{h}]$. Hodnotu součinitele proudění C lze odečíst přímo z grafu (Graf č. 3), jako průsečík přímky se svislou osou v tlakovém rozdílu 1 Pa. Hodnota exponentu proudění n odpovídá směrnici přímky, čímž udává její sklon. [32]

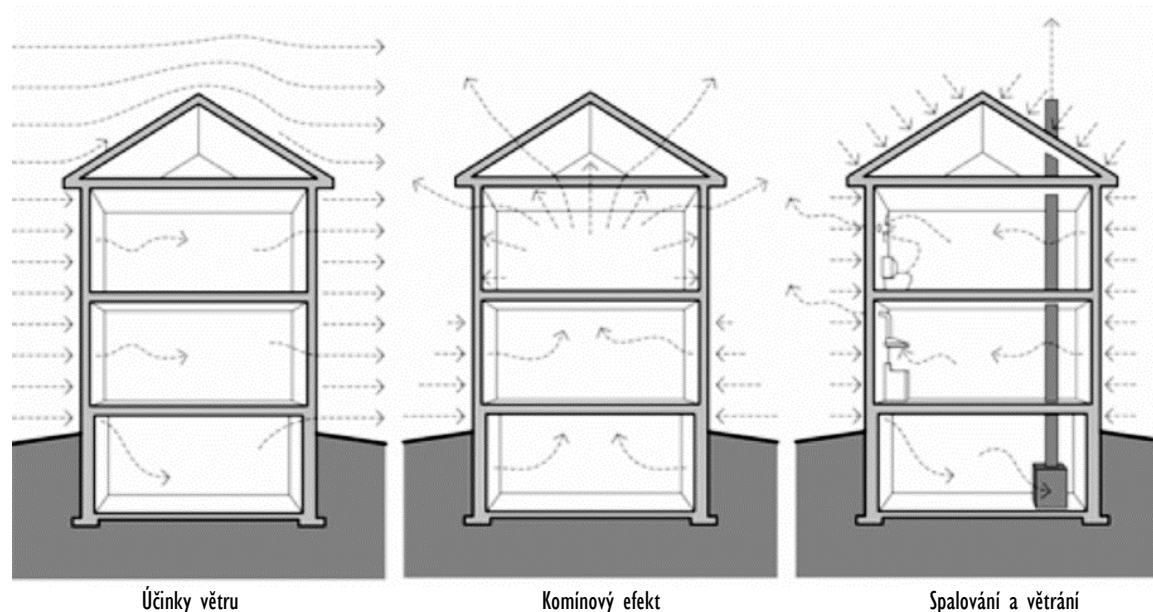


Graf č. 3: Grafické znázornění objemového toku vzduchu na tlakovém rozdílu [32]

5.2 Tlaková diference

K proudění vzduchu skrze konstrukci dochází pouze za výskytu tlakové diference mezi vnějším a vnitřním prostředím. Tlakový rozdíl neboli diference je zpravidla způsoben kombinovaným účinkem působení větru, teplotního rozdílu mezi vnitřním a vnějším prostředím a tlakovým účinkem případného spalovacího zařízení či mechanického systému větrání. Velikost tlakové diference v dané části konstrukce závisí také na rozložení jednotlivých netěsností v ploše obálky, na jejich vzduchotěsnosti a na uspořádání vnitřních konstrukcí. [32]

V závislosti jakým směrem dochází k proudění vzduchu skrze konstrukci, rozlišujeme infiltraci či exfiltraci vzduchu. Průnik studeného vzduchu z exteriéru do interiéru budovy skrze netěsnosti v konstrukci je definován jako infiltrace. V případě infiltrace vzduchu do budovy dochází vždy v jiné části budovy k exfiltraci vzduchu, tj. úniku teplého vzduchu z interiéru do vnějšího prostředí. Obr. č. 3 znázorňují infiltraci a exfiltraci vzduchu skrze konstrukce při působení větru, rozdílu teplot či existencí spalovacího či větracího systému. [34]



Obr. č. 3: Infiltrace vzduchu vyvolaná účinky větru, rozdílem teplot a spalovacím či větracím zařízením [34]

5.2.1 Tlaková diference vyvolaná rozdílem teplot

Tlaková diference vyvolaná odlišnými teplotami mezi vnitřním a vnějším prostředím je způsobena odlišnou hustotou venkovního a vnitřního vzduchu. Tento jev je všeobecně známý jako tzv. komínový efekt. Hustota vzduchu závisí na barometrickém tlaku, teplotě a vlhkosti vzduchu. Vliv vlhkosti vzduchu je zpravidla zanedbatelný a barometrický tlak se uvnitř budovy zpravidla nemění. V takových případech závisí tlaková diference pouze na rozdílu teplot a výšce budovy:

$$\Delta p_t = (\rho_e - \rho_i) \cdot g \cdot (h_{NR} - h), \quad (2)$$

kde Δp_t [Pa] je tlaková diference vyvolaná rozdílem teplot,

ρ_e [kg/m³] je hustota venkovního vzduchu,

ρ_i [kg/m³] je hustota vnitřního vzduchu,

g [m/s²] je gravitační konstanta (9,81),

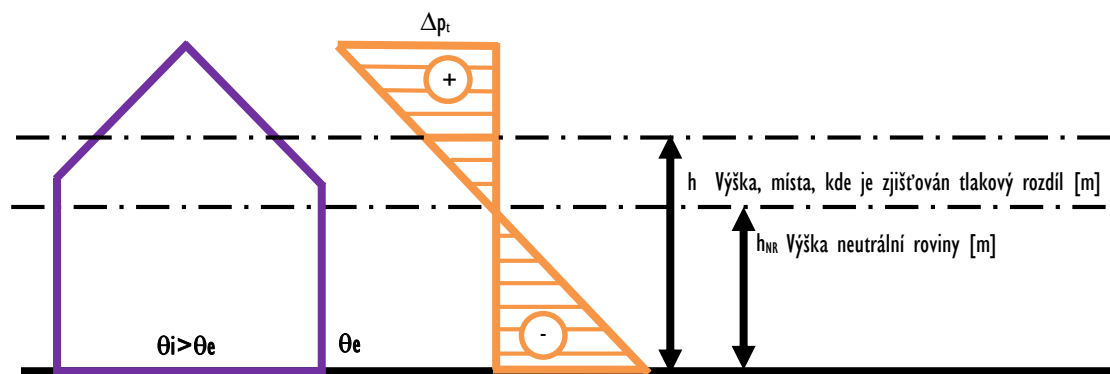
h_{NR} [m] je výška neutrální roviny,

a h [m] je výška místa, kde je zjišťován tlakový rozdíl. [32]

Komínový efekt je charakteristický stoupáním teplého vzduchu. Teplý vzduch stoupá vzhůru, neboť je lehčí než vzduch studený. Komínový efekt je výraznější v zimě z důvodu většího rozdílu teplot mezi interiérem a exteriérem. Teplý vnitřní vzduch stoupá vzhůru do horních pater budovy, kde proniká skrze netěsnosti či okenní konstrukce do exteriéru.

Stoupající teplý vzduch snižuje tlak ve spodní části budovy a nutí studený vzduch z exteriéru proniknout dovnitř do budovy. Komínový efekt způsobuje infiltraci vzduchu v dolní části budovy a naopak exfiltraci vzduchu v horní části budovy. [34]

Rovnice č. 2 platí pouze za předpokladu, že lze budovu považovat za jednu tlakovou zónu. Všechny prostory v budově musí být vzájemně propojeny bez významného tlakového rozdílu. Dalším nutným předpokladem je, že vnitřní teplota se nemění s výškou budovy. [32]



Obr. č. 4: Tlakový rozdíl vyvolaný rozdílem teplot v různé výšce obálky budovy [32]

5.2.2 Tlaková diference vyvolaná účinky větru

Pro vzduch proudící kolem každé budovy jsou charakteristické časté změny rychlosti či směru proudění. Změny rychlosti či směru proudění významně ovlivňují působení tlaku na povrchu obvodového pláště obálky budovy. U deskových těles působí na návětrné straně tlak a naopak na závětrné straně podtlak (sání). Odvození tlakové diference vyvolaného účinky větru je v reálném prostředí explicitně velmi náročné a obtížné, neboť daná tlaková diference závisí na tvaru, expozici a orientaci budovy vůči větru a také na stínícím efektu terénu a okolní zástavby. Významný vliv má taktéž rychlost větru. Tlakový účinek větru v daném místě obálky budovy je definován vztahem:

$$\Delta p_v = C_p \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (3)$$

kde Δp_v [Pa] je tlaková diference vzduchu v určitém místě a o určitém tlaku v místě s nerušeným prouděním v referenční výšce,

C_p [-] je tlakový součinitel,

ρ [kg/m³] je hustota vzduchu,

v [m/s] je rychlost větru v místě s nerušeným prouděním v referenční výšce. [32]



Referenční výška budovy ve většině případů odpovídá výšce budovy. Používané hodnoty tlakového součinitele C_p [-] jsou odvozeny z měření v aerodynamických tunelech. Konkrétní hodnoty C_p [-] jsou pro daný směr větru a typ konstrukce (respektive úhel sklonu) uvedeny v tabulce v odborné literatuře (např. [32]). Ukazatel v [m/s] představuje rychlost větru v místě budovy s nerušeným prouděním. Velmi proměnlivá rychlost a směr větru významně ovlivňuje tlakové účinky způsobené větrnými silami. Při výpočtech a odhadech reálného působení tlakového rozdílu je nutné vždy počítat s velkou nejistotou. [32]

5.2.3 Tlaková diference vyvolaná větracím zařízením

Tlaková diference mezi interiérem a exteriérem budovy může být ovlivněna instalací mechanického systému větrání. U rovnotlakých systémů je vyvolaná tlaková diference velmi malá a může být zanedbána. U přetlakových či podtlakových systémů je tlaková diference již významnější. Tlaková diference je rovněž vyvolávána spalováním vzduchu v kotlích, kamnech či krbech. Taktéž odsavače par, digestoře a ventilátory v koupelnách, WC či kuchyních odvádějící odpadní vzduch z budovy vytváří podtlak, který je vyrovnáván infiltrací vzduchu skrze netěsnosti v obvodovém plášti. [32] [34]

5.3 Hodnocení vzduchotěsnosti obvodového pláště budov

Průvzdušnost obálky budovy lze definovat jako nekontrolovatelnou výměnu vzduchu netěsnostmi obvodového pláště, které negativně ovlivňují energetickou bilanci budov. Čím nižší je průvzdušnost objektu, tím vyšší je vzduchotěsnost.

Vzduchotěsnost obvodového pláště budovy se ve většině případů vyjadřuje pomocí tzv. empirické rovnice proudění (1), která vyjadřuje vztah mezi objemovým tokem vzduchu a tlakovou diferencí. Pro hodnocení vzduchotěsnosti neboli průvzdušnosti obvodového pláště je možné využít některou z následující veličin při referenční tlakové diferencii:

- celková intenzita výměny vzduchu n [h^{-1}],
- vzduchová propustnost q [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$],
- měrný objemový tok vzduchu netěsnostmi w [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$],
- ekvivalentní plocha netěsnosti A_L [cm^2],
- a normalizovaná plocha netěsnosti A_n [-]. [32] [9]



5.3.1 Referenční tlaková diference

Nejčastěji je při měření průtoku vzduchu obvodovým pláštěm budovy využívána hodnota tlakové diference mezi interiérem a exteriérem 50 Pa. Tlakový rozdíl 50 Pa mezi interiérem a exteriérem je při měření velmi snadno dosažitelný. Zároveň je dostatečně vysoký pro získání relevantního výsledku nezávislého na povětrnostních vlivech. Méně často jsou pak využívány tlakové diference o velikosti 1 Pa, 4 Pa, 10 Pa, 25 Pa a 75 Pa. Danou tlakovou diferencí reflektuje dolní index výše uvedených hodnotících veličin vzduchotěsnosti obvodového pláště (např. n_{50} nebo q_{50}). [38]

5.3.2 Celková intenzita výměny vzduchu

Tradičně se pro vyjádření vzduchotěsnosti používá veličina celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} [h^{-1} nebo ACH] při tlakovém rozdílu 50 Pa. Celková intenzita výměny vzduchu je definována jako poměr objemového průtoku ventilátoru při tlakovém rozdílu 50 Pa k objemu vytápěného a posuzovaného prostoru:

$$n_{50} = \frac{Q}{V}, \quad (4)$$

kde n_{50} [h^{-1}] je celková výměna intenzity vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa,

Q [m^3/h] je objemový průtok ventilátoru při rozdílu 50 Pa,

a V [m^3] je objem vytápěného prostoru posuzované budovy nebo její části. [32] [9]

Hodnotu celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} lze definovat jako ukazatel determinující, kolikrát se vymění vzduch v místnosti za jednu hodinu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Limitní hodnota pro energeticky pasivní domy, $n_{50} = 0,60 \text{ h}^{-1}$ vyjadřuje, že maximálně 60 % objemu vzduchu v budově může uniknout skrze netěsnosti za jednu hodinu při tlakovém rozdílu mezi vnitřním a vnějším prostředím 50 Pa.

5.3.1 Vzduchová propustnost

Nicméně, v dnešní době se již v mnoha zemích, například ve Velké Británii, Francii a Švýcarsku, vzduchotěsnost vyjadřuje vzduchovou propustností q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$]. Vzduchová propustnost se vyjadřuje jako podíl objemového průtoku ventilátoru k ochlazované ploše obálky vytápěného prostoru posuzovaného objektu. Vzduchová propustnost, na rozdíl od celkové intenzity výměny vzduchu, reflektuje nejen velikost, ale také tvar posuzovaného objektu:



$$q_{50} = \frac{Q}{S}, \quad (5)$$

kde q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] je vzduchová propustnost při tlakovém rozdílu 50 Pa,
 Q [m^3/h] je objemový průtok ventilátoru při rozdílu 50 Pa,
a S [m^2] je ochlazovaná plocha obálky vytápěného prostoru budovy. [9][26]

5.3.2 Ostatní hodnotící veličiny

Další níže jmenované veličiny jsou v praxi nepříliš rozšířené a málo používané. Měrný objemový tok vzduchu netěsnostmi w [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] udává objemový tok vzduchu vztažený na celkovou podlahovou plochu budovy:

$$w_{50} = \frac{Q}{A_F}, \quad (6)$$

kde w_{50} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] je měrný objemový tok vzduchu netěsnostmi,
 Q [m^3/h] je objemový průtok ventilátoru při rozdílu 50 Pa,
a A_F [m^2] je celková podlahová plocha budovy. [32]

Ekvivalentní plocha netěsnosti A_L [cm^2] udává velikost otvoru, kterým při daném referenční tlakové diferenci proudilo stejné množství vzduchu jako obálkou budovy. Normalizovaná plocha netěsnosti A_n [-] je odvozená z ekvivalentní plochy netěsnosti A_L vzhledem k jednotce podlahové plochy a referenční výšce budovy. [32]

5.3.3 Přepočet hodnotících veličin

V současné praxi jsou nejčastěji využívány veličiny celkové intenzity výměny vzduchu n a vzduchové propustnosti q při dané tlakové diferenci. Rozdílné vyjádření vzduchotěsnosti obvodového pláště značně komplikuje komparaci jednotlivých výsledků. V případě, že jsou známy parametry objemu a ochlazované plochy obálky budovy, lze využít převodní vztah mezi celkovou intenzitou výměny vzduchu a vzduchovou propustností:

$$q_{50} = n_{50} \cdot \frac{V}{S}, \quad (7)$$

kde q_{50} [$\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$] je vzduchová propustnost při tlakovém rozdílu 50 Pa,
 n_{50} [h^{-1}] je celková výměna intenzity vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa,
 Q [m^3/h] je objemový průtok ventilátoru při rozdílu 50 Pa,
a S [m^2] je ochlazovaná plocha obálky vytápěného prostoru budovy. [4]



5.4 Měření a kontrola vzduchotěsnosti obálky budovy

Kontrola vzduchotěsnosti obálky budovy by měla být nedílnou součástí každé soudobé výstavby. Výstupem měření je vyjádření vzduchotěsnosti obálky budovy jednou z veličin uvedených v předcházející kapitole. Pro vyjádření vzduchotěsnosti obálky budovy je vždy nutné znát závislost mezi objemovým průtokem vzduchu pro dané tlakové diference, která se graficky znázorní pomocí empirické rovnice proudění (1) odvozující míru vzduchotěsnosti obvodového pláště. Mezi nejrozšířenější metodu měření vzduchotěsnosti obálky budov patří metoda tlakového spádu. Nejčastěji je při testování vzduchotěsnosti obálky budovy využit externí ventilátor. U měření velkých a rozsáhlých budov je možné využít interní ventilátor, který je součástí větracího systému v budově. Mezi méně časté metody patří metoda harmonicky proměnného tlakového rozdílu a metoda tlakového impulzu. [32]

5.4.1 Metoda tlakového spádu – Blower Door Test

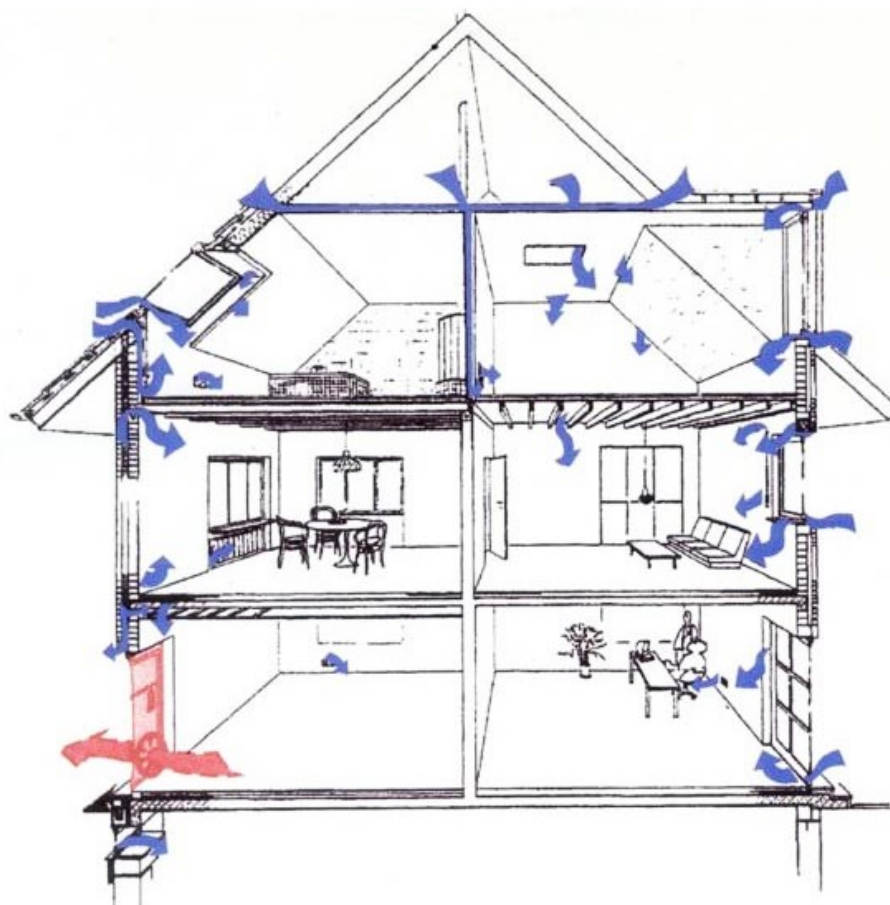
Ke zjištění průvzdušnosti a netěsností v obvodovém plášti je v České republice dle ČSN EN 13829 (2001) normalizované měření metodou tlakového spádu, tzv. Blower Door Test. Metoda měření Blower Door Test je založena na opakovaném měření objemového toku vzduchu skrze obálku budovy při uměle vyvolaných různých tlakových rozdílech. Tlakové diference se vždy volí tak, aby byly minimalizovány povětrnostní klimatické vlivy, nejčastěji mezi 10 až 100 Pa. [32]

Jednotlivé tlakové diference jsou vyvolány připojeným externím ventilátorem s regulovatelným výkonem. Pro každou tlakovou diferenci se zaznamená odpovídající objemový tok vzduchu, který je přiváděn (popř. odváděn) ventilátorem. Množství vzduchu, které je přiváděno (popř. odváděno) ventilátorem je stejné jako množství vzduchu proudící skrze netěsnosti obvodového pláště. Získané výsledky se graficky znázorní do grafu (Graf č. 3), jejichž rovnice se získá zlogaritmováním empirické rovnice proudění (1):

$$\log(\dot{V}) = \log(C) + n \cdot \log(\Delta p). [32] \quad (8)$$

Pro získání maximálně přesných a relevantních výsledků je nutné provést minimálně dvě série měření a následně získané výsledky aritmeticky zprůměrovat. Je žádoucí jedno měření provést při přetlaku v budově a druhé při podtlaku v budově. Při přetlaku je tlak v budově větší než v exteriéru. Ventilátorem je do budovy přiváděn vzduch, který uniká skrze netěsnosti

v obvodovém pláští. Při podtlaku je tlak v budově nižší než v exteriéru. Vzduch z budovy je odváděn ventilátorem ven a skrze netěsnosti je vzduch do budovy nasáván (Obr. č. 5).



Obr. č. 5: Schéma podtlakového měření průvzdušnosti metodou tlakovou spádu – Blower Door Test [27]

5.4.2 Vývoj a historie Blower Door Testu

V průběhu 70 let minulého století si vědci a energetičtí specialisté začali uvědomovat negativní vliv úniku vzduchu skrze obvodový plášť budovy, který významně zvyšuje tepelné ztráty. Princip měření a zařízení Blower Door Testu tak, jak jej známe dnes, byl poprvé představen v roce 1977 ve Švédsku. Při prvních pokusech měření byl ventilátor instalován do okenních otvorů. [1]

V návaznosti na první měření ve Švédsku zahájila v roce 1979 Princeton Univerzity v New Jersey (USA) výzkum infiltrace vzduchu skrze netěsnosti obvodového pláště. V roce 1984 Harry Sherman a jeho syn Max Sherman začali prodávat kalibrovaný ventilátor pod značkou Harmax. O rok později Gary Nelson, zakladatel společnosti The Energy Conservatory, uvedl na trh měřicí aparaturu pod názvem Blower Door Minneapolis, která i dnes patří k nejpoužívanějším měřicím aparaturám. [1]

5.4.3 Aparatura a příslušenství Blower Door Test

Měřicí aparatura Blower Door se nejčastěji skládá z teleskopického hliníkového rámu, vzduchotěsné textilie s otvorem pro ventilátor, kalibrovaného ventilátoru s možností regulace výkonu se clonami pro regulaci objemového průtoku vzduchu, regulační jednotky ventilátoru, systému pro automatické testování výkonu (APT systém), tlakové hadičky a další kabelového příslušenství. Pro maximální automatizaci a vyhodnocení měření je nezbytné zařízení Blower Door připojit k počítači s vhodným softwarovým vybavením dodávaným spolu se zařízením Blower Door. Obr. č. 6 znázorňuje připravenou aparaturu Blower Door Minneapolis model no. 4 připojenou k počítači a připravenou k měření vzduchotěsnosti obálky budovy.



Obr. č. 6: Osazení aparatury a měření průvzdušnosti metodou tlakového spádu - Blower Door Test

5.4.4 Princip a postup měření průvzdušnosti metodou Blower Door Test

Samotný název metody Blower Door Test vychází ze svého principu fungování. Základním prvkem je ventilátor (Blower), který je při měření instalován do vhodného otvoru, nejčastěji právě do dveří (Door).

Nejprve je nutné osadit teleskopický rám se vzduchotěsnou textilií. Teleskopický rám je vhodné instalovat v místech hlavních vstupních dveří, balkónových dveří a v oknech. Nevhodné je rám umístit v otvorech, kde nelze zaručit nerušené proudění vzduchu z důvodu existujících překážek v těsné blízkosti otvoru (stěna, příčka, schodiště ve vzdálenosti 1,5 – 2,0 m od ventilátoru). Je potřeba rám napevno upevnit do otvoru, aby co nejtěsněji přilnul ke konstrukci otvoru. V případě detekování netěsností mezi otvorem a rámem je nutné netěsnosti přelepit speciální páskou, či vložit vzduchotěsné těsnění. [24]

Do otvoru ve vzduchotěsné plachtě s elastickým límcem se osadí ventilátor se clonami. Ventilátor by neměl stát na zemi, ale měl by viset na rámu (pokud je to technicky možné). Pomocí suchého zipu se ventilátor pověsí na spodní rozpěru teleskopického hliníkového rámu. Elastický límec vzduchotěsné plachty musí těsně obepínat ventilátor. Po osazení ventilátoru je nutné propojit ventilátor, popř. vzduchotěsnou plachtu, s APT systémem, regulátorem výkonu ventilátoru a s počítačem pomocí tlakových hadiček a kabelového příslušenství. [24]



Obr. č. 7: Detail kalibrovaného ventilátoru aparatury Blower Door Testu Minneapolis no. 4



Obr. č. 8: Detail regulátoru výkonu ventilátoru aparatury Blower Door Testu Minneapolis no. 4



5.4.5 Vyhodnocení měření a výsledky

Po sestavení aparatury Blower Door Test – Minneapolis model 4 a zapojení aparatury k počítači je možné přistoupit k samotnému měření průvzdušnosti. Pro měření průvzdušnosti aparaturou Blower Door Minneapolis model 4 (popř. model 3) je vhodné využít software – TECTITE Express. Výrobce programu TECTITE Express [48] je společnost The Energy Conservatory. [24]

Software dodávaný se zařízením pro měření průvzdušnosti budov, např. TECTITE Express [42], umožňuje provést měření průvzdušnosti automaticky. Před zahájením měření je nutné vložit základní informace o budově a aktuálních povětrnostních vlivech v těsném okolí měřené budovy. Povinnými vstupními daty je teplota v interiéru [°C], teplota v exteriéru [°C], objem budovy [m³], podlahová plocha [m²], plocha obálky budovy [m²] a odchylka rozměrů [%]. V případě měření dle ČSN EN 13829 (2001) [9] jsou taktéž nezbytnými inputy informace o třídě větru (od bezvětří až po bouřlivý vítr) a expozici budovy (vysoce exponovaný objekt až vysoce chráněný objekt).

Základní požadavky pro stanovení vzduchotěsnosti obálky budovy jsou popsány v ČSN EN 13829. Zmíněná ČSN umožňuje 2 metody měření:

- **Metoda A** – měření budovy/části objektu v provozním stavu, bez provedení utěsnění oproti běžnému užívání objektu.
- **Metoda B** – měření obálky budovy po utěsnění otvorů, které mají vliv na měření – ventilátory, komíny, atd.

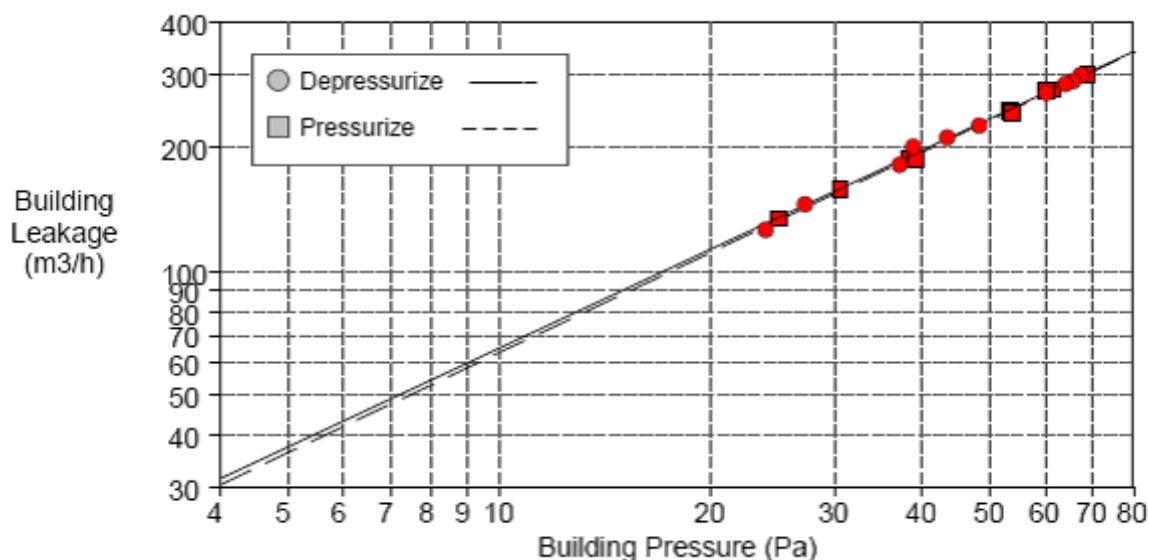
Výsledky metody A charakterizují běžnou vzduchotěsnost v provozním stavu budovy. Měření se provádí až po ukončení výstavby a uvedení objektu do provozu. Výsledky metody A je vhodné použít zejména u výpočtů energetické náročnosti budovy. Protokol z měření metodou A slouží jako certifikát o měření průvzdušnosti dané budovy. Naopak metoda B slouží k ověření těsnosti obálky budovy a odhalení případných defektů a vad v obálce budovy. Metoda B se provádí po dokončení vzduchotěsné vrstvy, kde je ještě možná její oprava. [9][24]

Během měření Blower Door testem software TECTITE Express [42] automaticky kontroluje rychlost ventilátoru, vyzývá měřícího technika k instalaci či deinstalaci clon ventilátoru, zaznamenává tlaky a průtok ventilátoru. Na základě získaných hodnot následně vypočítá, uloží a vytvoří protokol o výsledcích měření.



Program vyhodnocuje a vykresluje graf závislosti průtoku vzduchu ventilátorem Q [m³/h] na zadaných intervalech rozdílů tlaků Δp [Pa]. Dle ČSN EN 13829 (2001) je zkouška Blower Door považována za platnou při měření nejméně 5 různých tlakových diferencí, přičemž intervaly mezi jednotlivými tlakovými rozdíly nesmí být větší než 10 Pa. Nejméně jedna z tlakových diferencí by měla být větší než 50 Pa. Získanými body posléze proloží regresní přímkou a vyhodnotí intenzitu výměny vzduchu n_{50} při tlakovém rozdílu 50 Pa dle výše uvedených vztahů. [24]

	<u>Depressurization</u>	<u>Pressurization</u>	<u>Average</u>
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m3/h)	234 (+/- 0.6 %)	232 (+/- 0.4 %)	233
n50: Air Changes per Hour (1/h)	0.54	0.54	0.54
w50: m3/hm2 Floor Area	1.46	1.45	1.46
q50: m3/hm2 Surface Area	0.67	0.66	0.66
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm2)	72.7 (+/- 3.2 %)	71.0 (+/- 2.3 %)	71.9
cm2/m2 Surface Area	0.21	0.20	0.20
LBL ELA @ 4 Pa (cm2)	33.9 (+/- 5.0 %)	32.7 (+/- 3.5 %)	33.3
cm2/m2 Surface Area	0.10	0.09	0.09
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	10.5 (+/- 7.6 %)	10.0 (+/- 5.4 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	10.5 (+/- 7.6 %)	10.0 (+/- 5.4 %)	
Exponent (n)	0.794 (+/- 0.019)	0.805 (+/- 0.014)	
Correlation Coefficient	0.99767	0.99884	
Test Standard:	EN 13829	Regulation complied with:	
Type of Test Method:	B		
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door, S/N 2196		



Obr. č. 9: Ukázka výstupu software TECTITE EXPRESS při měření průvzdušnosti budovy [42]



5.5 Požadavky na vzduchotěsnost a šíření vzduchu konstrukcí a budovou

Požadavky na vzduchotěsnost obálky budovy a větrání místností jsou pro Českou republiku stanoveny dle ČSN 73 0540-2 (2011) Tepelná ochrana budov – Požadavky. Z hlediska tepelně technických vlastností je žádoucí, aby množství nekontrolovatelného úniku vzduchu skrze konstrukce, bylo co nejmenší, avšak plně v souladu s hygienickými požadavky na kvalitu vnitřního vzduchu. Dle ČSN 73 0540-2 (2011) šíření vzduchu konstrukcí a výměna vzduchu musí splňovat následující kritéria:

- průvzdušnost spár lehkých obvodových plášťů,
- průvzdušnost spár a netěsností ostatních konstrukcí obálky budovy,
- celková průvzdušnost obálky budovy,
- průvzdušnost místnosti s nuceným větráním nebo klimatizací,
- intenzita větrání nevyužívané místnosti,
- intenzita větrání užívané místnosti,
- a zpětné získávání tepla při nuceném větrání. [8]

5.5.1 Průvzdušnost spár lehkých obvodových plášťů

V případě lehkých obvodových plášťů musí jejich funkční spáry odpovídat příslušnému normovému požadavku uvedenému v tabulce níže. Třídy LP1 a LP2 odpovídají klasifikaci lehkých obvodových plášťů vztažených na délku spáry podle ČSN EN 12152 (2002). [8]

Funkční spára ve výplni otvoru	Požadovaná hodnota třídy průvzdušnosti	
	Budova s větráním přirozeným nebo kombinovaným	Budova s větráním výlučně nuceným
Lehký obvodový plášť	LP1	LP2

Tab. č. 2: Požadované hodnoty třídy průvzdušnosti dle ČSN 73 0540-2 (2011) [8]

5.5.2 Průvzdušnost spár a netěsností ostatních konstrukcí obálky budovy

Norma nepřipouští žádný nekontrolovatelný únik vzduchu skrze netěsnosti a neutěsněné spáry vyjma funkčních spár výplní otvorů a funkčních spár lehkých obvodových plášťů. Potřebnou vzduchotěsnost je třeba zajistit systémovými prvky, jako jsou těsnící fólie, tmely a profily. Při samotném návrhu je žádoucí minimalizovat počet a rozsah styků, spár, prostupů a připojení procházející vzduchotěsnou rovinou obálky budovy. [8]



5.5.3 Celková průvzdušnost obálky budovy

Celková průvzdušnost obálky budovy nebo její části se vyjadřuje celkovou intenzitou výměny vzduchu n_{50} [h^{-1}] při tlakovém rozdílu 50 Pa pomocí experimentálního měření metodou tlakového spádu s externím ventilátorem – Blower Door Test dle ČSN EN 13829 (2001). Norma doporučuje splnění následujícího požadavku:

$$n_{50} \leq n_{50,N} , \quad (9)$$

kde n_{50} [h^{-1}] je celková výměna intenzity vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa,
 a $n_{50,N}$ [h^{-1}] je doporučená hodnota celkové intenzity výměny vzduchu.

Doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa se stanoví podle tabulky (Tab. č. 3) v závislosti na způsobu větrání v budově nebo její samostatné části. Hodnoty na úrovni I se doporučuje splnit vždy. Hodnoty na úrovni II se doporučuje splnit přednostně a především u energeticky efektivních výstavby. [8]

Větrání v budově	Doporučené hodnoty n_{50} [h^{-1}]	
	Úroveň I	Úroveň II
Přirozené nebo kombinované	4,5	3,0
Nucené	1,5	1,2
Nucené se zpětným získáváním tepla	1,0	0,8
Nucené se zpětným získáváním tepla v budovách se zvláště nízkou potřebou tepla na vytápění (pasivní budovy)	0,6	0,4

Tab. č. 3: Doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50,N}$ [8]

5.5.4 Průvzdušnost místnosti s nuceným větráním nebo klimatizací

Je žádoucí, aby průvzdušnost budovy či místnosti s nuceným větráním nebo s klimatizací byla co nejmenší. Požadavek se hodnotí pomocí výpočtem stanovené intenzity přirozené výměny vzduchu bez započtení vlivu klimatizačního nebo větracího zařízení při návrhových podmínkách v zimním období. Norma doporučuje splnění následujícího požadavku pro intenzitu přirozené výměny vzduchu:

$$n \leq 0,05 h^{-1} , \quad (10)$$

kde n [h^{-1}] je intenzita přirozené výměny vzduchu. [8]



5.5.5 Intenzita větrání nevyužívané a užívané místnosti

Hygienické a provozní požadavky v obytných budovách jsou nadřazené požadavkům energetických úspor. V případě nedostatečného větrání dochází k nárůstu koncentrací škodlivin ve vnitřním prostředí. Pro bytové místnosti je nutné zajistit nejméně 15 m³/h čerstvého vzduchu na osobu při klidové aktivitě a při aktivitě nejméně 25 m³/h na osobu. V případě, že není místnost využívána, požaduje se dosažení hodnot alespoň minimální výměny vzduchu. Je nutné splnit podmínku:

$$n_{min} \geq n_{min,N}, \quad (11)$$

kde $n_{min,N}$ [h⁻¹] je doporučená nejnižší intenzita větrání místnosti po dobu její nevyužívání. Pokud není stanoveno jinak, $n_{min,N}$ je 0,1 h⁻¹. [8]

V případě, že je místnost využívána, musí intenzita větrání splňovat následující podmínky:

$$n \geq n_N, \quad (12)$$

$$n \leq 1,5 \cdot n_N, \quad (13)$$

kde n_N [h⁻¹] je požadovaná hodnota intenzity větrání vzduchu stanovená přepočtem z minimálních průtoků čerstvého vzduchu definovaných v platné legislativě. Pro obytné budovy se požadovaná hodnota intenzity větrání přepočtená z minimálního množství potřebného čerstvého vzduchu pohybuje mezi 0,3 až 0,6 h⁻¹. Hodnoty n_N se stanovují pro zimní návrhové období, respektive pro otopnou sezónu budovy. [8]

5.5.6 Zpětné získávání tepla při nuceném větrání

V případech, kdy u novostaveb je z hygienických či provozních důvodů celková intenzita větrání vyšší než 1 h⁻¹ po dobu nejméně 8 hodin denně, je doporučeno osazení účinného zařízení systému zpětného získávání tepla z odpadního vzduchu s ověřenou celkovou účinností nejméně 60 %. [8]

Osazení systému zpětného získávání tepla (ZZT) je jedním z bazálních energeticky efektivních opatření vedoucí ke snižování energetické náročnosti budov. V případě výstavby energeticky pasivních či energeticky nulových domů je instalace systémů zpětného získávání tepla zcela nezbytná. [32]



5.6 Komparace výsledků vzduchotěsnosti obálky budovy

Získaný výsledek vzduchotěsnosti je vhodné komparovat s požadovanými nebo doporučenými národními normativními hodnotami. Mezinárodní srovnání je ovšem značně ztíženo. Kromě již zmíněného rozdílného vyjádření vzduchotěsnosti pomocí celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} , popř. vzduchové propustnosti q_{50} , existuje také požadavek na různou tlakovou diferencí mezi interiérem a exteriérem. Standardní tlaková diference 50 Pa je v některých zemích nahrazena tlakovým rozdílem 4 nebo 10 Pa. [26]

Pro mezinárodní srovnání je nejdříve nutné normalizovat jednotlivé národní požadavky a vyjádřit požadavky na maximální únik vzduchu pro konstantní tlakovou diferencí shodnou ve všech zemích. Normalizace tlakové diference je možná pouze za předpokladu znalosti známého objemu vytápěného prostoru a ochlazované plochy obálky budovy. [26]

V tabulce č. 4 jsou znázorněny požadavky na vzduchotěsnost budov pro novostavby ve vybraných zemích. Normalizace tlakové diference na tlakový rozdíl 50 Pa je provedena za předpokladu objemu vytápěného prostoru 300 m^3 a ochlazované plochy obálky budovy 250 m^2 . V zemích uvedených v tabulce je splnění požadavků na vzduchotěsnost obligatorní, s výjimkou České republiky, kde je splnění požadavků pouze doporučeno. [26]

Stát	Národní požadavky	$n_{50} [\text{h}^{-1}]$
Passivhaus Institut	Energeticky pasivní dům (EPD)	0,60
Česká republika	Přirozené nebo kombinované větrání	4,50 (3,00)
	Nucené větrání	1,50 (1,20)
	Nucené větrání se systémem ZTT	1,00 (0,80)
	Nucené větrání se systémem ZTT pro EPB	0,60 (0,40)
Belgie	Nucené větrání	3,00
	Nucené větrání se systémem ZTT	1,00
Francie	Od 0,8 do 2,5 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ při 4 Pa	11,00
Nizozemí	Třída 1 – Nesmí překročit 1,4 až 2,24 l/h při 10 Pa	6,50
	Třída 2 – Nesmí překročit 0,72 až 1,15 l/h při 10 Pa	
Norsko	Budovy většího rozsahu	4,00
	Dvou a méně podlažní budovy	3,00
	Ostatní budovy	1,50
Švédsko	Vzduchová propustnost q_{50} při 50 Pa 0,8 $\text{l}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$.	2,88
Švýcarsko	Horní hranice 0,75 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ při 4 Pa	3,30
Velký Británie	Nesmí překročit 10,0 $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ při 50 Pa	8,30
USA	Nesmí překročit 1,6 l/h při 4 Pa.	8,50

Tab. č. 4: Normalizace požadavků na vzduchotěsnost obálky budov [26]



Z tabulky č. 4 je patrné, že nejpřísnější požadavky na vzduchotěsnost obvodového pláště jsou v zemi s nejnepříznivějšími klimatickými podmínkami, Švédsku. Se zmenšující se zeměpisnou šířkou stoupají průměrné venkovní teploty a požadavky na vzduchotěsnost budov jsou mírnější v důsledku příznivějšího klimatu.

Typickým zástupcem energeticky efektivních budov je energeticky pasivní dům splňující veškeré požadavky Institutu pasivních domů se sídlem v Darmstadtu. Jedním z mnoha požadavků pro získání certifikátu energeticky pasivního domu je splnění maximální neprůvzdušnosti objektu. Maximální neprůvzdušnost energeticky pasivního domu, vyjádřená v celkové intenzitě výměny vzduchu n_{50} při tlakovém rozdílu 50 Pa, je definována hodnotou $0,60 \text{ h}^{-1}$. [13]

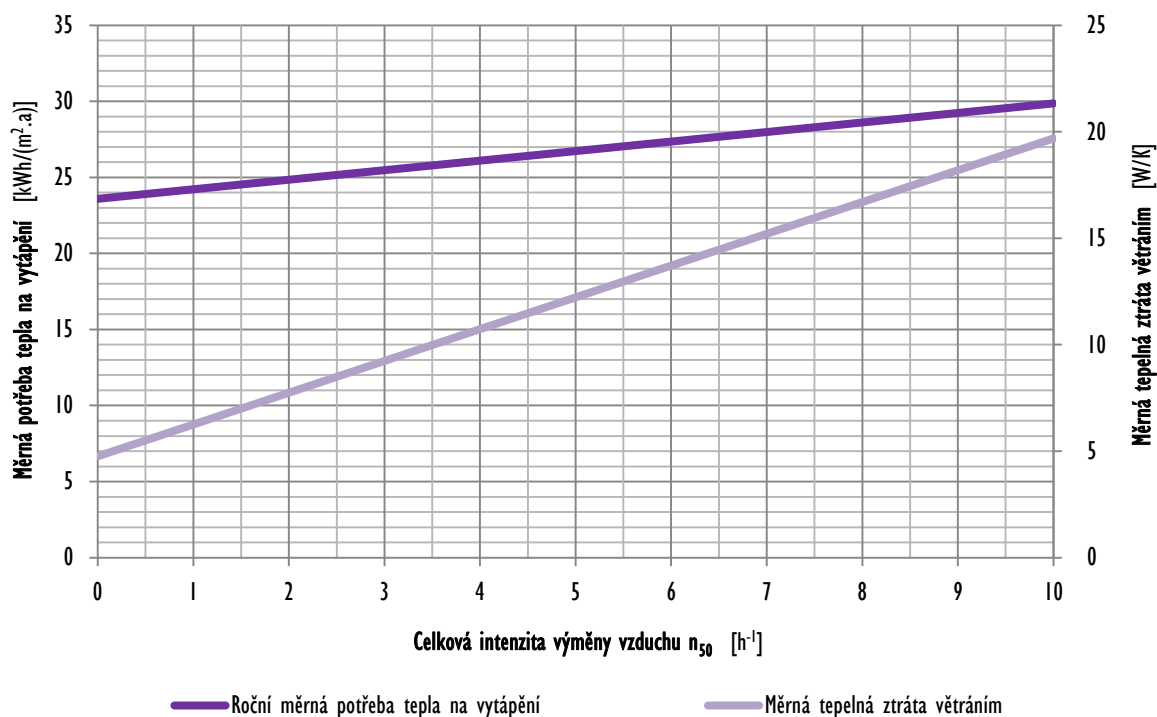


5.6.1 Význam vzduchotěsnosti v kontextu energetické bilance budovy

Nežádoucí a nekontrolovatelný únik vzduchu z interiéru do vnějšího prostředí skrze obálku budovy vede ke snížení účinnosti tepelné izolace, ke snížení tepelného odporu konstrukce a ke zvýšeným tepelným ztrátám větráním. Zvýšené tepelné ztráty větráním mají přímý podíl na zvýšené potřebě tepla na vytápění. Zvýšená spotřeba energií na provoz negativně ovlivňuje ekonomickou zátěž na provoz.

Pro splnění hygienických požadavků na dodávky čerstvého vzduchu se u energeticky efektivních budov předpokládá nucené větrání se systémem zpětného získávání tepla. Nadměrná průvzdušnost obvodového pláště negativně ovlivňuje a snižuje účinnost systému zpětného získávání tepla. [32]

Graf č. 4 znázorňuje závislost měrné potřeby tepla na vytápění a měrné tepelné ztráty větráním na vzduchotěsnosti zvoleného referenčního objektu energeticky efektivního domu se systémem zpětného získávání tepla s účinností 85 %. Referenční objekt je lokalizován ve středoevropských klimatických podmínkách. Jedná se o dvoupodlažní objekt na bázi dřevních hmot s užitnou podlahovou plochou 150 m^2 , ochlazovanou plochou obálky budovy 420 m^2 a objemem vzduchu ve vytápěném prostoru 440 m^3 .

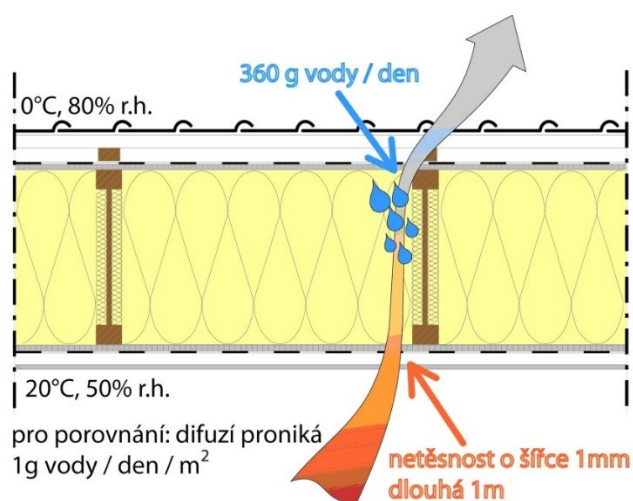


Graf č. 4: Závislost vzduchotěsnosti obálky budovy na měrné potřebě tepla na vytápění

Je patrné, že čím menší je vzduchotěsnost objektu, tím větší je měrná tepelná ztráta větráním, která přímo ovlivňuje měrnou potřebu tepla na vytápění. Při splnění doporučeného požadavku, za předpokladu přirozeně větraného objektu, dle ČSN 73 0540-2:2011 [8] je měrná potřeba tepla na vytápění $26,41 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. V případě splnění požadavku Institutu pasivního domu na maximální vzduchotěsnost $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ činí měrná potřeba tepla na vytápění $23,96 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, což činí úsporu potřeby tepla na vytápění o více než 10 %.

V případě nedostatečně vzduchotěsné obálky obvodového pláště, kromě zvýšené energetické náročnosti, hrozí také riziko degradace a zkrácení životnosti samotné konstrukce obvodového pláště. Při proudění vzduchu netěsnostmi dochází nejen k přenosu tepla, ale také vlhkosti. Mezi další negativní důsledky netěsnosti obvodového pláště patří především snížení účinnosti větracího systému, riziko kondenzace způsobené únikem vzduchu z interiéru do exteriéru, degradace konstrukce v místech netěsností, snížení životnosti konstrukce, snížení kvality vnitřního prostředí a zhoršení akustických vlastností. [32]

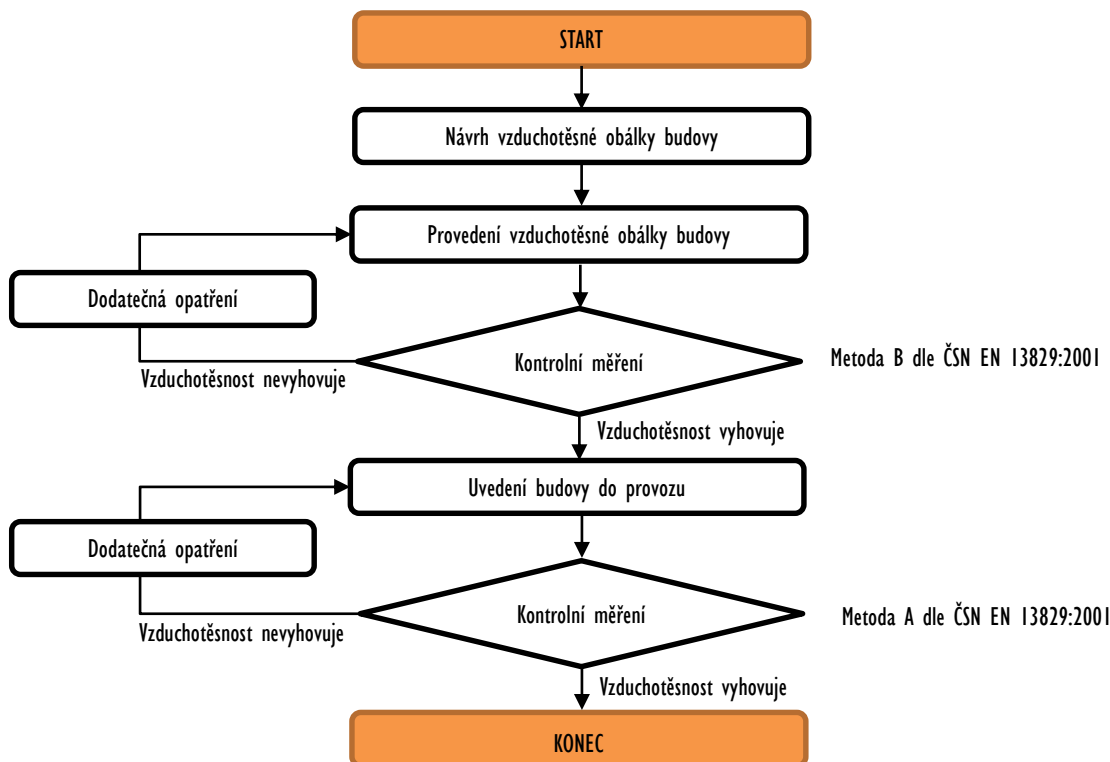
Vnitřní vlhký vzduch vlivem tlakové difference proniká z interiéru skrz netěsnost a spárami do konstrukce obvodového pláště, což může vést ke kondenzaci vodní páry a vzniku plísní. V zimním období difuzní vodní pára proniká skrze netěsnosti z místa o vyšším tlaku (interiér) k místům s nižším tlakem (exteriér). V chladném místě konstrukce dochází k ochlazení pronikající vodní páry a následné kondenzaci. Hromadění kondenzované vody degraduje konstrukce, umožňuje vznik plísní a zhoršuje tepelné vlastnosti konstrukce. Únik vlhkosti skrze netěsnosti obvodového pláště je několikanásobně větší než únik vlhkosti způsobený důsledkem difuze vodních par (Obr. č. 10). [5][13][32]



Obr. č. 10: Riziko šíření vlhkosti a kondenzace v místech netěsností obálky budovy [13]

6 Proces návrhu, realizace a kontroly vzduchotěsnosti budov

K zajištění minimálního nekontrolovatelného úniku skrze netěsnosti obálky budovy je nezbytné věnovat patřičnou pozornost systému vzduchotěsných opatření a to již od samotného návrhu budovy. Vývojový diagram (Obr. č. 11) znázorňuje chronologicky celý proces od návrhu, realizaci až po uvedení do provozu včetně kontrolních měření dle ČSN EN 13829 (2001).



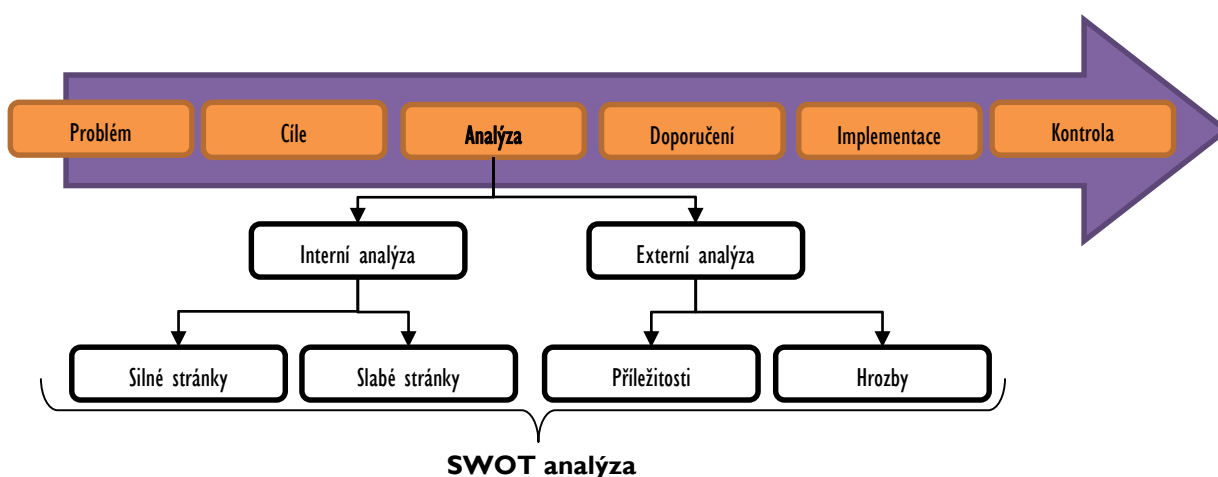
Obr. č. 11: Procesní diagram návrhu, realizace a kontroly vzduchotěsnosti obálky budovy

Prvním krokem procesu je samotná příprava koncepce a kvalitní návrh projektové dokumentace zahrnující adekvátní systém vzduchotěsných opatření. Během fáze návrhu a přípravy projektové dokumentace je nutná koordinace hlavního projektanta s dalšími členy týmu (statik, specialista TZB, technik). Je nezbytné, aby projektant disponoval dostatečnými znalostmi a zkušenostmi principů vzduchotěsnosti budov. Již při samotném návrhu a projekci je žádoucí eliminovat počet složitých napojení či obtížných detailů. [32].

V případě nekvalitního provedení i přes sebelepší koncepci a projektovou dokumentaci nelze zajistit dostatečnou vzduchotěsnost obálky budovy. Pečlivost a důslednost je nezbytná při provádění vzduchotěsné vrstvy obálky budovy. Kvalitní provedení klade vyšší nároky na zkušenosti a dovednosti řemeslníků. Kontrola provedení vzduchotěsné vrstvy se nejčastěji provádí metodou tlakového spádu s externím ventilátorem, jak je uvedeno v kapitole 5.4.

7 SWOT analýza významu vzduchotěsnosti obálky budovy

SWOT analýza je považována za jeden ze základních a velmi významných nástrojů v oblasti strategického plánování a rozhodování. Jedná se o univerzální nástroj zaměřený na nalezení a zhodnocení vnitřních a vnějších faktorů ovlivňující úspěšnost konkrétního procesu či záměru. Samotný název SWOT analýzy je odvoz jako iniciálová zkratka počátečních písmen slov jednotlivých kvadrantů matice: Strengths (silné stránky), Weaknesses (slabé stránky), Opportunities (příležitosti) a Threats (hrozby). [23][36]



Obr. č. 12: Schéma procesu strategického plánování a rozhodování [36]

SWOT analýza jako nástroj strategického plánování a rozhodování byl vyvinut v letech 1960 až 1970 na Standfordském výzkumném institutu (Stanford Research Institute, zkratka SRI) jako výsledek dlouholetého výzkumného úkolu analyzování příčin neúspěchu při plánovacím procesu. Tým odborníků SRI pod vedením Alberta S. Humpreyoho analyzoval příčiny neúspěchu a dělil je do jednotlivých kategorií. Velká obliba metody přispěla k vytvoření celé řady jejich forem a vytvoření adjustovaných metod SWOT analýzy. [23][36]

7.1 Princip analýzy a matice SWOT

SWOT analýza je komplexní metodou kvalitativního hodnocení použitelnou mimo jiné k vyhodnocení daného procesu či situace. SWOT analýzou je možné komplexně vyhodnotit fungování daného procesu, nalézt problémy nebo nové možnosti inovace. V některých případech jsou silné a slabé stránky chápány jako analýza současnosti, příležitosti a hrozby jako analýza dalšího možného vývoje. Ve spojení s marketingem je SWOT analýza součástí



strategického plánování a umožňuje definovat a formovat strategické vize rozvojem silných stránek, eliminací slabých stránek, využitím budoucích příležitostí a vyhnutím se rizikům.

Základ metody spočívá v klasifikaci a kvalitativním hodnocení faktorů ovlivňující daný proces do čtyř základních skupin – silné stránky, slabé stránky, příležitosti a hrozby. Výstup interakcí jednotlivých faktorů sděluje důležité informace charakterizující a hodnotící úroveň vzájemného střetu jednotlivých kvadrantů matice. [23][36]

Silné a slabé stránky jsou orientovány na vnitřní (interní) faktory procesu, jako je výroba, produktivita, účinnost. Silné a slabé stránky jsou faktory, které zvyšují, popř. snižují, interní hodnoty procesu a jsou přímo orientovány na daný proces. Silné a slabé stránky představují faktory, které vytvářejí danou hodnotu procesu. Naproti tomu příležitosti a hrozby zahrnují faktory hodnotící externí prostředí procesu. Externí, respektive globální, faktory nelze samotným procesem ovlivnit, kontrolovat či eliminovat. [23][36]

7.2 Aplikace SWOT analýzy

Tabulka č. 5 znázorňuje provedenou SWOT analýzu významu vzduchotěsnosti energeticky efektivních budov. Z provedené SWOT analýzy jednoznačně vyplývá, že dostatečně vzduchotěsná obálka budovy je důležitou konkurenční výhodou v porovnání se současnou konvenční výstavbou. Důležitost jednotlivých faktorů je vyjádřena pomocí vah (Ω) v každém kvadrantu matice. Suma významnosti v každém kvadrantu matice SWOT musí nabývat hodnoty 1. Čím vyšší číslo váhy, tím vyšší důležitost má daný faktor v daném procesu, a naopak. Tabulka zahrnuje pouze významné faktory z hlediska vzduchotěsnosti budov. Aspekty bez zásadního vlivu nejsou v tabulce uvedeny.

S: Silné stránky	Ω	W: Slabé stránky	Ω
Snížení spotřeby energie budovy	0,4	Zvýšené pořizovací náklady	0,4
Vyloučení kondenzace uvnitř konstrukce	0,3	Potřeba vzduchotechnického zařízení	0,3
Vyloučení vzniku plísní uvnitř konstrukce	0,2	Nutnost průzkumů a měření průvzdušnosti	0,2
Zvýšení životnosti konstrukce	0,1	Finanční náročnost na zaškolení řemeslníků	0,1
O: Příležitosti	Ω	T: Hrozby	Ω
Globální úspora spotřeby energie	0,5	Eskalace obchodní politiky dodavatelů energie	0,8
Globální snížení emisí skleníkových plynů	0,4	Možný pocit stísněnosti a nedýchateľnosti	0,2
Rozvoj a inovace stavebních materiálů a technologií	0,1		

Tab. č. 5: Matice SWOT analýzy významu vzduchotěsnosti energeticky efektivních budov



Nejvýznamnější silnou stránkou kvalitní vzduchotěsné obálky budovy je snížení množství nekontrolovatelného úniku vzduchu a s tím související snížení teplených ztrát objektu a snížení celkové potřeby energie. Zabránění úniku vlhkého vzduchu z interiéru do exteriéru skrze netěsnosti vede k vyloučení kondenzace uvnitř konstrukce (vyjma prostupu vodní páry difuzí a její kondenzace) a k vyloučení vzniku plísní uvnitř konstrukce.

Mezi významné slabé stránky patří především zvýšené provozní náklady na zajištění kvalitního systému vzduchotěsných opatření a pořizovací náklady na systém nuceného větrání se zpětným získáváním tepla. Roční úspora tepla předpokládá návratnost finanční investice v průběhu výstavby v řádech několika let. Mezi další slabé stránky patří zvýšené náklady na školení a kvalifikaci řemeslníků a nutnost provádět kontrolní měření vzduchotěsnosti obálky budovy v průběhu výstavby a po jejím dokončení. V případě absence nedostatečné kvalifikace a řádného provedení se pravděpodobnost výskytu nedostatečně vzduchotěsných detailů a napojení konstrukcí značně zvyšuje.

Z globálního hlediska, energeticky efektivní budovy s kvalitní vzduchotěsnou obálkou představují pozitivní externalitu z hlediska zvyšování energetické účinnosti sektoru budov a snižování produkce emisí skleníkových plynů. Potřeba degradace spotřeby energie a produkce skleníkových plynů vede k rozvoji a inovaci nových stavebních materiálů a technologií s lepšími tepelně – technickými a vlhkostními vlastnostmi.

S globální snižováním spotřeby energie v sektoru budov lze očekávat eskalaci a ofenzivní obchodní politiku mezi jednotlivými výrobci a dodavateli energií. Kvalitní vzduchotěsné prostory mohou především u velmi citlivých jedinců vyvolávat pocity stísněnosti a nedýchatelnosti.

Matice SWOT (Tab. č. 5) byla sestavena na základě odborných diskuzí na téma problematiky vzduchotěsnosti energeticky efektivních budov na mezinárodních a tuzemských konferencích.



8 Determinace faktorů vzduchotěsnosti budov

Kontinuální zvyšování nároků na zvyšování energetické výkonnosti budov, snižování spotřeby energie především z neobnovitelných zdrojů a omezení produkce emisí skleníkových plynů hrají pro kvalitní vzduchotěsnou obálku budovy důležitou roli.

Hlavním cílem disertační práce je analýza a deskripce faktorů determinujících výslednou vzduchotěsnost obálky energeticky efektivních budov. Analýza determinujících faktorů vzduchotěsnosti obálky budovy je provedena na výběrovém souboru energeticky pasivních domů, reprezentujících energeticky efektivní budovy. Energeticky pasivní domy jsou svými přísnými požadavky na tepelně technické vlastnosti a stavební parametry vhodnou volbou pro analyzování determinujících faktorů vzduchotěsnosti obálky budov. Kvalita provedení ve všech fázích výstavby od prvotní koncepce, návrh, projektovou dokumentaci, realizaci až po závěrečnou kontrolu, hraje významnou roli z hlediska vzduchotěsnosti obálky budovy.

Výsledky analýz a klasifikace determinačních faktorů mohou být následně využity pro predikci vývoje vzduchotěsnosti obálky budov v závislosti na daných parametrech (např. materiálová charakteristika, konstrukční systém, počet podlaží objektu, atd.). Získané výsledky budou komparovány s výsledky výzkumů zaměřených na vzduchotěsnost obálky budov prováděných v zahraničí (viz kapitola 8.1 Výzkum vzduchotěsnosti obálky budovy u nás a v zahraničí).

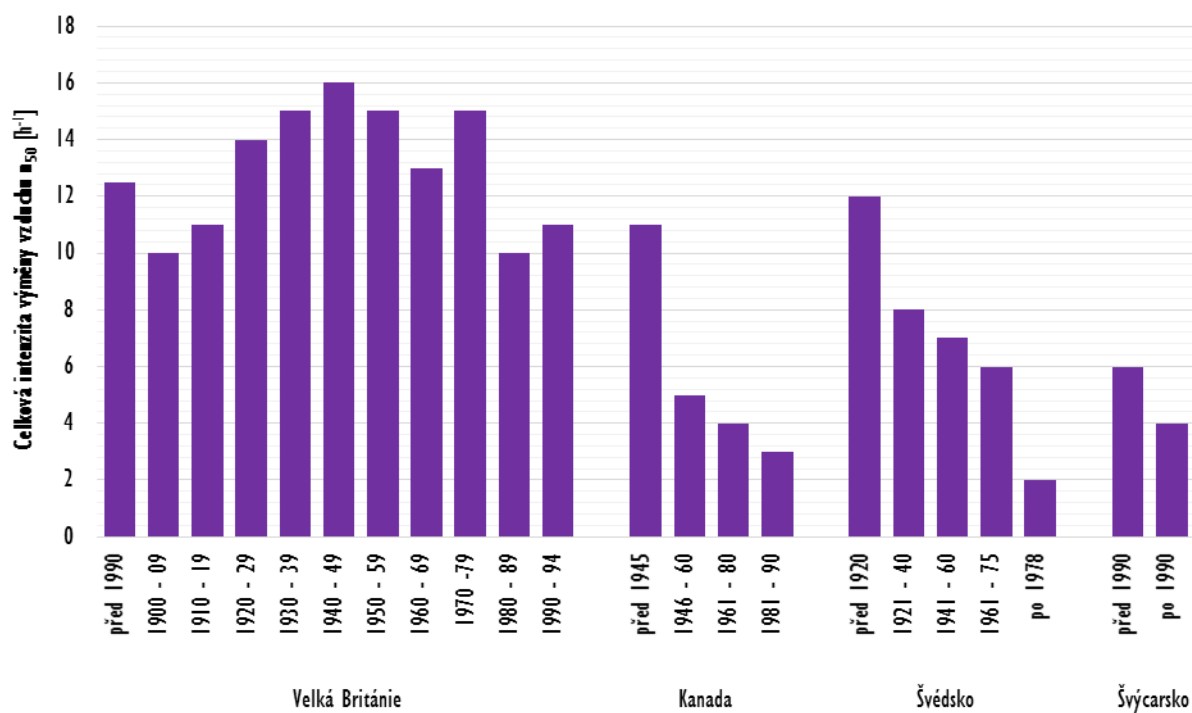
8.1 Výzkum vzduchotěsnosti obálky budovy u nás a v zahraničí

V České republice se problematice vzduchotěsnosti budov věnuje zvýšená pozornost přibližně od roku 2005. Do té doby byl nekontrolovatelný únik vzduchu z interiéru považován za problém pouze okenních spár a styků stavebních dílců. Vzhledem k tomu, že dosažení doporučených hodnot celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50,N}$ není přímo požadováno, ale pouze doporučeno, tak ne zcela každá budova v České republice má změřenou hodnotu celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} při tlakovém rozdílu 50 Pa. Zvýšený zájem o měření vzduchotěsnosti energeticky pasivních domů vyvolal až v roce 2009 program Ministerstva životního prostředí České republiky Zelená úsporám, který je zaměřen na využití obnovitelných zdrojů a úsporu energie v budovách. Program Zelená úsporám stanovil podmínky, kdy je možné požádat o dotaci v případě výstavby energeticky pasivního domu. Jednou z mnoha podmínek je také požadavek na dosažení celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50} = 0,60 \text{ h}^{-1}$, jak stanovuje, TNI 73 0329 (2009) pro výstavbu energeticky pasivního domu.



Oproti České republice je v zahraničí výzkum vzduchotěsnosti obálky realizován již několik desítek let. Ze zemí v nichž byl výzkum vzduchotěsnosti prováděn či stále probíhá, stojí za zmínku například Kanada, USA, Švédsko, Norsko, Velká Británie, Francie či Estonsko.

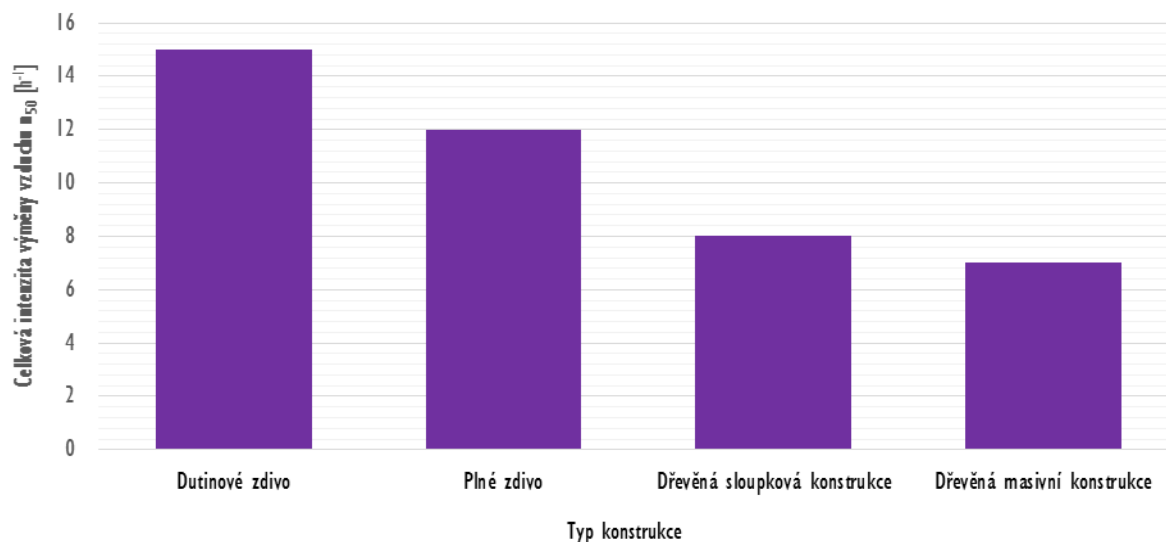
Dosavadní analýzy a výzkumy prokázaly, že vzduchotěsnost obálky budovy je do určité míry ovlivněna dobou výstavby. V zemích, kde byly zavedeny požadované hodnoty vzduchotěsnosti obálky budovy (např. Švédsko, Norsko či Švýcarsko) je patrný rozdíl ve vzduchotěsnosti obálky budovy nové výstavby se srovnáním se starou původní výstavbou. Naproti tomu ve Velké Británii, kde vzduchotěsnost není striktně vyžadována, neexistuje žádný rozdíl mezi vzduchotěsností obálky nových budov a budov původních. Graf č. 5 znázorňuje výsledky měření vzduchotěsnosti budov v závislosti na době výstavby v různých zemích. [19]



Graf č. 5: Vliv doby výstavby na vzduchotěsnost [19]

Dalším faktorem, který dle dosavadních průzkumů ovlivňuje výslednou vzduchotěsnost obálky budovy, je konstrukční typ budovy. Z výsledků měření a výzkumů je patrné, že některé typy konstrukcí a stavebních materiálů mají tendenci být vzduchotěsnější než jiné. Zděné a betonové konstrukce ze statistického hlediska dosahují vyšší míry vzduchotěsnosti ve srovnání s dřevěnými konstrukcemi. Výsledky šetření jsou odvezeny na souboru domů realizovaných ve Švédsku a Norsku. [33] Naopak, výzkumy ve Velké Británii prokázaly, že drážkované zdivo s dutinami dosahuje vyšších hodnot průvzdušnosti obvodového pláště než

zdivo plné. Dřevěné konstrukce jsou těsnější, než konstrukce zděné. Graf č. 6 znázorňuje výsledky šetření vlivu typu konstrukce na vzduchotěsnosti obvodového pláště ve Velké Británii. [19]



Graf č. 6: Vliv typu konstrukce na vzduchotěsnost obvodového pláště [19]

Také počet podlaží budovy, tzv. podlažnost objektu, ovlivňuje průvzdušnost obvodového pláště budovy. Výzkum prováděný ve Spojených státech na téměř 13 000 objektech prokázal, že pro vícepodlažní objekty je míra průvzdušnosti vyšší než u budov jednopodlažních. Ke stejnému závěru došli také vědci v Kanadě. Vyšší průvzdušnost obvodového pláště vícepodlažních budov je přisuzována vyšším tlakovým účinkům větru a větší síle „komínového efektu“. [41]

Za jeden z nejvýznamnějších vlivů na výslednou vzduchotěsnost obálky budovy se značí poloha a kontinuita hlavní vzduchotěsné vrstvy. Ve Velké Británii není běžnou stavební praxí věnovat zvýšenou pozornost detailům a problematickým místům. Konstrukční výkresy běžně neobsahují informace a řešení umístění systému vzduchotěsných opatření a zajištění jejich kontinuity. Nedostatek podrobností v projektové dokumentaci má za následek realizaci stavby s nepříznivým vlivem na vzduchotěsnost budovy. [19]

Mezi další faktory, které byly předmětem zájmu a zkoumání z hlediska průvzdušnosti obvodového pláště budov patří velikost objektu, komplexnost obálky budovy, životnost a trvanlivost stavebních materiálů a materiálů systému vzduchotěsných opatření, kombinace různých konstrukčních řešení, kvalita provedení a důslednost stavebního dozoru. [19]



8.2 Diagram příčin a následků

Cílem diagramu příčin a následků je získat komplexní a ucelený náhled na nejpravděpodobnější příčiny řešeného problému. Diagram příčin a následků byl popsán a zaveden Karou Ishikawa v 60. letech minulého století a je podle něj také někdy nazýván jako Ishikawa diagram. Pro své grafické zpracování je velmi často označován jako rybí kost (fishbone). Diagram příčin a následků se řadí mezi metody analýz kořenových příčin daného rizika. Celý princip analýzy příčin a následků je založen na axiomu, že každý následek (problém) má svou příčinu nebo kombinaci příčin. Výsledkem Ishikawa diagramu není řešení daného problému, nýbrž přehledné seřazené potencionálních příčin, jevů a vlivů. [17] [22] [25]

8.2.1 Princip Ishikawova diagramu

Princip Ishikawa diagram je založen na předpokladu, že každý výsledek (následek) má své příčiny. Diagram příčin a následků nám umožní definovat všechny potencionální i velmi málo pravděpodobné hrozby a příčiny problému. Samotný princip diagramu je velmi jednoduchý a snadný. „Hlava rybí kosti“ představuje následek nebo řešený problém. Na páteř navazují hlavní kategorie příčin. Existuje nespočet variant kategorizace příčin. Nejčastěji používaná kategorizace příčin je označována 6M. Dále jsou velmi často používány kategorizace příčin 4P, 8P, 4S 3M&P. Názvy kategorizací příčin jsou označovány podle prvních písmen daných kategorií. Kategorizace příčin 6M rozděluje příčiny do 6 základních obecných kategorií:

- **machine** (stroje a technologie),
- **method** (metody),
- **materials** (materiál),
- **measurement** (měření),
- **man** (lidé),
- **mother nature** (prostředí). [17] [22] [25]

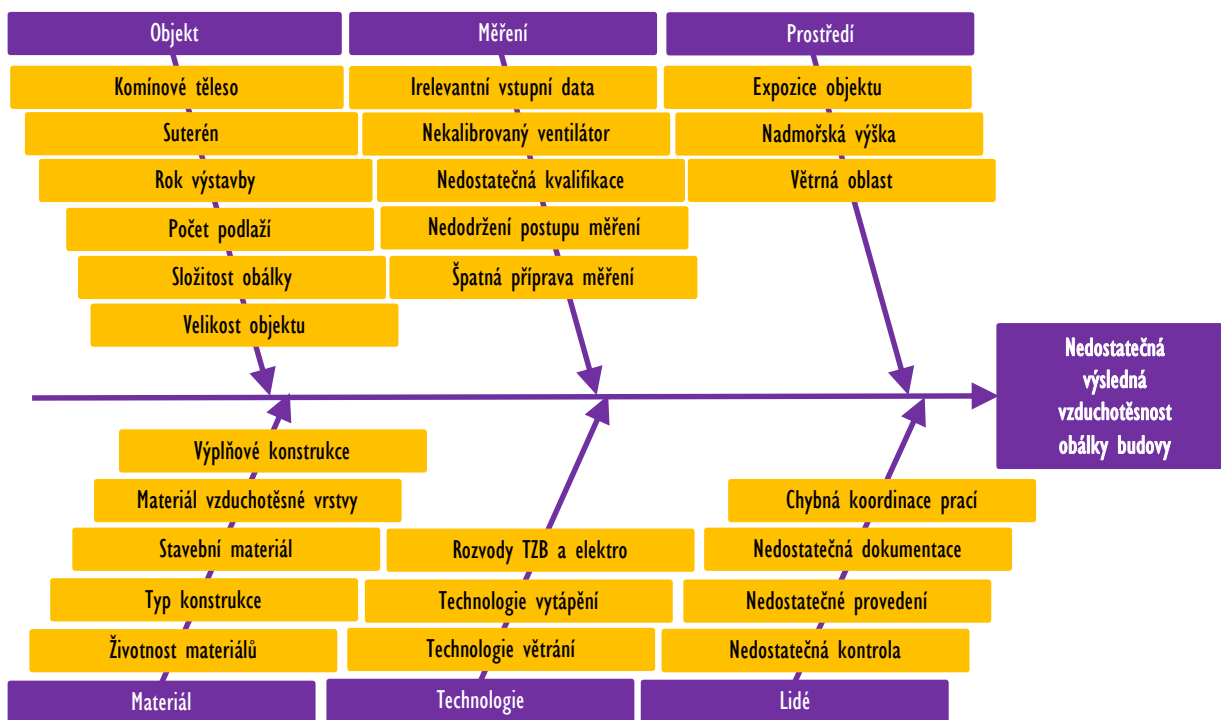
Pro definování potencionálních vlivů a příčin je vhodné využít zejména skupinové sezení, tzv, brainstorming. Každou potencionální příčinu, jev či vliv je nutné zařadit do správné základní kategorie. Jednotlivé kategorie příčin je možné dále větvit na podkategorie příčin (tzv. sub-příčiny), čímž se vytváří charakteristická rybí kost (fishbone). Pro přehlednost diagramu není vhodné vytvářít kategorie sub-příčin o třetí a vyšší třídě. [25]

8.2.2 Analýza příčiny a následků nedostatečné vzduchotěsnosti obálky budovy

V našem případě je problém charakterizován nedostatečnou výslednou vzduchotěsností obálky budovy. Na obrázku č. 13 je znázorněn diagram příčin a následků zobrazující potenciační determinální faktory, vlivy a jevy nedostatečné vzduchotěsnosti obálky budovy. Se základními principy bylo stanoveno 6 základních kategorií potenciačních příčin, jevů a vlivů ovlivňujících výslednou vzduchotěsnost obvodového pláště vycházejících z kategorizace 6M:

- objekt,
- materiál,
- měření,
- technologie,
- prostředí,
- lidé.

Pro vybrané oblasti byly následně určeny potenciační faktory negativně ovlivňující průvzdušnost obvodového pláště dle dosavadních výsledků výzkumů v České republice i v zahraničí ([19] [32][33][41]).



Obr. č. 13: Ishikawa diagram nedostatečné výsledné vzduchotěsnosti obálky budovy



Rok výstavby, podlažnost a velikost objektu, složitost a komplexnost obálky budovy do existence suterénu či komínu jsou faktory, které dle dosavadních zahraničních výzkumů mohou mít potenciaální vliv na konečnou vzduchotěsnost objektu.

Dosavadní zahraniční výzkumy [19][33] prokázaly rozdíly v závislosti na materiálovém řešení. Konstruktivní typ, hlavní stavební materiál či materiál vzduchotěsné vrstvy může mít potenciaální vliv na konečnou výslednou vzduchotěsnost obálky budovy.

Pro zajištění vysoké míry vzduchotěsnosti obvodového pláště je žádoucí, aby se minimalizovalo množství prostupů, výklenků a drážek pro instalace rozvodů a TZB. Pro vytápění a větrání je vhodné umístit moderní technologické systémy. Nejnovější větrací systémy se zpětným získáváním tepla (rekuperátory) dosahují účinnosti až 90 %. Mechanické nucené větrání zajišťuje dostatečný přísun čerstvého vzduchu s minimálními tepelnými ztrátami i ve vysoce vzduchotěsných stavbách.

Kvalita v každém kroku procesního diagramu (obr. 11) je nedílným předpokladem dostatečně vzduchotěsné obálky budovy. Důslednost, zručnost a zkušenosti jsou nezbytné v každé fázi od projektanta, realizátora až po samotného technika provádějící měření. Chybná či nedostatečná komunikace mezi jednotlivými subjekty procesu (projektant, realizátor, technik TZB, ...) značně zvyšuje pravděpodobnost nedostatečné výsledné vzduchotěsnosti obálky budovy.

Prostředí budovy nemá přímý vliv na vzduchotěsnost objektu. Ovšem expozice budovy, nadmořská výška a větrná oblast mají významný vliv na tlakové účinky, které ovlivňují množství vzduchu proudícího skrze netěsnosti v obálce budovy. [32]

Nedostatečná vzduchotěsnost zapříčiněná špatným či nepřesným měřením nemá žádný vliv na průvzdušnost obvodového pláště. Špatný či nepřesný výsledek měření může mít negativní dopad na přiznání dotací či nepřesné výsledky energetických výpočtů náročnosti budovy.



8.3 Vyhodnocení diagramu příčin a následků

Identifikování potenciálních příčin daného problému je prvním krokem komplexní analýzy příčin. Sestavený diagram příčin a následků nám udává přehledný a kategorizovaný seznam příčin daného problému. Přehledný souhrn všech potenciálních příčin, jevů a vlivů umožňuje daný problém či nedostatek důkladně analyzovat a následně navrhnout potřebná opatření.

Pro vyhodnocení a zjištění míry příčin je možné využít skupinovou diskuzi. K vyhodnocení nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících vzduchotěsnost obálky budovy bylo osloveno 5 expertů s několikaletou praxí v oblasti měření průvzdušnosti obvodového pláště metodou Blower Door Test. Experti každou potenciální oblast příčiny či sub příčiny ohodnotí dle předpokládaného významu od 1 do 5 bodů, přičemž 1 značí žádný nebo minimální vliv a 5 vliv maximální. Tabulka č. 6 představuje výsledky oslovených expertů a ohodnocení potenciálních příčin dle významnosti na výslednou vzduchotěsnost obálky budovy. Celková váha významnosti jednotlivých sub-příčin je dána součtem součinnů významnosti sub-příčiny a významností obecné příčiny všech oslovených expertů. K determinaci podstatných faktorů je vhodné využít Paretovu analýzu.

8.3.1 Paretova analýza

Paretova analýza neboli Paretův diagram představuje specifický typ histogramu, který identifikuje a determinuje prioritní příčiny od příčin nepodstatných. Cílem Paretovy analýzy je definovat malý počet faktorů, které se největší měrou podílejí na daném následku, v našem případě nedostatečné výsledné vzduchotěsnosti obálky budov. [23][46]

Koncem 19. století ekonom, sociolog a politolog Vilfredo Frederico Pareto (1848 – 1923) prohlásil hypotézu, že 80 % národního bohatství Itálie je v majetku 20 % obyvatelstva. Doktor Joseph Duran upravil hypotézu a vytvořil pravidlo označované jako Paretův princip: 80 % problémů pramení z 20 % příčin. Později byl Paretův princip zkrácen pouze na Paretovo pravidlo nerovnováhy 80/20. [23][46]

V první části Paretovy analýzy je nutné uspořádat seřadit prosté absolutní četnosti potenciálních příčin významnosti od největšího po nejmenší. Uspořádané četnosti se následně vynesou v grafu podle největšího významu. Lorenzova kumulativní křivka vznikne součtem relativních četností potenciálních příčin. Následně z Lorenzovy křivky odečteme



hodnotu 80 % a spustíme svislou pomyslnou dělicí přímkou, která dělí příčiny na podstatné a nepodstatné. Popřípadě je možné zvolit jiný procentuální podíl (např. Pravidlo 50/50). Podstatným faktorům, vlivům a jevům je vhodné věnovat zvýšenou pozornost.

Příčiny	Expert I		Expert II		Expert III		Expert IV		Expert V		Σ
	Ω	Σ	Ω	Σ	Ω	Σ	Ω	Σ	Ω	Σ	
Objekt	Váha významnosti kategorie příčiny: 3										
Velikost objektu	3	9	3	9	2	6	4	12	2	6	42
Složitost objektu	5	10	4	12	3	9	3	9	3	9	49
Počet podlaží	2	6	2	6	2	6	2	6	2	6	30
Rok výstavby	4	12	2	6	1	3	4	12	2	6	39
Suterén	2	6	1	3	3	9	1	3	5	15	36
Kominové těleso	2	6	4	12	2	6	2	6	5	15	45
Materiál	Váha významnosti kategorie příčiny: 4										
Typ konstrukce	3	12	5	20	2	8	3	12	5	20	72
Stavební materiál	4	16	4	16	3	12	5	20	5	20	84
Materiál vzduchotěsné vrstvy	5	20	3	12	5	20	5	20	5	20	92
Životnost materiálů	3	12	2	8	4	16	5	20	5	20	76
Výplňové konstrukce	5	20	1	4	5	20	4	16	5	20	80
Technologie	Váha významnosti kategorie příčiny: 2										
Technologie větrání	5	10	3	6	3	6	3	6	4	8	36
Technologie vytápění	4	8	1	2	2	4	2	4	2	4	22
Rozvody TZB a elektro	3	6	4	8	2	4	2	4	5	10	32
Lidé	Váha významnosti kategorie příčiny: 5										
Nekvalitní návrh (projektant)	4	20	4	20	3	15	3	15	3	15	85
Nekvalitní provedení (realizátor)	5	25	5	25	5	25	5	25	5	25	125
Nedostatečná kontrola (měření Blower Door Test)	3	15	5	25	5	25	3	15	1	5	85
Chybná koordinace prací	2	10	3	15	3	15	5	25	5	25	90
Měření	Váha významnosti kategorie příčiny: 1										
Irelevantní vstupní data (velikost objektu, ...)	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	23
Nekalibrovaný ventilátor	2	2	1	1	1	1	1	1	5	5	10
Nedostatečná kvalifikace měřícího technika	5	5	2	2	4	4	1	1	3	3	15
Nedodržení postupu měření dle ČSN EN 13829	5	5	3	3	3	3	1	1	3	3	15
Špatná příprava měření	4	4	2	2	5	5	1	1	3	3	15
Prostředí	Váha významnosti kategorie příčiny: 1										
Expozice objektu	4	4	2	2	2	2	3	3	1	1	12
Nadmožská výška	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	7
Větrná oblast	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	8
Legenda:	1 žádný nebo bezvýznamný vliv - 5 maximální vliv										1225

Tab. č. 6: Výsledy skupinové diskuze a váhové hodnocení potencionálních příčin

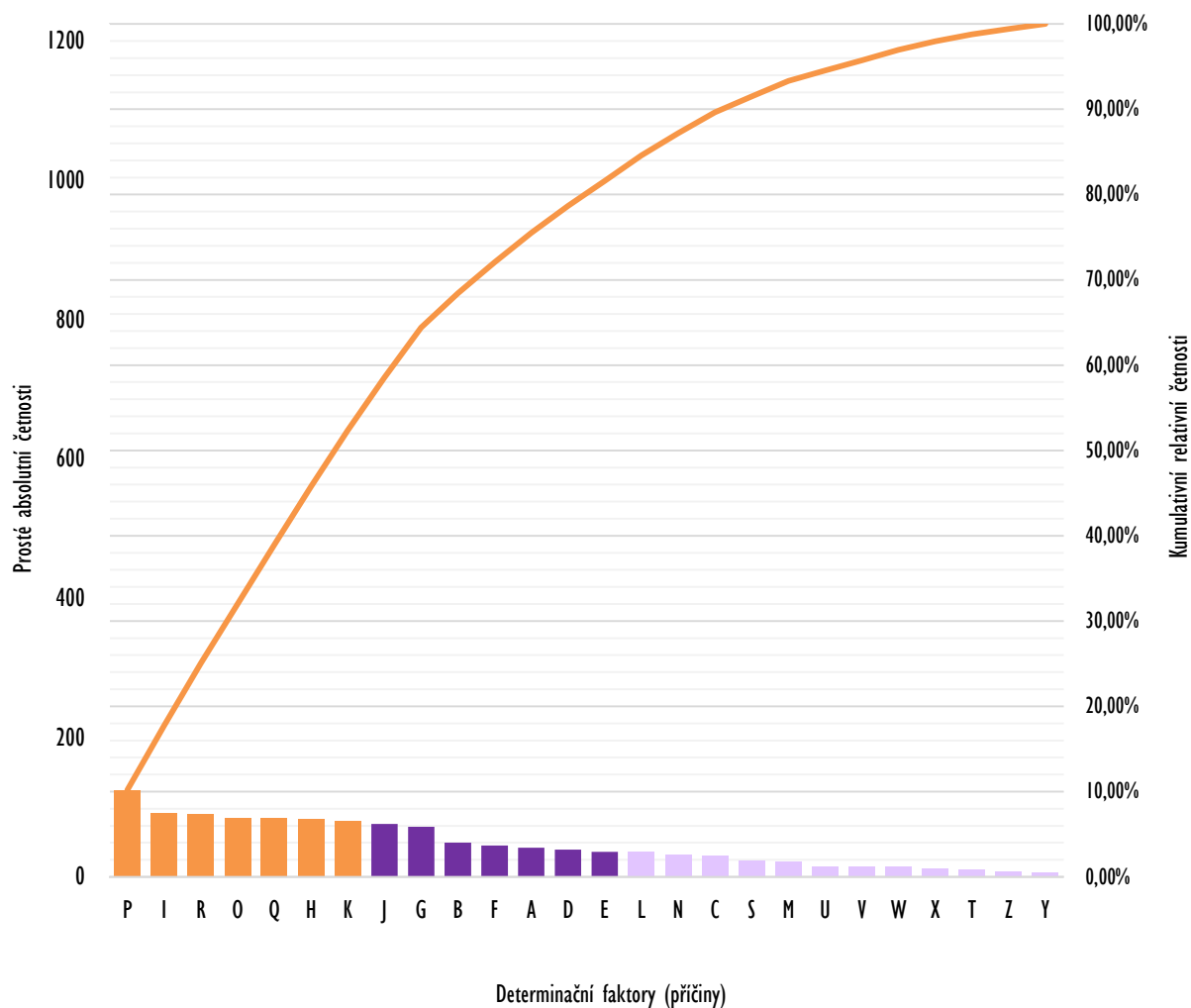


Slovní komentář popisující výsledky Paretovy analýzy je součástí samotného vyhodnocení disertační práce. Výsledky Paretovy analýzy budou komparovány s výstupy statistického šetření determinačních faktorů vzduchotěsnosti obálky budovy.

Graf č. 7 reprezentuje výsledky Paretovy analýzy. Je patrné, že mezi podstatné příčiny vzduchové těsnosti obálky budovy dle Paretova optima 80:20 patří P, I, R, O, Q, H, K, J, G, B, F, A, D a E. Vzhledem k rozsáhlému počtu příčin je vhodné aplikovat přísnější 50% adjustované pravidlo determinace podstatných příčin. V tomto případě lze hlavní příčiny omezit na P, I, R, O, Q, H a K.

Výsledek Ishikawa diagramu a Paretovy analýzy jednoznačně označuje za hlavní příčinu nedostatečné vzduchotěsnosti obálky budovy kategorii „lidé“. Lidé jsou v počtu podstatných příčin zastoupeni z více než 50 %. Hlavní příčinou je označeno nekvalitní provedení (realizátor). Další významnou skupinou ovlivňující problém nedostatečné vzduchotěsnosti představuje kategorie „materiál“. Z dotazníkového šetření jednoznačně vyplývá, že problém vzduchotěsnosti spočívá v nekvalitním stavebním materiálu a v realizaci samotného objektu. Kvalita realizace vzduchotěsné vrstvy a celého objektu je ovšem prakticky velmi obtížně verifikovatelná.

Závěrem je důležité upozornit na fakt, že Paretova analýza je vytvořena na základě dotazníkového šetření distribuovaném mezi experty z oblasti vzduchotěsnosti. Dotazníkové šetření je ovšem nutné považovat za značně subjektivní a k objektivizované hodnotě se pouze přibližuje. Z tohoto důvodu se autor disertační práce rozhodl, že výsledky Paretovy analýzy lze považovat pouze za hypotézy, které je nutno ověřit relevantními statistickými testy. Z tohoto důvodu jsou v následujících kapitolách statisticky verifikovány také příčiny, které nebyly Paretovou analýzou označeny za podstatné. Lze konstatovat, že Ishikawa diagram a Paretova analýza nepřinesla relevantní výsledky determinující problém nedostatečné výsledné vzduchotěsnosti obálky budovy.



Ozn.	Příčina	Kum. četnosti	Ozn.	Příčina	Kum. četnosti
P	Nekvalitní provedení (realizátor)	10,20 %	E	Suterén	81,63 %
I	Materiál vzduchotěsné vrstvy	17,71 %	L	Technologie větrání	84,57 %
R	Chybná koordinace prací	25,06 %	N	Rozvody TZB a elektro	87,18 %
O	Nekvalitní návrh (projektant)	32,00 %	C	Počet podlaží	89,63 %
Q	Nedostatečná kontrola (měření Blower Door Test)	38,94 %	S	Irelevantní vstupní data (velikost objektu, ...)	91,51 %
H	Stavební materiál	45,80 %	M	Technologie vytápění	93,31 %
K	Výplňové konstrukce	52,33 %	U	Nedostatečná kvalifikace měřícího technika	94,53 %
J	Životnost materiálů	58,53 %	V	Nedodržení postupu měření dle ČSN EN 13829	95,76 %
G	Typ konstrukce	64,41 %	W	Špatná příprava měření	96,98 %
B	Složitost objektu	68,41 %	X	Expozice objektu	97,96 %
F	Komínové těleso	72,08 %	T	Nekalibrovaný ventilátor	98,78 %
A	Velikost objektu	75,51 %	Z	Větrná oblast	99,43 %
D	Rok výstavby	78,69 %	Y	Nadmořská výška	100,00%

Graf č. 7: Paretova analýza a Lorenzova křivka



9 Sběr a zdroje dat

Kvalita dat je rozhodujícím atributem pro reprezentativní výsledky analýz a vyvození závěrů. Obecně platí, že jaká je kvalita dat, tak kvalitní jsou výsledky analýzy. Nejdokonalejší statisticko-matematické postupy nejsou schopny exportovat z nekvalitních dat relevantní výstupy. Za velmi důležitou je nutno považovat první fázi analytických postupů, tedy samotný sběr dat. Za kvalitní lze považovat data v požadovaném formátu, množství a struktuře.

Celkový výběrový soubor zastupuje výběr 150 energeticky efektivních budov. Energeticky efektivní budovy jsou reprezentovány realizovanými energeticky pasivními domy v České republice, u kterých bylo provedeno měření průvzdušnosti Blower Door Test a u kterých jsou známy základní údaje o lokalitě, velikosti materiálovém a konstrukčním řešení.

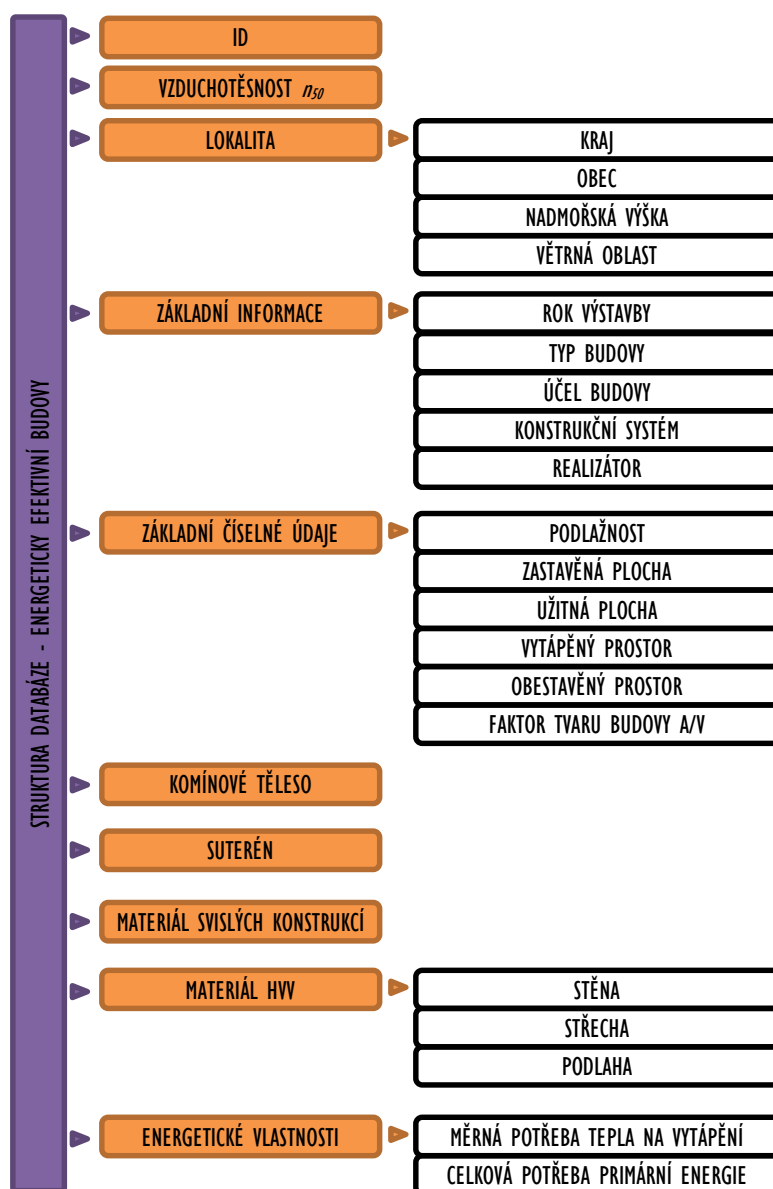
S primárními daty se počítá pouze okrajově z důvodu velké časové náročnosti vlastního měření a omezeného počtu vhodných energeticky efektivních budov v okolí. Zdrojem vstupních dat jsou data sekundární. Hlavním zdrojem dat pro výběrový soubor je databáze Centra pasivního domu [5], která v současné době spravuje největší aktualizovaný katalog pasivních budov v České republice. Databáze obsahuje kompletní technické údaje o realizovaných energeticky pasivních objektech.

Sekundární data jsou vhodná zpravidla pro snadnou dostupnost již při zahájení řešení samotného výzkumu. Dále nejsou ve srovnání s primárními daty časově ani finančně náročné. Jejich nevýhodou je, že ne všechny řešené proměnné jsou dostupné a nelze ověřit jejich přesnou metodiku získání. Správnost dat je těžké hodnotit. Pro vyloučení zkreslení údajů, zajištění validity a reliability je pro výběrový soubor zdrojem pouze jedna externí databáze.

Pro případ zpřesnění a zvýšení statistické validity a reliability dat je datová základna doplněna o výstupy měření Blower Door testu z měření prováděné techniky Fakulty stavební, VŠB – TUO. Primární data jsou využita pouze v omezení míře z důvodu značné finanční a časové náročnosti. Primární data byla získána za finanční podpory projektu studentské grantové soutěže SP2012/31 Diagnostika vzduchotěsnosti budov s využitím statistických metod řízení kvality a SP2013/27 Determinační faktory vzduchotěsnosti energeticky efektivních budov.

Vstupní data jsou přehledně uspořádána v datovém souboru obsahující ucelenou informaci o množině všech sledovaných parametrů pro jednotlivé objekty. Vstupní data (výběrový soubor) je součástí disertační práce v Příloze č. 1.

Databáze dat (Obr. č. 14) je navržena tak, aby klasifikovala veškeré důležité faktory s ohledem na vzduchotěsnost obálky budovy.



Obr. č. 14: Struktura testované databáze – vstupní data



10 Základy statistických metod a testování hypotéz

Statistika je v současnosti standardním nástrojem, bez kterého se současné vědecké a technické obory neobejdou. Statistické a analytické nástroje umožňují vyhodnotit naměřené či jinak empiricky získané údaje a interpretovat výsledky. Statistické metody je dnes již běžné aplikovat ve všech oblastech výzkumu. K modernímu řízení a vyhodnocování veškerých procesů neodmyslitelně patří vyhodnocování situací za pomoci statistických a analytických nástrojů. [2][35][44][48]

V průběhu 20. století bylo vyvinuto a zavedeno nespočet specifických metod a nástrojů statistického aparátu. Statistické metody jsou zpravidla založeny na výběrovém šetření náhodného výběru. Při výběrovém šetření se volí pouze část z celkové populace a na jejím základě se odvozují informace platné pro celou populaci. Návrh výběrového souboru a samotného statistického šetření musí být vybrán velmi pečlivě a důsledně. [2][35][44][48]

V současné době lze pro statistické testování a vyhodnocování využít celou řadu statistických editorů. Pro statistické šetření je v rámci disertační práce využit statistický editor IBM SPSS Statistics verze 20. Software SPSS nabízí komplexní sadu nástrojů pro analýzu a predikci dat. Statistický editor poskytuje základní funkce potřebné pro komplexní zpracování a analýzu dat. Nabízí klíčové funkce pro rychlý přehled dat, formulování hypotéz pro následující testování, analýzu interakcí mezi testovanými proměnnými, identifikaci trendů a formulování predikcí. Software SPSS Statistics také zahrnuje simulaci a modelování výsledků. [15][16] Pro jednoduché statistické testování v disertační práci je využit tabulkový editor MS Office s rozšiřujícím balíčkem Analýza dat [28].

Při statistickém šetření se využívají dva základní druhy statistiky – popisná (exploratorní) statistika a interferenční statistika. Exploratorní statistika zpracovává vstupní data a sumarizuje je pomocí jednoduchých veličin, tabulek a grafů. Cílem popisné statistiky je analyzovat základní strukturu dat, extrahovat důležité informace o proměnných, detekovat odlehle a extrémní hodnoty a připravit hypotézy pro následné ověření či zamítnutí. Na rozdíl od deskriptivní statistiky, která přehledným a jednoduchým způsobem prezentuje souhrnná data, interferenční statistika se zaměřuje na modelování a predikci závěrů platných pro celý výběrový soubor. Typickým příkladem interferenční statistiky je ověření, zda má jedna proměnná statisticky významný vliv na další proměnnou. Mezi nejčastěji používané metody patří korelace, test nezávislosti nebo analýza rozptylu (ANOVA). [2][35][44][48]



10.1 Klasifikace determinovaných proměnných

V matematických a statistických vědách je proměnná označení pro identifikátor reprezentující libovolnou hodnotu z dané třídy. V moderních statistických nástrojích hrají proměnné klíčovou roli při formulaci hypotéz a jejich ověřování. Laicky řečeno, proměnná je libovolná kvantitativní či kvalitativní hodnota z předem dané oblasti dat. [2][35] [48]

Při statistickém šetření je důležité vždy věnovat zvýšenou pozornost typu pozorovaných proměnných. Určení správného typu proměnné je zásadní pro vybrání vhodného nástroje statistického aparátu. Při výběru nevhodné metody z hlediska typu proměnných nelze očekávat spolehlivost prováděného statistického šetření. Proměnné lze rozdělit na dva základní typy podle hodnoty, které nabývají:

- **proměnná kvalitativní,**
- **proměnná kvantitativní.** [2]

Kvalitativní proměnné jsou vyjádřeny slovně a dle vztahu mezi jednotlivými hodnotami je lze následně rozdělit na následující podskupiny:

- **proměnná nominální** (jmenovitá) nabývá rovnocenných variant, které nelze porovnat ani seřadit (např. konstrukční typ – lehká, masivní nebo kombinovaná konstrukce),
- **proměnná ordinální** (pořadová), u níž lze k jednotlivým variantám přiřadit pořadí a vzájemně porovnávat či seřadit (např. třída větrné oblasti). [2]

Dalším způsobem členění kvantitativních proměnných je dělení dle počtu variant, jichž proměnné mohou nabývat:

- **proměnná alternativní** nabývá pouze dvou různých variant (např. výskyt komínu – ano či ne),
- **proměnná množná** nabývá více než dvou různých variant (např. materiál HVV – parozábrana, OSB desky, vnitřní omítky). [2]

Proměnné kvantitativní (numerické) jsou někdy také označovány jako proměnné kardinální. Kvantitativní proměnné jsou vyjádřeny číselně a lze je dále členit:

- **proměnná diskrétní** nabývá konečného nebo spočetného množství variant (např. počet podlaží objektu),



- **proměnná spojitá** (metrická) nabývá libovolné hodnoty z oboru reálných čísel nebo z nějaké podmnožiny oboru reálných čísel (např. nadmořská výška, užitná plocha). [2]

V případě, že diskrétní proměnná nabývá konečného počtu variant, je proměnná označována jako diskrétní konečná. Nabývá-li početného množství variant, označujeme proměnnou jako proměnnou diskrétní spočetnou.

Tabulka č. 7 zahrnuje klasifikaci proměnných analyzovaného výběrového souboru energeticky pasivních budov. Každý vyšetřovaný ukazatel obsahuje typ proměnné a hodnoty, kterých nabývá.

Název	Typ proměnné	Hodnoty proměnné výběrového souboru
Vzduchotěsnost v n_{50}	Kvantitativní spojitá proměnná	<0,05; 1,00>
Kraj	Kvalitativní nominální proměnná	PHA, STČ, JHČ, PLK, KVK, ULK, LBK, HKK, PAK, VYS, JHM, OLK, ZLK, MSK
Obec	Kvalitativní nominální proměnná	Praha, Plzeň, Rychnov, Rajhrad, Hradčany, Proseč, ...
Nadmořská výška	Kvantitativní spojitá proměnná	<158,00; 723,00>
Větrná oblast	Kvalitativní ordinální proměnná	I, II, III, IV, V
Rok výstavby	Kvalitativní ordinální proměnná	2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014
Typ budovy	Kvalitativní nominální proměnná	Rodinný dům, Administrativní budova, Řadový rodinný dům
Účel budovy	Kvalitativní nominální proměnná	Bydlení, administrativa, vzdělávání, ...
Konstrukční systém	Kvalitativní nominální proměnná	Lehký (1), masivní (2), kombinovaný (3)
Realizátor	Kvalitativní nominální proměnná	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Podlažnost	Kvalitativní ordinální proměnná	Jedno-podlažní (1), dvou-podlažní (2), 3 a více podlaží (3)
Zastavěná plocha	Kvantitativní spojitá proměnná	<62,70; 1743,00>
Užitná plocha	Kvantitativní spojitá proměnná	<78,60; 1267,00>
Vytápěný prostor	Kvantitativní spojitá proměnná	<214,80; 723,00>
Obestavěný prostor	Kvantitativní spojitá proměnná	<280,70; 5564,00>
Faktor tvaru budovy A/V	Kvantitativní spojitá proměnná	<0,35; 1,15>
Ochlazovaná obálka budovy	Kvantitativní spojitá proměnná	<131,93; 3705,00>
Komínové těleso	Kvalitativní nominální proměnná	Ano (1), ne (0)
Suterén	Kvalitativní nominální proměnná	Ano (1), ne (0)
Materiál stěny	Kvantitativní nominální proměnná	Lehký dřevěný skelet, konstrukce SWP, dřevěné sendvičové panely, ...
Materiál HW stěny	Kvantitativní nominální proměnná	OSB desky, SWP desky, Vnitřní omítka, nespecifikováno, ...
Materiál HW střechy	Kvantitativní nominální proměnná	OSB desky, parozábrana, vnitřní omítka, nespecifikováno, ...
Materiál HW podlahy	Kvantitativní nominální proměnná	Hydroizolace, nespecifikováno

Tab. č. 7: Charakteristika typů proměnných selektovaných faktorů vzduchotěsnosti budov



10.2 Exploratorní statistika

„Exploratorní (popisná) statistika bývá prvním krokem k odhalení informací skrytých ve velkém množství proměnných a jejich variant. To znamená uspořádání proměnných do názornější formy a jejich popis několika málo hodnotami, které by obsahovaly co největší množství informací obsažených v původním souboru.“ [2]

Exploratorní statistika popisuje základní vlastnosti výběrového souboru pomocí základních statistických charakteristik. Typ statistických charakteristik je závislý na typu proměnné (kvalitativní či kvantitativní). Data kvalitativních proměnných můžeme reprezentovat pomocí absolutní četnosti, relativní četnosti, kumulativní četnost, kumulativní relativní četnosti a modusu. Pro popis kvantitativních proměnných lze využít většinu charakteristik pro popis kvalitativních proměnných doplněných o charakteristiky míry polohy a míry variability dat. [2]

Četnost n je definována jako počet výskytu dané proměnné nebo počet dané hodnoty proměnné ve statistickém souboru. Absolutní četnost udává numerický počet hodnot dané proměnné ve zkoumaném souboru. Relativní četnost udává procentuální podíl, tj. kolika procenty je hodnota proměnné ve statistickém souboru zastoupena.

Aritmetický průměr \bar{x} je hodnota vyjadřující typickou hodnotu popisující soubor mnoha hodnot. Aritmetický průměr je definován podílem součtem všech prvků k celkovému počtu prvků:

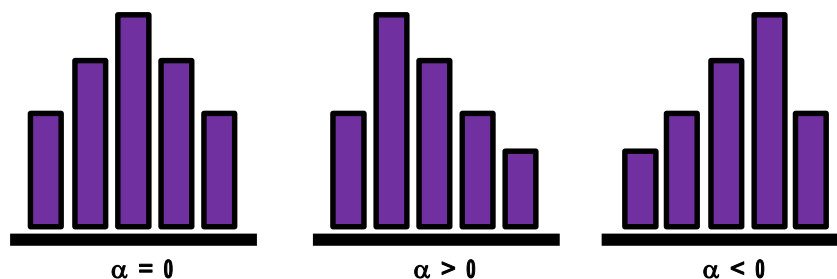
$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}. [2] \quad (14)$$

Medián \tilde{x} je prostřední hodnota uspořádané řady hodnot. Medián dělí datovou řadu na dvě stejně početné poloviny. Platí, že nejméně 50 % hodnot je menších nebo rovných a nejméně 50 % hodnot je větších nebo rovných mediánu. [2]

Modus \hat{x} je hodnota, která se v hromadných datech vyskytuje s největší četností. Modus je mírou polohy v tom smyslu, že jde o bod, v němž či kolem něhož jsou data nejvíce soustředěna. Latinské slovo „modus“ je vyjádřením pro pravou míru. [2]

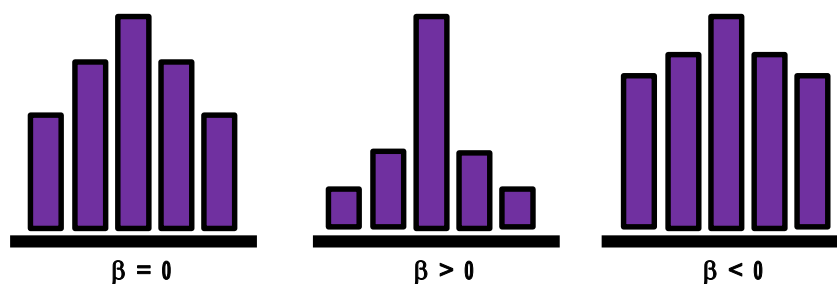
Šikmost α vyjadřuje asymetrii rozložení hodnot proměnné kolem jejího průměru. V případě, že $\alpha = 0$ jsou hodnoty proměnné kolem jejího průměru rozloženy symetricky. V případě, že je α větší než 0, jsou hodnoty proměnné menší než průměr. V případě, že α je

menší než 0, u proměnné převažují hodnoty větší než průměr. Rozdělení s kladnou šikmostí má vrchol histogramu posunut směrem doleva a rozdělení se zápornou šikmostí má vrchol histogramu posunutý směrem doprava. [2]



Obr. č. 15: Znárodnění koeficientu šikmosti α [2]

Špičatost β vyjadřuje koncentraci hodnot proměnné kolem jejího průměru. Jestliže špičatost β se rovná 0 jedná se o normální rozdělení. V případě, že je β větší než 0 jedná se o rozdělení špičaté a v případě, že β je menší než 0, jedná se o rozdělení ploché. [2]



Obr. č. 16: Znárodnění koeficientu špičatosti β [2]

Rozpětí, rozptyl a směrodatná odchylka jsou ukazatele variability popisující rozptýlení dat kolem střední hodnoty. Rozptyl s^2 definuje disperzi hodnot kolem střední hodnoty. Rozptyl je vyjádřen rozdílem maximální a minimální hodnoty výběrového souboru. Rozptyl je definován jako střední hodnota kvadrátů odchylek od střední hodnoty. Směrodatná odchylka s je definována jako kladná odmocnina výběrového rozptylu. [2]

Pro grafickou prezentaci dat se sestavují histogramy, výsečové diagramy a krabicové diagramy. Histogramy znázorňují výběrový soubor ve formě sloupcového grafu stejných šířek sloupců, přičemž výška sloupců vyjadřuje četnost sledované proměnné. Krabicový diagram neboli boxplot vizualizuje informace o maximu, minimu, mediánu a o horním a dolním kvartilu výběrového souboru. Krabicový diagram definuje odlehlé a extrémní hodnoty, které mohou ovlivnit výsledky statistického šetření. [2]



10.3 Interferenční statistika

Interferenční (indukční) statistika se zabývá statistickým šetřením dat výběrového souboru, zkoumáním platnosti statistických hypotéz a vyvozením závěrů či predikcí platných pro celý základní soubor. Statistickou hypotézou se rozumí předpoklad o základním souboru stanovený na základě výsledků výzkumu, experimentu, na dosavadních znalostech a teoretických východiscích nebo na pouhé domněnce.

Prvním krokem celého procesu testování hypotéz je formulace statistických hypotéz. Testování hypotéz je rozhodovacím procesem, kdy proti sobě stojí dva předpoklady – nulová a alternativní hypotéza. Nulová hypotéza H_0 předpokládá platnost stanoveného předpokladu vysloveném o určitém parametru (např. střední hodnoty jednotlivých výběrů se rovnají) až do okamžiku jejího zamítnutí ve prospěch alternativní hypotézy H_A . Alternativní hypotéza H_A popírá předpoklad nulové hypotézy. [2]

Při rozhodování o platnosti či neplatnosti nulové hypotézy vycházíme z výběrového souboru, který ne vždy dostatečně odpovídá vlastnostem celého základního souboru. Při rozhodování mohou nastat situace uvedené v tabulce č. 8. [2]

		Výsledek testu	
		Nezamítáme H_0	Zamítáme H_0
Skutečnost	Platí H_0	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost rozhodnutí: $1 - \alpha$ (spolehlivost)	Chyba I. druhu Pravděpodobnost rozhodnutí: α (hladina významnosti)
	Platí H_A	Chyba II. druhu Pravděpodobnost rozhodnutí: β	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost rozhodnutí: $1 - \beta$ (síla testu)

Tab. č. 8: Chyba I. a II. druhu při statistickém testování hypotéz [2]

Chyby I. druhu se dopustíme, jestliže zamítneme nulovou hypotézu, ačkoli je ve skutečnosti platná. Pravděpodobnost dopuštění se chyby I. druhu nazýváme hladinou významnosti α . Pravděpodobnost správného rozhodnutí a nezamítnutí nulové hypotézy označujeme jako spolehlivost. V technických oborech se běžně pracuje s hladinou významnosti 5 % (méně často s 1 %). Chyby II. druhu se dopustíme, jestliže nezamítneme nulovou hypotézu v případě platnosti alternativní hypotézy. Pravděpodobnost výskytu chyby II. druhu je β . [2]

Princip samotného testování hypotéz je relativně snadný. V případě, že neprokážeme pomocí vhodného statistického testu neplatnost nulové hypotézy, nelze ji zamítnout a předpokládáme její platnost. [2]



Pro verifikaci hypotéz je možné využít dva základní postupy – klasický test a čistý test významnosti. Klasický test se skládá z následujících kroků:

- sestavení nulové a alternativní hypotézy,
- volby testovacího kritéria (statistiky),
- sestrojení kritického oboru a oboru přijetí,
- výpočtu pozorované hodnoty testové statistiky,
- a formulace závěru. [2][3][35][48]

U čistého testu významnosti není nutné na rozdíl od klasického testu znát hladinu významnosti α . Výstup čistého testu významnosti reflektuje hodnoty hladiny významnosti, pro které můžeme nulovou hypotézu zamítnout či nezamítnout. Postup čistého testu významnosti je následující:

- sestavení nulové a alternativní hypotézy,
- volby testovacího kritéria (statistiky),
- výpočet pozorované hodnoty testové statistiky a výpočet statistiky p – value. [2][3][35][48]

Hodnota p -value reflektuje nejnižší hladinu významnosti, na níž je možné zamítnout nulovou hypotézu a zároveň nejvyšší hodnotu významnosti pro níž se nulová hypotéza nezamítá. O zamítnutí nulové hypotézy se ve většině případů rozhoduje při porovnání hodnoty p -value s běžně používanými hladinami významnosti α (1 % nebo 5 %). Jestliže je hodnota p -value menší než hladina významnosti α , zamítáme nulovou hypotézu a předpokládáme platnost alternativní hypotézy. Naopak, jestliže je hodnota p -value větší než hladina významnosti α , nezamítáme nulovou hypotézu a předpokládáme její platnost. Symbolicky platí:

$$p - value < \alpha (0,050) \Rightarrow \textit{STATISTICKY VÝZNAMNÝ VLIV},$$

$$p - value < \alpha (0,010) \Rightarrow \textit{STATISTICKY VYSOCE VÝZNAMNÝ VLIV},$$

$$p - value > \alpha (0,050) \Rightarrow \textit{STATISTICKY NEVÝZNAMNÝ VLIV}. [2][3][35][48]$$

Následující podkapitoly jsou věnovány teoretickým východiskům statistických nástrojů a metod, které jsou následně využity pro posuzování statistické významnosti selektovaných ukazatelů na výslednou vzduchotěsnost obálky budovy. V žádném případě se nejedná o kompletní seznam nástrojů a metod využívaných ve statistice.



10.3.1 Ověření normality výběru

V případě, že během testování hypotéz využíváme k rozhodnutí dosaženou hladinu významnosti, tj. p -value, je vhodné si uvědomit, že stupeň validity dosažené významnosti závisí na tom, jakou shodu vykazují data s teoretickým rozdělením pravděpodobnosti. Statistické testování hypotéz lze rozdělit na parametrické a neparametrické. Parametrické testy vyžadují splnění předpokladu normality dat. Neparametrické testy se používají v případě, kdy nelze u výběrů dat předpokládat normální rozdělení pravděpodobnosti. Neparametrické testy vyšetřují nulovou hypotézu za předpokladu neznámého rozdělení dat. [2][3][35][48]

Základním předpokladem výběru parametrických testů je předpoklad normálního rozdělení proměnných. Normální rozdělení lze ověřit mnohými metodami. V disertační práci je normalita dat verifikována pomocí Kolmogorovova – Smirnovova testu pro jeden výběr. V případě malého souboru dat je vhodné použít Shapirův – Wilkův test. [2][3][35][48]

Kolmogorovův-Smirnovův test pro jeden výběr slouží k potvrzení hypotézy H_0 na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, zda náhodný výběr o rozsahu prvků n pochází ze základního souboru s normálním rozdělením s distribuční funkcí $F(x)$. Stanovíme nulovou a alternativní hypotézu:

- **H_0** : výběr pochází ze základního souboru s normálním rozdělením,
- **H_A** : výběr nepochází ze základního souboru s normálním rozdělením. [2][3][35][48]

Verifikace normality je jedním ze dvou předpokladů pro aplikaci parametrického testu jedno - faktorové analýzy rozptylu (ANOVA). Je tedy žádoucí, aby hypotéza H_0 byla potvrzena, tzn., aby bylo potvrzeno, že výběr pochází ze základního souboru s normálním rozdělením. V tomto případě je možno pokračovat dalším bodem – ověřením homoskedasticity, která je druhou nutnou podmínkou pro aplikaci analýzy rozptylu. V případě, že není ověřeno normální rozložení dat, je nutné použít neparametrickou variantu ANOVY, tj. Kruskal – Wallisův test. [2][3][35][48]

Ověření, zda výběr pochází ze základního souboru s normálním rozložením, nám může napovědět také analýza histogramu. Zpravidla platí, že zvonovitý tvar histogramu analyzuje statisticky stabilní soubor, tedy potvrzuje hypotézu H_0 . Histogram je nejjednodušším odhadem hustoty rozložení dat. Lze porovnat tvar hustoty četnosti s tvarem hustoty pravděpodobnosti vybraného teoretického, v našem případě normálního rozložení. [2][3][35][48]



10.3.2 Ověření homoskedasticity

Druhým předpokladem pro využití parametrického testu ANOVA je homoskedasticita. Homoskedasticita znamená, že hodnoty závisle proměnné Y mají pro všechny hodnoty nezávisle proměnné X . Předpoklad homoskedasticity se dá chápat jako shodnost rozptylů jednotlivých výběrů a dá se ověřit pomocí Barlettova testu. [2][3][35][48]

Před samotným ověřením homoskedasticity je nejprve nutné stanovit hypotézy a hladinu významnosti α . Nejčastěji volíme 5% hladinu významnosti, tedy $\alpha = 0,05$. Nulová hypotéza H_0 potvrzuje shodnost rozptylů u jednotlivých výběrů při hladině významnosti a alternativní hypotézu H_A zamítá shodnost rozptylů u jednotlivých výběrů. [2][3][35][48]

10.3.3 Kruskal – Wallisův test

Kruskal – Wallisův test (označován také jako H test nebo test shody středních hodnot) je neparametrickou alternativou ANOVY. Kruskal – Wallisův test je zobecněným a zgeneralizovaným dvou faktorovým Wilcoxonovým testem pro porovnání mediánů více než dvou náhodných výběrů faktoru. Použití Kruskal – Wallisova testu je vhodné zejména v případě náhodných výběrů, u kterých nebylo verifikováno nebo se nepředpokládá normální rozložení dat. Pro Kruskal – Wallisův test jsou formulovány následující hypotézy:

- **H₀**: Mediány všechny výběrů faktoru jsou stejné, $M_1 = M_2 = M_k$,
- **H_A**: Alespoň jeden medián výběrů faktoru se liší od ostatních. [2][3][35][48]

V případě, že nulová hypotéza není přijata a předpokládá se platnost alternativní hypotézy, lze předpokládat statisticky významný rozdíl mediánů minimálně mezi dvěma výběry faktoru. Výpočet testového kritéria Kruskal – Wallisova testu je založen na pořadových číslech, která jsou přiřazena hodnotám souboru vzniklým spojením všech výběrů faktoru:

$$H = \frac{12}{N \cdot (N+1)} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1), \quad (15)$$

kde k je celkový počet výběrů faktoru,

n_i je počet pozorování v i -tém výběru,

N je celkový počet pozorování (suma n_i),

A R_i je součet pořadí pro jednotlivé výběry. [2][3][35][48]



10.3.4 Korelační analýza

Korelační analýza se používá pro zjištění těsnosti závislosti (síly vztahu) dvou náhodných spojitých proměnných. Dvě náhodné proměnné jsou korelované, jestliže určité hodnoty jedné proměnné mají tendenci se vyskytovat společně s určitými hodnotami druhé proměnné. Vztah těsnosti dvou náhodných veličin může být od úplné neexistence korelace (všechny hodnoty proměnné Y se vyskytují stejně pravděpodobně s každou hodnotou proměnné X) až po absolutní korelaci (pro každou hodnotu proměnné Y existuje právě jedna hodnota proměnné X). [48][42]

Pro kvantitativní vyjádření těsnosti vztahu dvou korelovaných veličin existuje řada korelačních koeficientů, jejichž užití se liší podle parametrů proměnných. Pro interpretaci korelačního koeficientu závislosti dvou proměnných lze využít míru závislosti dle následující tabulky. [44]

Korelační koeficient	Závislost (síla vztahu)	Alternativní popis
0,00	Bez závislosti	Naprostá nezávislost
0,01 - 0,09	Triviální	Velmi malá, prakticky nulová, slabá
0,10 – 0,29	Nízká až střední	Malá, slabá, minoritní
0,30 – 0,49	Střední až silná	Značná
0,50 – 0,69	Silná až velmi silná	Vysoká, majoritní
0,70 – 0,89	Velmi silná	Velmi vysoká, obrovská
0,90 +	Téměř dokonalá závislost	Funkční závislost

Tab. č. 9: Interpretace síly vztahu dvou proměnných dle korelačního koeficientu [44]

Při výpočtu míry těsnosti závislosti dvou proměnných využitím korelačních součinitelů je nutné vzít v úvahu, že korelační analýza nerozlišuje mezi závisle a nezávisle proměnnou. Korelace nebere v úvahu, zda proměnná X je závislá na proměnné Y nebo naopak proměnná Y je závislá na proměnné X. Závislost proměnných při korelaci není zkoumána vůbec, popřípadě musí autor rozhodnout sám na základě svých praktických zkušeností. [48]

Korelační koeficient neparametrické korelace nabývá hodnot v intervalu $\langle -1; 1 \rangle$. Čím větší je absolutní hodnota korelačního koeficientu, tím těsnější je závislost mezi dvěma pozorovanými proměnnými. Kladný korelační koeficient vyjadřuje pozitivní (rostoucí) korelaci a záporný korelační koeficient vyjadřuje zápornou (klesající) závislost. V případě nulového korelačního koeficientu jsou hodnoty sledovaných proměnných náhodně zpřeházené a neexistuje mezi nimi závislost. [48]



10.3.5 Spearmanův koeficient pořadové korelace

Pro korelaci mezi dvěma spojitými náhodnými proměnnými X a Y s neznámým rozdělením pravděpodobnosti se pro vyjádření míry vztahu těsnosti používá Spearmanův korelační koeficient. Spearmanův koeficient pořadové korelace při výpočtu využívá pořadí hodnot sledovaných veličin a nepředpokládá normalitu dat. Hlavní předností této neparametrické metody je skutečnost, že výpočet lze využít pro popis lineární i nelineární závislosti dvou proměnných. [48]

Spearmanův korelační koeficient je založený na pořadí prvků podle velikosti vzhledem ke dvěma sledovaným proměnným. Každému prvku se přiřadí dvojice pořadí Q (pořadí i_x podle proměnné X) a R (pořadí i_y podle druhé proměnné Y). V případě, že s rostoucími hodnotami proměnné X vzrůstají i hodnoty proměnné Y , je zřejmé, že pořadí hodnot obou proměnných pro každý prvek jsou shodná, $Q = R$. Jestliže s rostoucími hodnotami proměnné X klesají hodnoty proměnné Y , jsou pořadí obou veličin právě opačná. Při nezávislosti dvou proměnných jsou pořadí zcela náhodná. [48]

Pro n pozorovaných dvojic ve výběru je Spearmanův korelační koeficient r_s vyjádřen pomocí difference pořadí jako:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (i_x - i_y)^2}{n \cdot (n^2 - 1)}. \quad [48] \quad (9)$$

10.3.6 Spearmanův test nezávislosti

Hypotézu, že proměnné X a Y jsou nezávislé, zamítneme na hladině významnosti α na základě realizace Spearmanova koeficientu $r_s = r_s(x,y)$, platí-li nerovnost $|r_s| \geq r_s(n, \alpha)$, kde $r_s(n, \alpha)$ je kritická hodnota Spearmanova korelačního koeficientu, kterou najdeme ve statistických tabulkách. Při testování statistické nezávislosti dvou proměnných je nejdříve nutné stanovit nulovou a alternativní hypotézu:

- **H₀**: Proměňatelné X a Y jsou náhodné nezávislé veličiny.
- **H_A**: Proměnné X a Y jsou náhodné závislé veličiny. [48]

Vyjádřený korelační koeficient r_s porovnáme s tabelovanými kritickými hodnotami Spearmanova korelačního koeficientu pro zvolenou hladinu α a daný počet prvků výběru n :



- Je-li absolutní hodnota korelačního koeficientu větší než hodnota kritického korelačního koeficientu, poté je koeficient pořadové korelace významný na hladině významnosti α a závislost sledovaných veličin je prokázána na úrovni základního souboru. [48]
- Je-li absolutní hodnota korelačního koeficientu menší než hodnota kritického korelačního koeficientu, poté je koeficient pořadové korelace nevýznamný na hladině významnosti α a závislost sledovaných veličin na úrovni základního souboru neexistuje. [48]

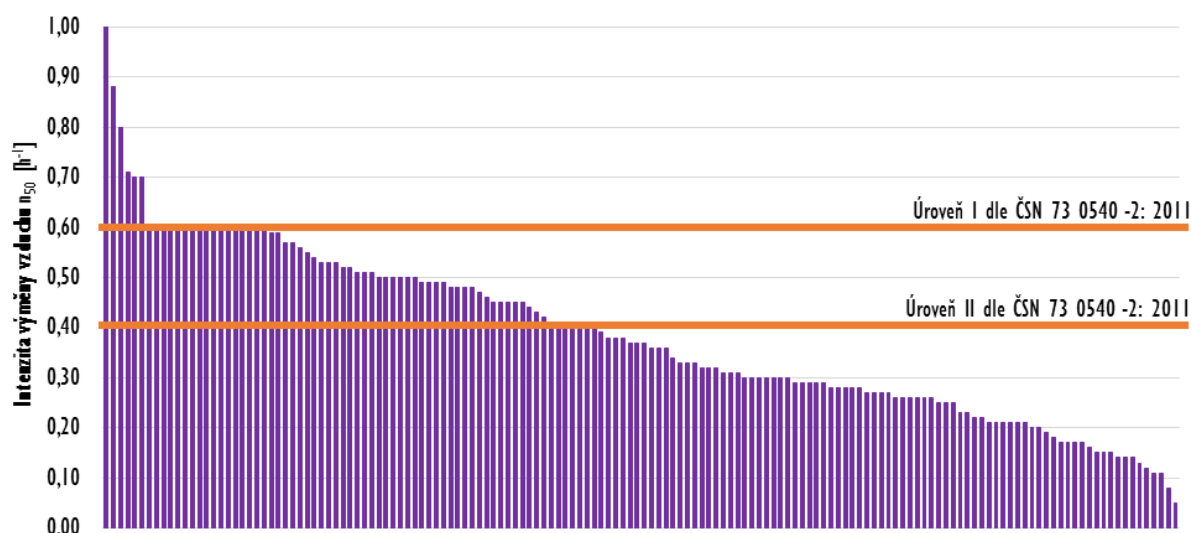
10.3.7 Koeficient determinace

Koeficient determinace d umožňuje srozumitelně vysvětlit závislosti mezi dvěma proměnnými. Koeficient determinace d se běžně vyjadřuje v procentech a je definován jako druhá mocnina korelačního koeficientu vynásobená hodnotou 100. Koeficient determinace d definuje, kolika procenty se podílí sledovaná proměnná na výsledném efektu:

$$d = r_s^2 \cdot 100. [48] \quad (16)$$

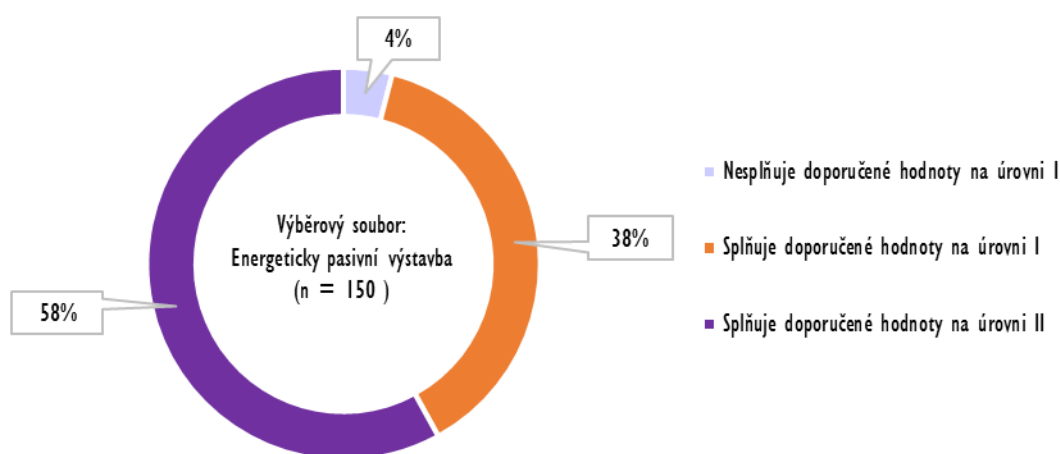
11 Exploratorní analýza vzduchotěsnosti obálky budov

Výběrový soubor se skládá ze 150 energeticky pasivních objektů seřazených od největší po nejmenší velikost celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} (graf č. 8). V grafu jsou znázorněny doporučené normové požadavky, které se doporučuje splnit pro třídu energeticky pasivních domů.



Graf č. 8: Výběrový soubor seřazený dle velikosti celkové intenzity výměny vzduchu n_{50}

Téměř 4 % objektů výběrového souboru převyšují limitní hodnotu $0,60 \text{ h}^{-1}$ a z hlediska vzduchotěsnosti nesplňují kritéria pro energeticky pasivní domy. Díky jejich optimalizovanému návrhu konstrukcí a nízké spotřebě energií je s nimi i nadále počítáno a jsou brány jako energeticky efektivní objekty.



Graf č. 9: Statistika míry průvzdušnost pláště výběrového souboru dle ČSN 73 0540-2 (2011)

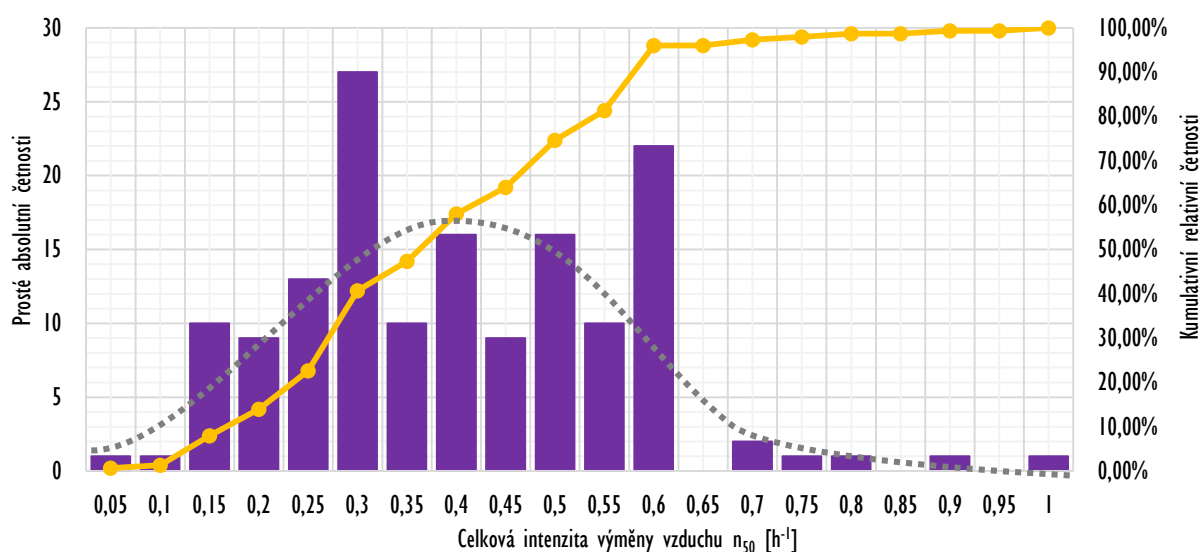


Pomocí statistického editoru IBM SPSS Statistics je provedeno základní statistické šetření výběrového souboru. V rámci exploratorní analýzy jsou sledovány následující determinanty: četnost, modus, histogram, průměr, rozptyl, výběrová šikmost, výběrová špičatost a kvantily. V tabulce č. 10 jsou zobrazeny základní deskriptivní charakteristiky z SPSS Statistics [15].

		Výběrový soubor	
			Chyba stř. h.
	Aritmetický průměr	0,3853	0,01398
	Medián	0,3700	
	Rozptyl výběru	0,029	
	Směrodatná odchylka	0,17128	
n_{50}	Minimum	0,05	
	Maximum	1,00	
	Rozpětí	0,95	
	Interkvantilové rozpětí	0,25	
	Šikmost	0,506	0,198
	Špičatost	0,217	0,394
	Počet	150	

Tab. č. 10: Exploratorní charakteristiky vzduchotěsnosti výběrového souboru, IBM SPSS Statistics [15]

Průměrná hodnota vzduchotěsnosti n_{50} dosahuje hodnoty $0,385 \text{ h}^{-1}$. Tato hodnota je dle současných legislativních norem hodnocena jako mírně nižší než přednostně doporučující hodnota pro energeticky pasivní výstavbu. Statisticky bylo zjištěno, že střední chyba průměru se rovná $0,014$. Tato hodnota stanovuje, do jaké míry se naměřená průměrná hodnota odlišuje od základního souboru, jedná se pouze o odhad vypočítaný ze směrodatné odchylky.



Graf č. 10: Histogram celkové intenzity výměny vzduchu výběrového souboru



Rozptyl výběrového souboru značí, do jaké míry jsou hodnoty rozptýleny okolo střední hodnoty. Hodnota rozptylu 0,029 není prakticky interpretovatelná, proto nemůžeme jednoznačně stanovit, zda hodnota rozptylu reprezentuje validní data. Je žádoucí, aby hodnota rozptylu byla porovnána s rozptyly jednotlivých třídních skupin.

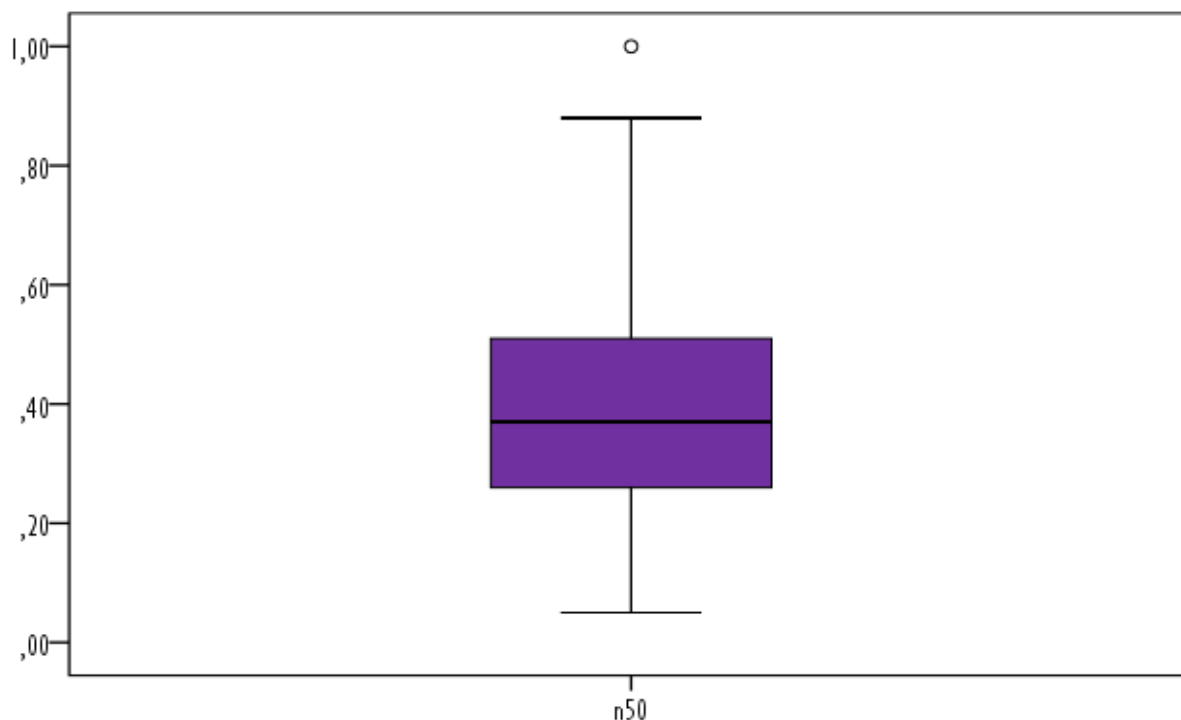
Hodnota šikmosti výběrového souboru ($\alpha = 0,506$) potvrdila fakt, že existuje vyšší četnost hodnot menších, než je jejich průměrná hodnota. Vrchol histogramu je posunut mírně doleva. Zároveň byl zjištěn odhad chyby 0,198.

Hodnota špičatosti má do jisté míry vypovídací schopnost ohledně normálního rozložení datového souboru. Ideální normální rozložení je reprezentováno hodnotou špičatosti $\beta = 0$. V našem případě se hodnota špičatosti rovná 0,217 (špičaté rozložení), přičemž lze stanovit, že tato hodnota je relativně blízko nule, tudíž existuje předpoklad pro potvrzení normálního rozložení datového souboru. Tato skutečnost ovšem musí být potvrzena nebo vyvrácena statistickým testováním hypotéz pomocí Kolmogorovova-Smirnovova, respektive Shapiro-Wilkova testu normálního rozložení pro jeden výběr.

Minimální naměřenou hodnotou vzduchotěsnosti pasivních domů je $0,05 \text{ h}^{-1}$. Hodnota je znázorněna v dolní části krabicového diagramu Naopak za nejvyšší hodnotu byla označena vzduchotěsnost na úrovni $n_{50} = 1,00 \text{ h}^{-1}$. Tato hodnota byla zároveň označena za odlehlou hodnotu. Žádné extrémní hodnoty se ve výběrovém souboru nenacházejí.

Z krabicového diagramu můžeme také zjistit, že hodnota mediánu je na relativně vyšší úrovni. Tento fakt potvrzuje hodnotu špičatosti, tudíž že ve výběrovém souboru se nachází vyšší četnosti hodnot nižších, než je jejich samotný průměr. Dále bylo zjištěno, že 25 % hodnot vzduchotěsnosti n_{50} je nižších než $0,26 \text{ h}^{-1}$, respektive 75 % hodnot převyšuje hranici vzduchotěsnosti pasivních domů $n_{50} = 0,26 \text{ h}^{-1}$. Navíc lze z krabicového diagramu zjistit, že 75 % hodnot je nižších než $n_{50} = 0,51 \text{ h}^{-1}$.

Více než polovina objektů (58 %) testovaného výběrového souboru splňuje přísnější kritérium dle ČSN 73 0540 – 2 (2011) a jejich hodnota průvzdušnosti obvodového pláště je nižší nebo rovna než $0,40 \text{ h}^{-1}$.



Graf č. 11: Krabicový diagram výběrového souboru, IBM SPSS Statistics [15]

Test normality založen na Kolmogorově – Smirnovově či Shapiro – Wilkově testování zamítnul nulovou hypotézu, že náhodný výběr proměnné celkové intenzity výměny vzduchu pochází z normálního rozložení. Vyjádřená hodnota p-value (Sig.) je výrazně menší, než hladina významnosti α .

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
n50	,097	150	,001	,966	150	,001

a. Lilliefors Significance Correction

Tab. č. 11: Kolmogorovův – Smirnovův test normality, IBM SPSS Statistics [15]



12 Statistická verifikace determinačních faktorů

V následující kapitole je věnována pozornost statistické verifikaci, tj. posouzení statistické reálnosti charakteristik výběrového souboru. Cílem je ověření, či naopak zamítnutí, možného statisticky významného vlivu vybraných faktorů na výslednou vzduchotěsnost obálky budovy běžně vyjadřující se v hodnotách celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} . Pro rozhodování jsou využity statistické testy a nástroje, které jsou teoreticky popsány v kapitole 10 Základy statistických metod a testování hypotéz.

Selektované potenciační faktory je možné rozdělit na dvě základní skupiny – aktivní a pasivní faktory vzduchotěsnosti obálky budovy. Mezi aktivní faktory se řadí ty faktory, které pomáhají přímo předejít a zabránit nekontrolovatelnému úniku vzduchu skrze netěsnosti budovy. Za aktivní faktory je možné považovat samotný návrh objektu a jeho realizaci. Patří zde například volba konstrukčního a materiálového řešení, počet podlaží, obestavěný prostor, ochlazovaná plocha obálky budovy, kvalita realizace a jiné. Naopak pasivní faktory jsou ty, které, které výslednou vzduchotěsnost již neovlivňují, ale mohou zkreslit samotný výsledek měření. Za pasivní faktory vzduchotěsnosti obálky budovy lze považovat irelevantní vstupní data při měření, nekalibrovaný ventilátor, nedostatečná příprava k měření či nedodržení standardizovaného postupu měření. Mezi pasivní faktory taky patří expozice objektu, větrná oblast či rok výstavby.

Aktivní determinační faktory	Pasivní determinační faktory
Konstrukční charakteristika a typ budovy	Nadmořská výška
Stavební materiál svislých nosných konstrukcí	Větrná oblast
Materiál hlavní vzduchotěsné vrstvy	Rok výstavby
Komínové těleso	
Realizace a kvalita provedení	
Podlažnost objektu	
Tvar a komplexnost (Objemový faktor tvaru budovy A/V)	
Velikost objektu – zastavěná plocha	
Velikost objektu – užitná plocha	
Velikost objektu – obestavěný prostor	
Velikost objektu – ochlazovaná plocha obálky budovy	

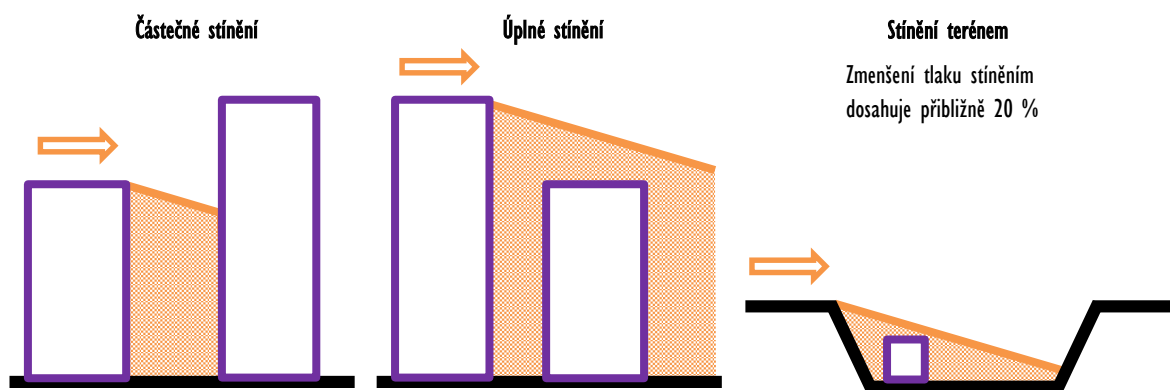
Tab. č. 12: Přehled determinačních faktorů vzduchotěsnosti pro statistickou verifikaci významnosti

12.1 Lokalita, nadmořská výška a větrná oblast

Jak již bylo zmíněno v kapitole 8.2.2. Analýza příčiny a následků nedostatečné vzduchotěsnosti obálky budovy, nemá realizace objektu v dané lokalitě vliv na výslednou vzduchotěsnost obálky budovy. Lokalita, nadmořská výška, větrná oblast či expozice objektu významně ovlivňují tlakové účinky větru na obálku budovy. Je žádoucí, aby objekt byl realizován v lokalitě chráněné proti působení větru. Nechráněné obálky budovy před vystavením nadměrným tlakovým účinkům způsobeným větrem mohou negativně zvyšovat množství proudícího vzduchu skrze obálku budovy. Lokalitu, nadmořskou výšku a větrnou oblast lze považovat za pasivní faktory ovlivňující průvzdušnost obvodového pláště.[32]

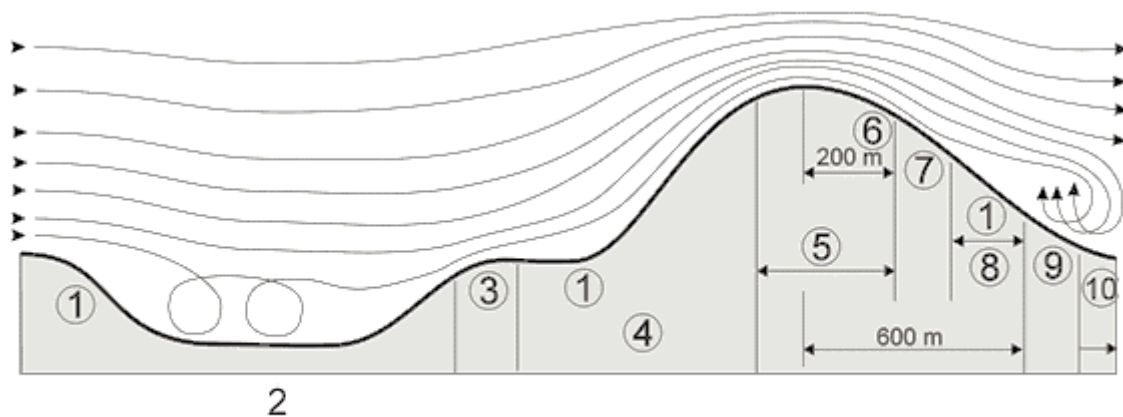
12.1.1 Expozice objektu

Fyzikální závislosti tlakových účinků vyvolaných vlivem větru jsou popsány v kapitole 5. 2. 2 Tlaková diference vyvolaná účinky větru. Přírodní či uměle vytvořené stínění před větrem zmenšuje místní účinek větrných sil na exponovaný objekt. Jako ochrana objektu před větrným účinkem může sloužit okolní výstavba, upravený terén či zelený porost. Částečné či úplné stínění zmenšuje tlak větru na objekt. [18][43]



Obr. č. 17: Stínění objektu objektem a terénem [43]

Rychlost větru v určitém místě neustále kolísá. Větrný proud po nárazu na překážku změni směr a sníží jeho rychlost. Vlivem značné nerovnosti zemského povrchu se rychlost proudu v nízkých výškách od terénu značně snižuje. Stejně jako rychlost větru se průběžně mění i směr větru a hustota vzduchu. Hustota vzduchu je závislá na geografické poloze, teplotě, nadmořské výšce a lokálním složení vzduchu. [18]



1 - preferovaná poloha na osídlení, 2 - údolní vír, 3 - zóna silného větru, 4 - zóna větrné eroze, 5 - zóna silného větru, 6 - větrné maximum, 7 - větrný pokles, 8 - závětrná chráněná zóna, 9 - zóna větrného zlomu, 10 - větrný úbytek

Obr. č. 18: Rozložení působení větru v závilosti na morfologii terénu [45]

12.1.2 Geografická poloha

Geografická poloha nemá žádný vliv na výslednou vzduchotěsnost budovy. Obrázek č. 20 znázorňuje četnosti pozorovaných objektů dle územních krajů České republiky. Je patrné, že ve výběrovém souboru jsou zastoupeny hodnoty ze všech 14 krajů České republiky. Územní zastoupení jednotlivých objektů vypovídá o celkovém rozložení energeticky efektivní výstavby v České republice. Největší zástavba energeticky efektivních budov je patrná ve Středočeském a Jihomoravském kraji. Naopak nejnižší hustota energeticky efektivních domů je v severozápadních Čechách – v Karlovarském a Ústeckém kraji.

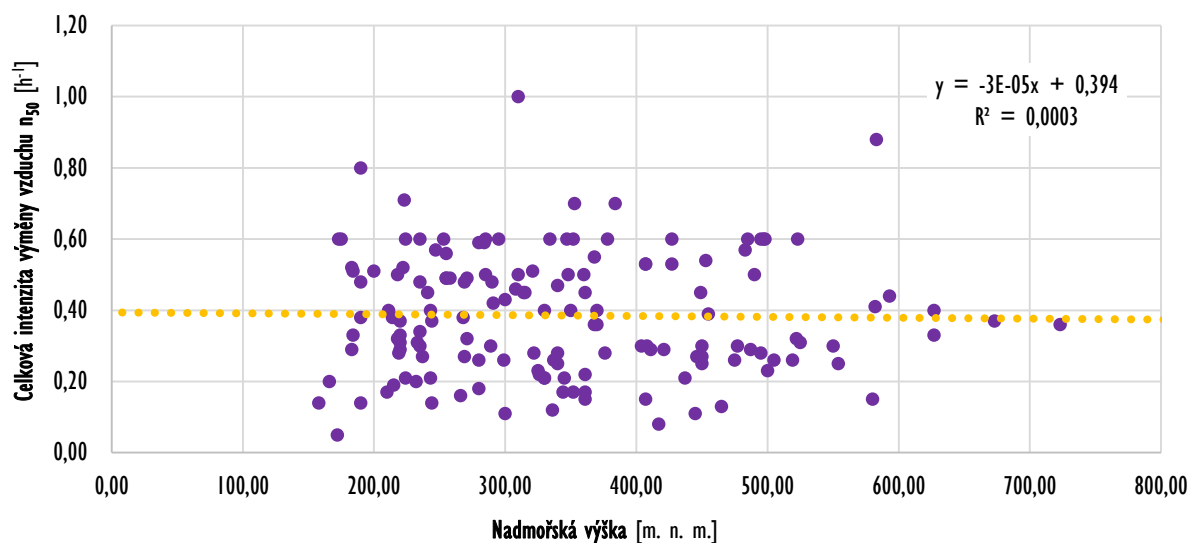


Obr. č. 19: Zastoupení objektů výběrového souboru dle územního členění v České republice



12.1.3 Nadmořská výška

Nadmořská výška je definována jako svislá vzdálenost neboli výškový rozdíl daného místa od hladiny nejbližšího moře. Nadmořská výška se udává v metrech nad mořem [m. n. m.]. Se stoupající nadmořskou výškou je charakteristický pokles barometrického tlaku, pokles parciálního tlaku kyslíku, snížení teploty, snížení absolutní vlhkosti, zvýšení ultrafialového záření a zvýšení rychlosti větru. [40]



Graf č. 12: Znáornění závislosti vzduchotěsnosti (n_{50}) budov na nadmořské výšce

Stejně jako celková intenzita výměny vzduchu n_{50} reprezentující vzduchotěsnost budov je i nadmořská výška proměnnou kvantitativní spojitou, tj. prvek nabývající libovolné hodnoty z oboru reálných čísel nebo z nějaké množiny oboru reálných čísel. Pro verifikaci závislosti a vyjádření dvou kvantitativních spojitých je vhodné využít metody korelační analýzy.

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Nadmořská výška	,085	150	,010	,950	150	,000

a. Lilliefors Significance Correction

Tab. č. 13: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat pro výběr nadmořské výšky, IBM SPSS Statistics [15]

Výběry neprůvzdušnost budovy, zastoupenou celkovou intenzitou výměny vzduchu n_{50} , a nadmořská výška nepocházejí z normálního rozdělení (p – value (Sig.) je menší než 0,05). Pro ověření závislosti je nutné využít neparametrické testování hypotéz.



Vyjádřený Spearmanův korelační koeficient (Correlation Coefficient) pomocí IBM SPSS Statistics je prakticky nulový (-0,024). Síla závislosti proměnných celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} a nadmořské výšky je triviální a ze statistického hlediska zcela bezvýznamná.

Correlations			n50	nadmořská výška
Spearman's rho	n50	Correlation Coefficient	1,000	-,024
		Sig. (2-tailed)	.	,775
		N	150	150
	nadmořská výška	Correlation Coefficient	-,024	1,000
		Sig. (2-tailed)	,775	.
		N	150	150

Tab. č. 14: Neparametrická korelace pro vzduchotěsnost a nadmořskou výšku, IBM SPSS Statistics[15]

I přes téměř nulový Spearmanův pořadový koeficient je nutné provést Spearmanův test nezávislosti a rozhodnout, zda mezi náhodnými výběry dvou proměnných existuje lineární či nelineární závislost. Testujeme následující nulovou a alternativní hypotézu:

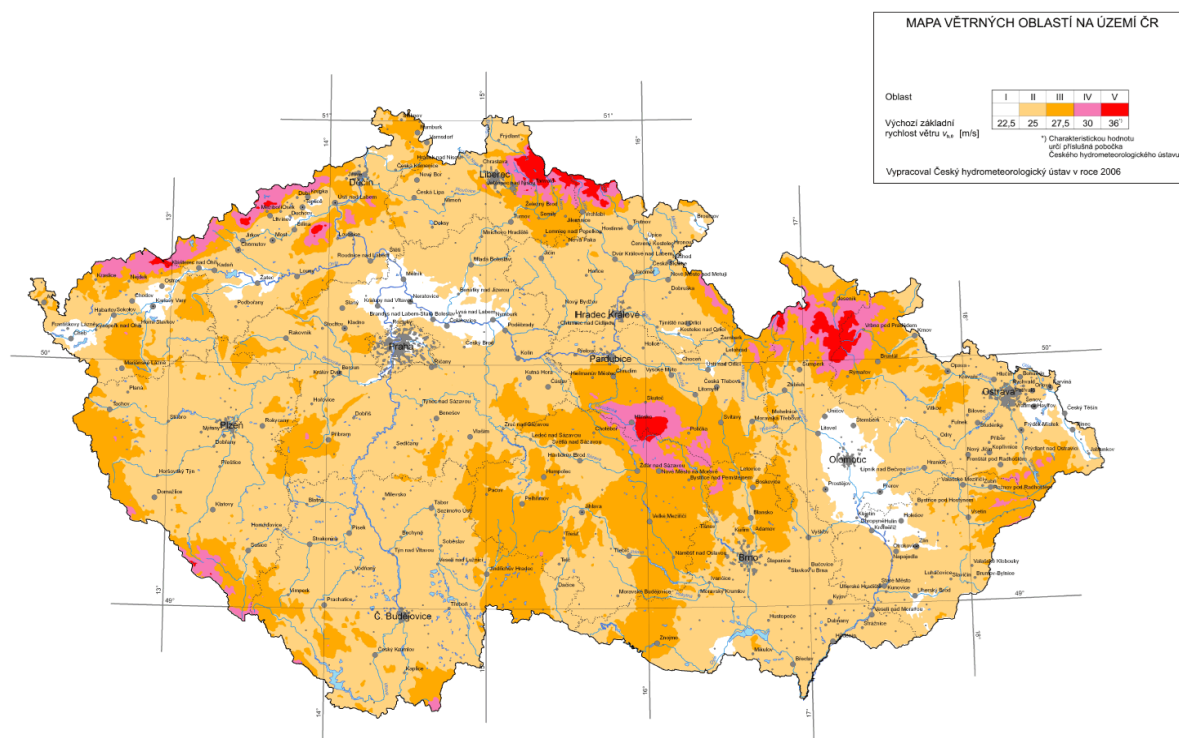
- **H₀**: vzduchotěsnost n_{50} a nadmořská výška jsou náhodné nezávislé veličiny,
- **H_A**: vzduchotěsnost n_{50} a nadmořská výška jsou náhodné závislé veličiny.

$$p - \text{value} (0,775) > \alpha (0,050) \Rightarrow \text{NEZAMÍTÁME } H_0$$

Nejnižší hladina významnosti $p - \text{value}$ pro níž můžeme nulovou hypotézu zamítnout je větší než stanovená hladina významnosti α , čímž nulovou hypotézu nezamítáme a předpokládáme její platnost. Ačkoli s rostoucí nadmořskou výškou gradují tlakové účinky vyvolané větrnými proudy, nemá nadmořská výška statisticky významný vliv na výslednou naměřenou vzduchotěsnost obálky budovy. Koeficient determinace, vyjadřující kolika procenty se podílí sledovaná proměnná na výsledném efektu, je extrémně malý, pouze 0,06 %.

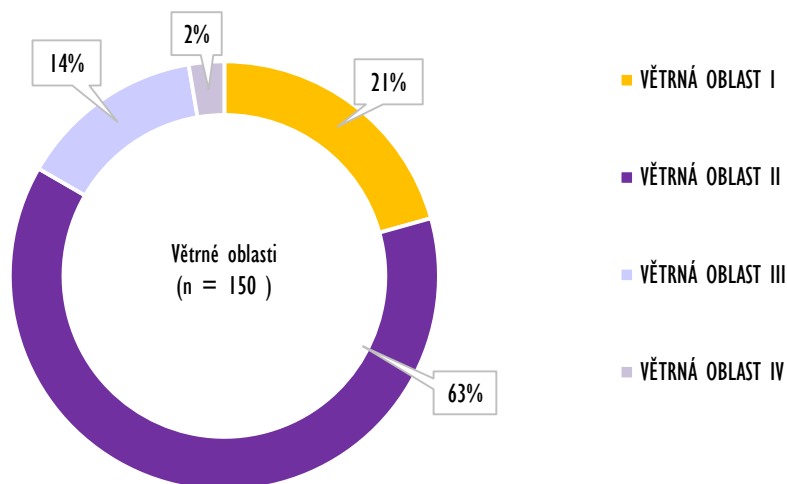
12.1.4 Větrné oblasti

Povětrnostní vlastnosti dané oblasti jsou popsány hodnotami charakteristické desetiminutové střední rychlosti větru ve výšce 10 m nad terénem, bez překážek s nízkou vegetací. Území České republiky je dle základních rychlostí větru $v_{b,0}$ rozděleno do 5 větrných oblastí. Obrázek č. 20 znázorňuje mapu větrných oblastí vypracovanou Českým hydrometeorologickým ústavem v roce 2006. [18]



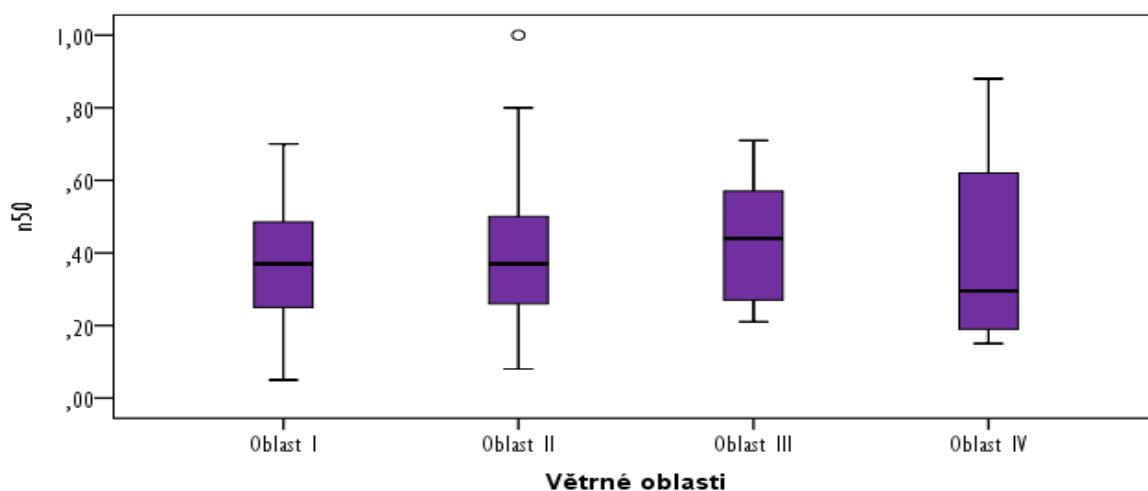
Obr. č. 20: Mapa větrných oblastí na území ČR dle ČSN EN 1991-1-4 [18]

V lokalitě s nejnižší základní rychlostí větru $v_{b,0}$ (tj. 22,5 m/s) je realizováno 21 % objektů výběrového souboru. Druhá větrná oblast se základní rychlostí větru 25 m/s převládá u 63 % objektů výběrového souboru. 14 % zkoumaných energeticky pasivních objektů je lokalizováno ve větrné oblasti III se základní rychlostí větru 27,5 m/s. Zbytek objektů (2 %) je realizováno ve čtvrté větrné oblasti o rychlosti větru 30 m/s. Ve větrné oblasti V není lokalizován žádný ze 150 zkoumaných subjektů.



Graf č. 13: Podíl větrných oblastí zastoupený ve výběrovém souboru

Z krabicových diagramů není možné porovnat, zda jednotlivé výběry větrných oblastí pocházejí z normálního rozdělení pravděpodobností. Mediány (středky souborů) u větrné oblasti I a II jsou totožné (0,37). U větrné oblasti III medián mírně stoupá (0,44). Medián větrné oblasti IV je nejmenší (0,30) i přes největší tlakové účinky vyvolané větrem.



Graf č. 14: Krabicové diagramy v závislosti na větrné oblasti, IBM SPSS Statistics [15]

Tests of Normality

	Větrná oblast	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
n50	VĚTRNÁ OBLAST I	,115	31	,200*	,981	31	,843
	VĚTRNÁ OBLAST II	,089	94	,065	,959	94	,005
	VĚTRNÁ OBLAST III	,209	21	,018	,892	21	,024
	VĚTRNÁ OBLAST IV	,305	4		,847	4	,0217

a. Lilliefors Significance Correction

*. This is a lower bound of the true significance.

Tab. č. 15: Test normality výběrů větrných oblastí, IBM SPSS Statistics [15]



Vzhledem k neprokázání normality u všech výběrů faktoru větrné oblasti (tj. větrná oblast III a IV) je nutné k ověření statistické závislosti využít neparametrický Kruskal - Wallisův test. Před provedením testu je nutné stanovit hypotézy k ověření:

- **H₀**: větrná oblast nemá vliv na vzduchotěsnost (mediány výběrů faktoru jsou stejné),
- **H_A**: větrná oblast a vzduchotěsnost jsou náhodně závislé veličiny.

Ranks				Test Statistics ^{a,b}	
	Větrná oblast	n	Mean Rank		n ₅₀
n50	Větrná oblast I	31	71,81	Chi-Square	1,664
	Větrná oblast II	94	74,79	df	3
	Větrná oblast III	21	85,95	Asymp. Sig.	,645
	Větrná oblast IV	4	65,88	a. Kruskal Wallis Test	
	Total	150		b. Grouping Variable: Větrná oblast	

Tab. č. 16: Kruskal-Wallisův test, IBM SPSS Statistics[15]

Hladina významnosti (0,645), pro kterou lze zamítnout nulovou hypotézu, je větší než α 0,05. Nepodařilo se prokázat, že větrná oblast, ve které je objekt realizován, má vliv na jeho výslednou změřenou neprůvzdušnost obvodového pláště (s 95 % spolehlivostí).

$$p - \text{value} (0,645) > \alpha (0,050) \Rightarrow \text{NEZAMÍTÁME } H_0$$

12.2 Konstrukční charakteristika a typ budovy

Jak bylo zmíněno v teoretických východiscích disertační práce, pro energeticky efektivní domy jsou vhodné stavební materiály a konstrukční systémy, které jsou schopny vytvořit účinnou těsnicí vrstvu. ČSN 730 540-2 (2011) rozlišuje jednoduchým způsobem konstrukce, dle jejich tepelné setrvačnosti. Obecně lze rozdělit konstrukce na masivní (těžké) a lehké. Za lehké konstrukce, tj. konstrukce s nízkou tepelnou setrvačností, se považují takové konstrukce, které mají plošnou hmotnost (od vnitřního líce k rozhodující tepelně izolační vrstvě) nižší než 100 kg/m^2 . Ostatní konstrukce jsou považovány za těžké, tj. za konstrukce s vysokou tepelnou setrvačností. [8]

V případě, že na objektu jsou použity oba typy výše definovaného konstrukčního systému, lze konstrukci budovy označit za kombinovanou. Volba konstrukčního systému bývá značně ovlivněna náklady na stavbu a požadovanými vlastnostmi dané konstrukce.

12.2.1 Lehké konstrukce

Charakteristickým zástupcem lehkých konstrukcí jsou dřevostavby. Dřevostavby jsou po omítnutí k nerozeznání od běžných masivních domů (zděných objektů). U dřevostaveb je tepelná izolace vkládána mezi nosnou dřevěnou konstrukci stavby (systém 2by4), čímž se snižuje tloušťka stěny. Další výhodou dřevostavby je rychlost výstavby, menší náročnost a suchá výstavba.



Obr. č. 21: Energeticky pasivní dům na bázi lehkého dřevěného skeletu v Novém Hrozenkově



Znovuobjeveným trendem současné výstavby jsou masivní dřevěné systémy vycházející z principů srubových objektů. Veškeré zatížení je přenášeno dřevěnou masivní konstrukcí (plošná hmotnost cca 40 – 50 kg/m²). Pro masivní dřevěné konstrukce jsou využívány předem připravené velkorozměrové plošné dílce, které jsou za pomoci těžké techniky montovány na připravené základové konstrukce. Na rozdíl od klasických lehkých sloupkových dřevostaveb není potřeba provádět plošnou vzduchotěsnou vrstvu a parozábranu. Nezbytné je pouze utěsnit místa spojů velkorozměrových dřevěných dílců. Vzduchotěsnou vrstvu tvoří vlastní masivní dřevěná konstrukce s přelepenými spoji jednotlivých dílců.

12.2.2 Masivní konstrukce

V současné době má masivní (těžká) konstrukce na trhu novostaveb stále největší podíl. Masivní konstrukcí se označuje konstrukce, která má plošnou hmotnost vyšší než 100 kg/m². Ve většině případů se jedná o klasický zděný systém. Vhodné jsou především materiály s velkou objemovou hmotností a pevností, které zajistí statickou únosnost již při malých tloušťkách vrstvy, na které jsou pak aplikovány tepelně-izolační materiály s nízkými hodnotami součinitele tepelné vodivosti λ [W/(m·K)].

Na trhu existuje nepřeberné množství materiálů, ze kterých lze postavit masivní konstrukci energeticky pasivního domu, např. vápenopískové bloky, betonové nebo plynosilikátové tvárnice a systémy ztraceného bednění.



Obr. č. 22: Zděný energeticky pasivní dům v obci Davle [5]

12.2.3 Kombinovaná konstrukce

Kombinovaná konstrukce kombinuje oba předcházející systémy. Při návrhu objektu je možno využít lehkou dřevěnou konstrukci v kombinaci se zděnou konstrukcí. Kombinovaný návrh vychází ze snahy o optimální využití vlastností jednotlivých konstrukčních systémů.

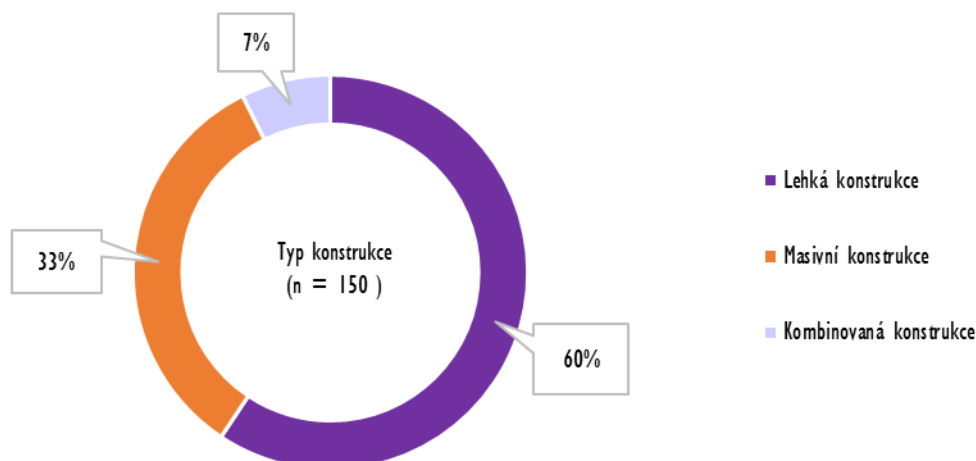


Obr. č. 23: Kombinovaná konstrukce energeticky pasivního domu ve Frýdku Místku [5]

Dosavadní zahraniční výzkumy prokázaly, že konstrukční typ budovy ovlivňuje konečnou neprůvzdušnost obvodového pláště. Dle Paretovy analýzy a pravidla 80/20 patří konstrukce mezi 20 % analyzovaných příčin podstatně ovlivňující konečnou vzduchotěsnost. Na základě dosavadních výsledků je stanovena nulová a alternativní hypotéza k ověření pomocí statistického testování:

- **H₀**: Konstrukční typ má statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy,
- **H_A**: Konstrukční typ nemá statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy.

Exploratorní analýza dat vzduchotěsnosti z pohledu konstrukčního systému prokázala, že lehké konstrukce převažují v současné výstavbě energetiky efektivních domů. Lehké konstrukce, zastoupeny převážně dřevostavbami, jsou ve výběrovém souboru zastoupeny z 60 %. Masivní konstrukce představují zděné či monolitické objekty a zaujímají 33 % souboru. Kombinované konstrukce nejsou příliš časté, představují pouze 7 %.



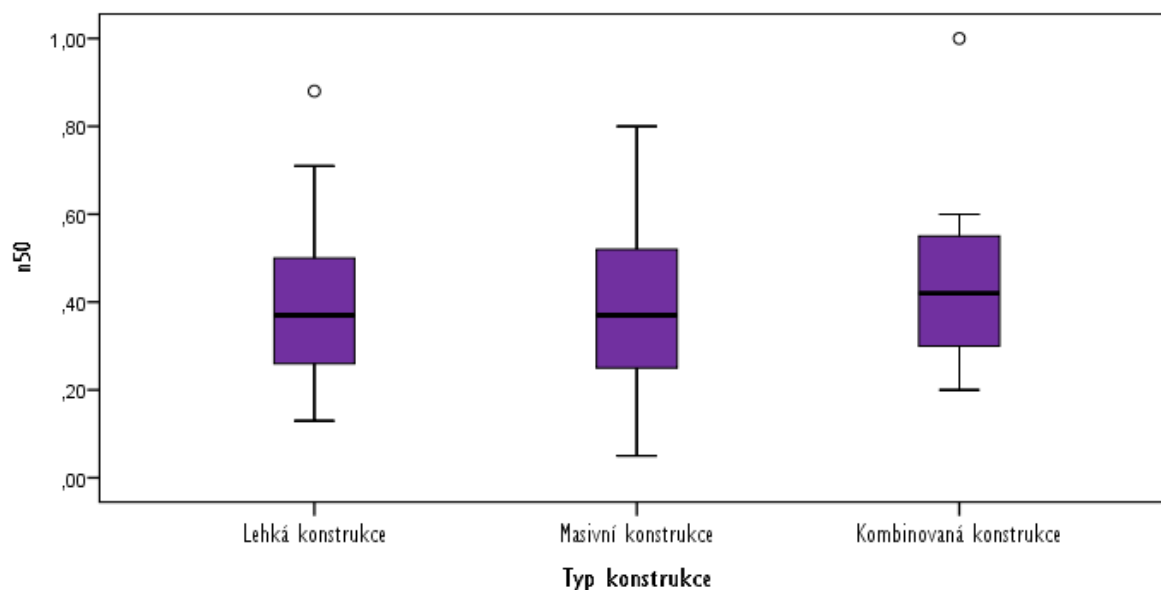
Tab. č. 17: Podíl typů konstrukce zastoupený ve výběrovém souboru

V tabulce č. 18 jsou zobrazeny základní exploratorní charakteristiky vyjádřené pro jednotlivé typy konstrukcí. Nejnižší průměrné hodnoty dosahují pasivní domy s masivní konstrukcí a naopak nejvyšší průměrné hodnoty dosahují domy s kombinovanou konstrukcí. Z posouzení aritmetických průměrů lze stanovit předpoklad, že nejlepších, tedy nejnižších hodnot celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} dosahují pasivní domy s masivní konstrukcí a naopak nejvyšší hodnoty dosahují objekty s kombinovanou konstrukcí.

Exploratorní charakteristiky	Lehká konstrukce		Masivní konstrukce		Kombinovaná konstrukce	
		Chyba stř. h.		Chyba stř. h.		Chyba stř. h.
Aritmetický průměr	0,3846	0,01664	0,3722	0,02566	0,4509	0,06960
Medián	0,3700		0,3700		0,4200	
Rozptyl výběru	0,25		0,033		0,053	
Směrodatná odchylka	0,15698		0,18147		0,23084	
Minimum	0,13		0,05		0,20	
n_{50} Maximum	0,88		0,80		1,00	
Rozpětí	0,75		0,75		0,80	
Interkvantilové rozpětí	0,24		0,28		0,30	
Šikmost	0,459	0,255	0,169	0,337	1,331	0,661
Špičatost	-0,249	0,506	-0,792	0,662	2,321	1,279
Počet	89		50		11	

Tab. č. 18: Exploratorní charakteristiky v závislosti na typu konstrukce, IBM SPSS Statistics [15]

Pro lepší souhrnný přehled o základních determinantech souboru je vhodné využít krabicového diagramu (graf č. 18). Sestrojené krabicové diagramy nepotvrdily výskyt extrémních hodnot, pouze hodnot odlehlých, které je možné nadále ponechat ve výběrovém souboru. Z kvalitativního hlediska není nutné upravovat skladbu datového souboru.



Graf č. 15: Krabicové diagramy v závislosti na typu konstrukce, IBM SPSS Statistics [15]

Je nutné zdůraznit, že dosavadní prezentované výsledky jsou stanoveny pouze na základě provedené exploratorní analýzy dat výběrového souboru. Statistika nám ovšem umožňuje využití pokročilých postupů a metod pro získání exaktnějších výsledků.

Pro stanovení vhodné statistické metody k testování hypotéz závislosti je nejprve nutné ověřit normalitu sledovaných proměnných pomocí statistického šetření testu normality, tj. zjištění, zda soubor dat sledované náhodné veličiny odpovídá Gaussovu normálnímu rozdělení pravděpodobnosti, či nikoli.

Tests of Normality

	Konstrukce	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
n50	Lehká konstrukce	,098	89	,033	,959	89	,007
	Masivní konstrukce	,095	50	,200*	,968	50	,199
	Kombinovaná konstrukce	,168	11	,200*	,882	11	,111

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Tab. č. 19: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat dle typu konstrukce, IBM SPSS Statistics [15]

Z provedeného testu normality (tab. č. 19) je patrné, že výběr prvků lehké konstrukce nepochází z normálního rozdělení, neboť hladina významnosti ($\alpha = 0,05$) je větší než vyjádřená hodnota p – value (Sig.) souboru dat lehké konstrukce. Pro ověření hypotézy, zda konstrukční typ budovy má statisticky významný vliv na vzduchotěsnost je nutno využít neparametrické



testování. V našem případě je zvolen neparametrický test Kruskal-Wallisův test. Před provedením samotného výpočtu testu je nutné stanovit hypotézy:

- **H₀**: Konstrukční typ nemá statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy (Mediány všechny úrovně faktorů jsou stejné, $M_1 = M_2 = M_3$),
- **H_A**: Konstrukční typ budovy statisticky významně ovlivňuje vzduchotěsnost budovy (Alespoň jeden medián se liší od ostatních).

Ranks			Test Statistics ^{a,b}	
Konstrukce	n	Mean Rank		n ₅₀
n50 Lehká konstrukce	89	75,56	Chi-Square	1,003
Masivní konstrukce	50	72,80	df	2
Kombinovaná konstrukce	11	87,27	Asymp. Sig.	,606
Total	150			

a. Kruskal Wallis Test
b. Grouping Variable: konstrukce

Tab. č. 20: Kruskal-Wallisův test závislosti vzduchotěsnosti na typu konstrukce, IBM SPSS Statistics [15]

Tabulka č. 20 reprezentuje výpočet Kruskal - Wallisova testu ze statistického editoru IBM SPSS Statistics. Hodnota Asymp. Sig. představuje hodnotu p-value. Hodnota p-value je vyšší než hladina významnosti α (5 %). Nulovou hypotézu nelze zamítnout a lze předpokládat její platnost. Konstrukční typ budovy nemá statisticky významný vliv na výslednou vzduchotěsnost budovy. Z hlediska vzduchotěsné obálky budovy je zcela irelevantní, zda je konstrukce lehká, masivní nebo kombinovaná.

$$p - \text{value} (0,606) > \alpha (0,050) \Rightarrow \text{NEZAMÍTÁME } H_0$$



12.3 Stavební materiál svislých nosných konstrukcí

Z provedeného statistického šetření bylo prokázáno, že konstrukční typ dle plošné hmotnosti nemá statistický vliv na výslednou vzduchotěsnost budovy. I přes neprokázání vlivu konstrukčního řešení objektu na výslednou vzduchotěsnost, je žádoucí ověřit či vyloučit potenciaální vliv základního (nosného) stavebního materiálu na výslednou neprůvzdušnost obvodového pláště.

	Stavební materiál	Absolutní četnost	Relativní četnosti
Stěna	Lehký dřevěný skelet	63	42 %
	Konstrukce SWP	20	13 %
	Dřevěné sendvičové panely	15	10 %
	Vápenopískové tvárnice	26	17 %
	Železobeton ve ztraceném bednění	10	7 %
	Pórobetonové tvárnice	9	6 %
	Keramické tvárnice	1	1 %
	Jiné, nespecifikováno	6	4 %

Tab. č. 21: Stavební materiál nosných svislých konstrukcí

Tabulka č. 21 sumarizuje použité stavební materiály výběrového souboru využité během realizace svislých nosných konstrukcí. Dřevěné konstrukce jsou zastoupeny 3 typy stěnových materiálů. Nejpočetněji je zastoupen lehký dřevěný skelet (systém „2by4“). Název rámového systému je odvozen od základního průřezu dřevěného hranolu (2 x 4 palce, respektive 4 x 10 cm). Průřezy dřevěných hranolů se časem změnily, původní název však zůstal. Dříve byly hojně využívány masivní dřevěné průřezy, které jsou v současnosti nahrazovány optimalizovanými I nosníky, zejména z důvodu eliminace tepelných mostů. Osová rozteč dřevěných hranolů či nosníků je nejčastěji 625 mm. Do prostoru mezi nosníky je následně vkládána tepelná izolace. Následně je celá konstrukce opláštěna velkoformátovými deskami ze strany interiéru i z exteriéru. Dřevěná sloupková konstrukce s výplňovou tepelnou izolací je využita u 42 % objektů. Konstrukce SWP (Solid Wood Panel) představuje velkoformátovou konstrukci z panelů CLT (Cross Laminated Timber). Panely jsou tvořeny vrstvami lamel, nejčastěji z rostlého smrkového dřeva. Orientace vláken v každé vrstvě je kolmá na vrstvy sousední. Výhoda masivních dřevěných panelů tkví především v jednoduchosti a rychlosti provedení. Posledním využitým systémem svislých nosných konstrukcí je samonosná sendvičová konstrukce. Sendvičový panel je složen z desek, nejčastěji OSB desek, mezi které je vložena tepelná izolace ze stabilizovaného samozhášivého polystyrenu. Díky předem připraveným sendvičovým panelům je celá výstavba opět rychlá a jednoduchá.



Ze zděných konstrukcí jsou nejčastěji využity vápenopískové tvárnice (17 %). Velmi často jsou také využívány pórobetonové tvárnice. Vápenopískové materiály patří mezi stavební materiály s minimálním dopadem na životní prostředí, neboť k jejich výrobě je potřeba pouze vápno, písek a voda. Tyto materiály vynikají výbornou akumulací tepla a s výbornými akustickými vlastnostmi. Pórobetonové tvárnice zaujímají 6 % výběrového souboru. Keramické cihlové tvárnice nejsou u energeticky efektivní výstavby příliš rozšířeny. Velmi častou nevýhodou zdících materiálů je potřeba jejich dodatečného zateplení kontaktním zateplovacím systémem (ETICS).

Monolitické konstrukce energeticky pasivních budov jsou využity u 17 % objektů. Připravený beton je čerpán do systémů ztraceného bednění z různých materiálů – např. pěnového polystyrenu. Vnější i vnitřní strany ztraceného bednění jsou nejčastěji opatřeny klasickými omítkovými systémy.

Exploratorní charakteristiky	Lehký dřevěný skelet	Konstrukce SWP	Dřevěné sendvičové panely	Vápenopískové tvárnice	ŽB ve ztraceném bednění	Pórobetonové tvárnice
Aritmetický průměr	,4024	,2925	,4273	0,3031	,4760	,4644
Chyba střed. hod.	,01961	,03130	,04176	,02906	,04547	,05738
Medián	,4000	,2700	,3700	,2950	,5400	,4500
Rozptyl výběru	,024	,020	,026	,022	,021	,030
Směrodatná odchylka	,15563	,14000	,16175	,14816	,14377	,17213
n_{50} Minimum	,11	,14	,20	,06	,26	,25
Maximum	,88	,60	,70	,60	,60	,80
Rozpětí	,77	,46	,50	,55	,34	,55
Interkvantilové roz.	,24	,18	,30	,28	,29	,26
Šikmost	,343	1,112	,171	,197	-,673	,773
Špičatost	-,001	,648	-1,319	-,823	-1,492	,418
Počet	63	20	15	26	10	9

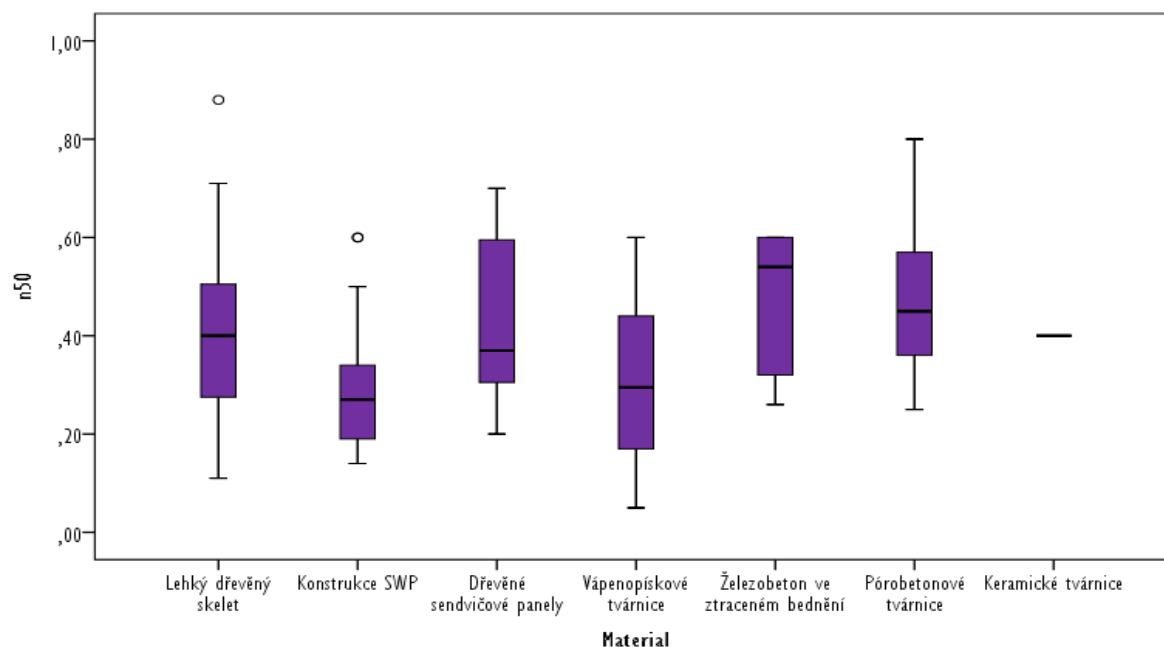
Tab. č. 22: Exploratorní charakteristiky v závislosti na materiálu stěn, IBM SPSS Statistics [15]

Výše uvedená tabulka uvádí popisnou charakteristiku dat v závislosti na stavebním materiálu svislých konstrukcí. U keramických tvárnic není možné provést výpočet exploratorních charakteristik ani testování normality dat, neboť výběr obsahuje pouze jednu konstantní hodnotu. Od výpočtu deskriptivních charakteristik a testování normality výběru keramických tvárnic je abstrahováno.

Ze sestrojeného krabicového diagramu je patrná značná rozptýlenost jednotlivých stavebních materiálů svislých konstrukcí vzhledem k celkové intenzitě výměny vzduchu n_{50} .



Při porovnání jednotlivých kvartilů je zřejmé, že konstrukce z masivních dřevěných panelů dosahuje nejvyšší míry vzduchotěsnosti budov. Velmi nízkého mediánu míry neprůvzdušnosti dosahují také vápenopískové konstrukce. Naopak, nejvyšší medián (střední hodnota souboru) je u konstrukcí na bázi pórobetonu.



Graf č. 16: Krabicový diagram vzduchotěsnosti budov v závislosti na materiálu stěn, IBM SPSS Statistics [15]

Pro stanovení vhodného testu k ověření významnosti materiálu konstrukce vzhledem k vzduchotěsnosti budov je nutné opět testovat, zda výběry pocházejí z normálního rozdělení. Tabulka č. 23 znázorňuje výsledky provedeného testu normality. S výjimkou konstrukcí z masivních dřevěných panelů (konstrukce SWP) Kolmogorovův – Smirnovův test nevyvrátil normalitu dat.

Tests of Normality

	Materiál stěn	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
n50	Lehký dřevěný skelet	,110	63	,056	,967	63	,087
	Konstrukce SWP	,207	20	,024	,865	20	,010
	Dřevěné sendvičové panely	,176	15	,200*	,923	15	,212
	Vápenopískové tvárnice	,135	26	,200*	,967	26	,546
	Železobeton ve ztraceném bednění	,220	10	,184	,801	10	,015
	Pórobetonové tvárnice	,133	9	,200*	,954	9	,729

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

n50 is constant when Material = Keramické tvárnice. It has been omitted.

Tab. č. 23: Test normality dat výběrů materiálů stěny, IBM SPSS Statistics [15]



S ohledem na neverifikování normality dat u všech výběrů faktoru základního materiálu svislých konstrukcí je nutné opět použít k ověření hypotézy závilosti vzduchotěsnosti na stavebním materiálu Kruskal – Wallisův test, který stanovuje následující nulovou a alternativní hypotézu:

- **H₀**: Materiál stěn nemá statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy,
- **H_A**: Materiál stěn má statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy.

Ranks			Test Statistics ^{a,b}	
Konstrukce	n	Mean Rank		n ₅₀
n50			Chi-Square	19,948
Lehký dřevěný skelet	63	78,07	df	6
Konstrukce SWP	20	48,48	Asymp. Sig.	,003
Dřevěné sendvičové panely	15	84,50		
Vápenopískové tvárnice	26	53,85		
Železobeton ve ztraceném bednění	10	98,85		
Pórobetonové tvárnice	9	90,39		
Keramické tvárnice	1	82,50		
Total	144			

a. Kruskal Wallis Test
 b. Grouping Variable: material stěny

Tab. č. 24: Kruskal-Wallisův test pro materiál stěn, IBM SPSS Statistics [15]

Hladina významnosti (0,003), pro kterou lze zamítnout nulovou hypotézu, je menší než stanovená hladina významnosti α 0,05. Zamítáme nulovou hypotézu ve prospěch alternativní hypotézy, tj. lze tvrdit, že stavební materiál svislých konstrukcí má statisticky významný vliv na výslednou vzduchotěsnost budovy. Ze statistického hlediska nejvyšší míry vzduchotěsnosti obálky budovy dosahují konstrukce na bázi masivních dřevěných panelů (SWP) vyrobených z křížem lepeného lamelového dřeva. Naopak nejvyšší míry průvzdušnosti skrze netěsnosti obálky budovy dosahují monolitické železobetonové konstrukce ve ztraceném bednění z tepelně izolačních materiálů.

$$p - \text{value} (0,003) < \alpha (0,050) \Rightarrow \text{ZAMÍTÁME } H_0 \text{ VE PROSPĚCH } H_A$$



12.4 Materiál hlavní vzduchotěsné vrstvy

Vzduchotěsnost u dřevostaveb je zabezpečena pomocí konstrukčních desek na bázi dřeva nebo plastové fólie - parozábrany. Desky na bázi dřeva se používají častěji. Nejčastěji jsou používané dřevoštěpkové desky OSB a dřevovláknité tvrdé desky MDF. Nejvhodnější jsou desky na pero a drážku, jejichž spoj se vyplní trvale pružným tmelem a přelepí páskami. Výhoda oproti parozábrany je v tom, že se dům současně zavětruje, čímž vzniká velice tuhá kompozitní stavba. Nevýhodou fólií je jejich menší odolnost proti propíchnutí nebo proříznutí. Vzduchotěsnicí vrstva se umísťuje na vnitřní straně konstrukce za instalační mezerou, v případě jednovrstvé skladby na vnitřní straně stěn. Instalační mezera o malé tloušťce (asi 50 mm) má hned několik výhod – zmenšuje počet prostupů vedení vzduchotěsnicí vrstvou (elektřina, voda, atd.), při provádění instalací se snižuje nebezpečí poškození dokončené vzduchotěsnicí vrstvy. [5][32]

U masivních dřevostaveb realizovaných z masivních dřevěných panelů (SWP, Solid Wood Panel) je dostatečně vzduchotěsná obálka zajištěna samotnou masivní dřevěnou konstrukcí. Lepené spoje mezi lamelami a absence suků zajišťuje výbornou neprůvzdušnost panelů. Jednotlivé spoje panelů je nutné dostatečně přelepit vzduchotěsnými páskami stejně jako u OSB desek.

U masivních konstrukcí plní funkci vzduchotěsnicí vrstvy vnitřní omítka bez prasklin, která musí být provedena spojitě na všech obvodových stěnách. Dosáhnout dostatečné vzduchotěsnosti pouze použitím malty je velmi obtížné a pracné a téměř vždy se vyskytují nežádoucí spáry. Neomítnutá zděná konstrukce má značnou průdušnost přes mezery v maltě. Omítnuté musí být i stropy, nebo v případě monolitických stropů vzduchotěsně napojené na obvodové zdi. Je ovšem důležité zajistit dokonalé utěsnění vedení instalací, jejich vyústek a dalších prostupů jako kotvící prvky a jiné. V případě viditelné vnitřní zděné konstrukce bez omítky je vzduchotěsnou vrstvou nutno umístit mezi interiérové zdivo a další vrstvu. [5][32]

Vzduchotěsnost spodní stavby je zajištěna hydroizolací proti zemní vlhkosti. Problematické je především vzduchotěsné napojení vodorovné vrstvy na svislé konstrukce.



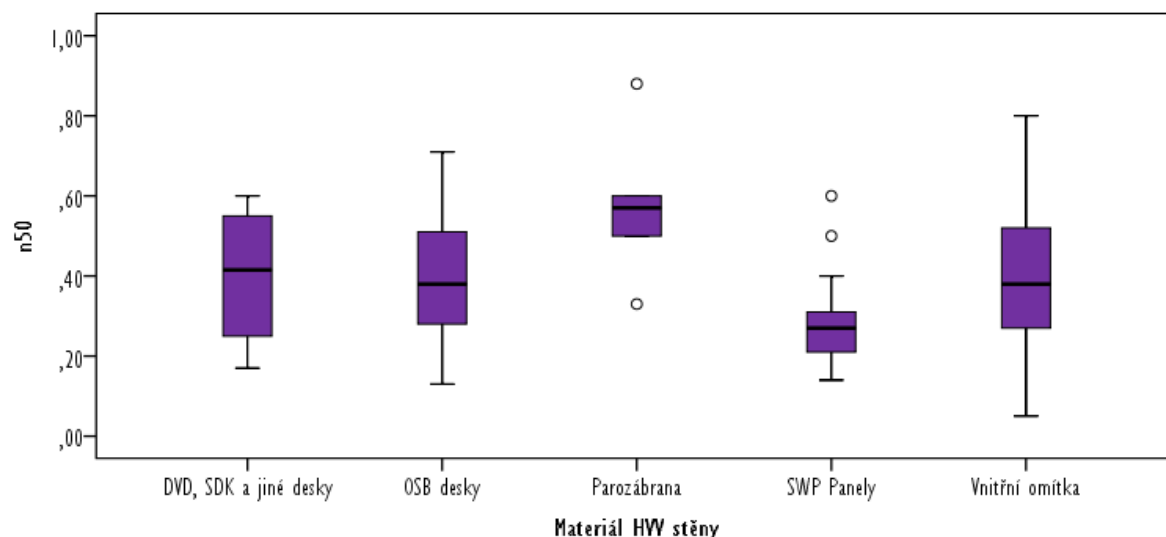
Dle výsledků Paretovy analýzy patří materiál vzduchotěsné vrstvy mezi druhou nejvýznamnější příčinou zodpovědnou za nedostatečnou neprůvzdušnost obálky. Dosavadní výzkumy a experimenty prokázaly, že některé stavební materiály mají tendenci být vzduchotěsnější než jiné. Volba materiálu vzduchotěsné vrstvy je do značné míry závislá na typu a hlavním stavebním materiálu konstrukce. Před samotným testováním statistické významnosti je nutné stanovit následující hypotézy:

- **H₀**: Materiál HVV má statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy,
- **H_A**: Materiál HVV nemá statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy.

Tabulka č. 25 znázorňuje základní materiály hlavní vzduchotěsné vrstvy v závislosti na typu konstrukce (stěna, střecha, podlaha) energeticky pasivních budov včetně jejich zastoupení ve výběrovém souboru. U lehkých konstrukcí převládají OSB desky, které jsou přelepeny speciálními vzduchotěsnými páskami. Jiné typy desek jsou využity pouze ojediněle. U zděných konstrukcí je vzduchotěsná rovina obálky budovy tvořena spojitě a kontinuálně provedenou vnitřní omítkou. Ne u všech objektů jsou známy materiály hlavní vzduchotěsné vrstvy. Neznámé nespecifikované materiály jsou vyloučeny z výběrového souboru a nadále s nimi není počítáno. Statistický vliv materiálu hlavní vzduchotěsné vrstvy je dále testován u svislých stěnových konstrukcí, u kterých byla provedena statistická analýza jejich konstrukčního typu a materiálů.

Konstrukce	Materiál HVV	Absolutní četnost	Relativní četnost
Stěna	OSB desky	65	43 %
	Vnitřní omítka	49	33 %
	SWP panely	18	12 %
	Parozábrana	5	3 %
	DVD, SDK a jiné desky	4	3 %
	Nespecifikováno	9	6 %
Střecha	OSB desky	86	57 %
	Vnitřní omítka	21	14 %
	Parozábrana	19	13 %
	DVD, SDK a jiné desky	7	5 %
	SWP panely	4	3 %
	Nespecifikováno	13	9 %
Podlaha	Hydroizolace	134	89 %
	Nespecifikováno	16	11 %

Tab. č. 25: Materiály HVV dle typu konstrukce a jejich relativní četnosti



Graf č. 17: Krabicové diagramy vzduchotěsnosti v závislosti na materiálu HVV stěny, IBM SPSS Statistics [15]

Graf č. 17 zobrazuje rozložení hodnot míry vzduchotěsnosti obvodového pláště v závislosti na typu materiálu hlavní vzduchotěsné vrstvy obvodových stěn. Rozložení hodnot vzduchotěsnosti u parozábrany a masivních dřevěných panelů se značně odlišuje od rozložení hodnot vzduchotěsnosti u dřevovláknitých (DVD) desek, sádkartonových (SDK) desek (SDK), OSB desek a u vnitřní omítky. Při porovnání mediánů jednotlivých výběrů je patrné, že statisticky nejvyšší hodnoty průvzdušnosti obvodového pláště dosahují stěny s parozábranou. Naproti tomu, nejnižší střední hodnoty dosahují stěny realizované z předem připravených masivních dřevěných panelů.

Z provedeného Kolmogorova – Smirnovova a Shapiro – Wilkova testu normality je patrné, že ne všechny výběry pocházejí z normálního rozdělení. Pro testování, zda má materiál hlavní vzduchotěsné vrstvy statisticky významný vliv na výslednou vzduchotěsnost, je nutno použít neparametrický Kruskal – Wallisův test.

Tests of Normality

	Konstrukce	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
n50	DVD, SDK a jiné desky	,201	4		,973	4	,858
	OSB desky	,092	65	,200*	,965	65	,066
	Parozábrana	,252	5	,200*	,953	5	,760
	SWP Panely	,213	18	,030	,887	18	,034
	Vnitřní omítka	,108	49	,200*	,974	49	,337

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Tab. č. 26: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat dle materiálů HVV stěny, IBM SPSS Statistics [15]



- **H₀**: Materiál HVV stěn nemá statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy
 (Mediány všechny úrovně faktorů jsou stejné, $M_1 = M_2 = M_3$),
- **H_A**: Materiál HVV stěn statisticky významně ovlivňuje vzduchotěsnost budovy
 (Alespoň jeden medián se liší od ostatních).

Ranks			Test Statistics ^{a,b}	
Konstrukce	n	Mean Rank		n ₅₀
n50 DVD, SDK a jiné desky	4	77,63	Chi-Square	12,234
OSB desky	65	74,40	df	4
Parozábrana	5	111,10	Asymp. Sig.	,016
SWP Panely	18	45,83	a. Kruskal Wallis Test	
Vnitřní omítka	49	71,10	b. Grouping Variable: material HVV stěny	
Total	141			

Tab. č. 27: Kruskal-Wallisův test pro materiál HVV stěny, IBM SPSS Statistics [15]

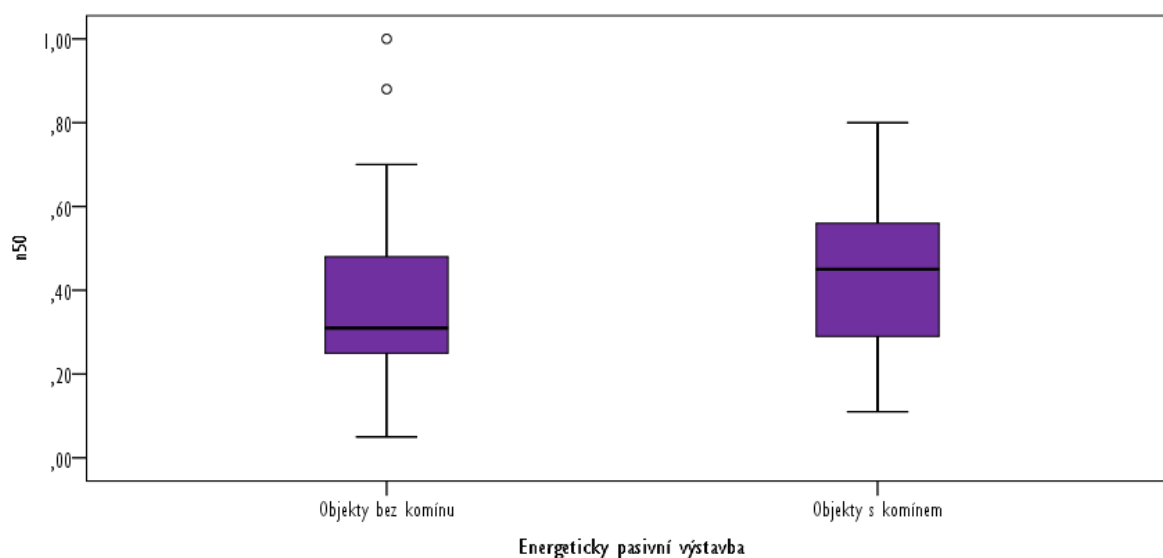
Z výsledků Kruskal - Wallisova testu je patrné, že hodnota p-value (Asymp. Sig.) 0,016 je nižší než námi stanovená hladina významnosti α 0,050 (5 %). Nulovou hypotézu zamítáme a předpokládáme platnost alternativní hypotézy. Provedeným statistickým testováním hypotézy pomocí Kruskal – Wallisova testu lze stanovit, že vzduchotěsnost obálky budovy energeticky pasivních domů je statisticky závislá na volbě materiálu hlavní vzduchotěsné vrstvy. Významnost materiálu hlavní vzduchotěsné vrstvy potvrdila i provedená Paretova analýza. Ze statistického hlediska dosahují konstrukce s parozábranou vyšší míry průvzdušnosti obvodového pláště, než jiné konstrukce. Naopak nejnižší hodnoty průvzdušnosti dosahují konstrukce montované z masivních dřevěných panelů.

$$p - \text{value} (0,016) < \alpha (0,050) \Rightarrow \text{ZAMÍTÁME } H_0 \text{ VE PROSPĚCH } H_A$$

12.5 Komínové těleso

Realizace komínového tělesa je mezi laickou i odbornou veřejností považována za výrazně netěsný prvek v oblasti výstavby energeticky efektivních budov. Kotle či krbové vložky narušují vzduchotěsnost obálky, neboť potřebují ke svému provozu dostatečný přísun vzduchu. U tradičních spalovacích systémů je zdrojem vzduchu interiér, který je propojen s exteriérem právě komínovým tělesem. Propojením vzniká cesta pro nežádoucí a nekontrolovatelný únik vzduchu z interiéru do exteriéru. Nekontrolovatelný únik vzduchu taktéž negativně ovlivňuje účinnost větracího systému se zpětným získáváním tepla. Taktéž samotná konstrukce komína není u běžných systémů dostatečně vzduchotěsná, čímž dochází k úniku vzduchu skrze komínový plášť nebo např. netěsnými vymetacími dvířky. [10][32]

Řešením je využití moderních systémů vzduchotěsného komína, které jsou již v současnosti běžně na trhu. Požadavky na vzduchotěsnost komína běžně splňují nerezové komíny. Spoje jednotlivých dílců komínového tělesa musí být řešeny vzduchotěsně, stejně jako je nezbytné dobře utěsnit prostup komínového tělesa skrze střešní rovinu. Problémům se vzduchotěsností komínového tělesa se dá předejít, pokud je komín umístěn mimo vzduchotěsnou obálku budovy. V případě kotle či krbu je nutné zajistit přívod vzduchu z exteriéru, nikoliv z interiéru. [10]



Graf č. 18: Krabicové diagramy v závislosti na realizaci komínového tělesa, IBM SPSS Statistics [15]

Ve výběrovém souboru převládají objekty bez komínového tělesa (57 %). Z krabicových diagramů zobrazující rozložení hodnot výběrů objektů s komínovým tělesem



a bez je patrné, že medián objektů bez komínového tělesa je značně nižší, než medián u objektů s komínovým tělesem.

Tests of Normality

	Energeticky pasivní výstavba	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
n50	Objekty bez komínu	,123	85	,003	,940	85	,001
	Objekty s komínem	,105	65	,074	,969	65	,108

a. Lilliefors Significance Correction

Tab. č. 28: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat dle komínového tělesa, IBM SPSS Statistics [15]

Vzhledem k faktu, že u výběru bez komínového tělesa nebylo verifikováno Gaussovo rozdělení dat, je pro ověření statistické významnosti komínového tělesa využito neparametrický Kruskal - Wallisův test. Pro statistické ověření významnosti komínového tělesa jsou stanoveny následující hypotézy:

- **H₀**: Komínové těleso nemá statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy (Mediány obou výběrů jsou stejné, $M_1 = M_2$),
- **H_A**: Komínové těleso má statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy (Mediány výběrů si nejsou rovny, $M_1 \neq M_2$).

Ranks			Test Statistics ^{a,b}	
Energeticky pasivní výstavba	n	Mean Rank		n ₅₀
n50 Objekty bez komínu	85	67,46	Chi-Square	6,724
Objekty s komínem	65	86,01	df	1
Total	150		Asymp. Sig.	,010

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: Komín

Tab. č. 29: Kruskal-Wallisův test závislosti v závislosti na realizaci komína, IBM SPSS Statistics [15]

Vyjádřená hodnota významnosti (0,010) nepřekročila stanovenou hladinu významnosti α (0,050) a zamítáme nulovou hypotézu ve prospěch alternativní hypotézy. Na základě výběrového souboru je prokázáno, že existence komínového tělesa má statisticky významný vliv na výslednou průvzdušnost objektu. Objekty bez komínového tělesa dosahují vyšší míry vzduchotěsnosti než objekty s instalovaným komínovým tělesem.

$$p - \text{value} (0,010) < \alpha (0,050) \Rightarrow \text{ZAMÍTÁME } H_0 \text{ VE PROSPĚCH } H_A$$



12.6 Realizace a kvalita provedení energeticky pasivních budov

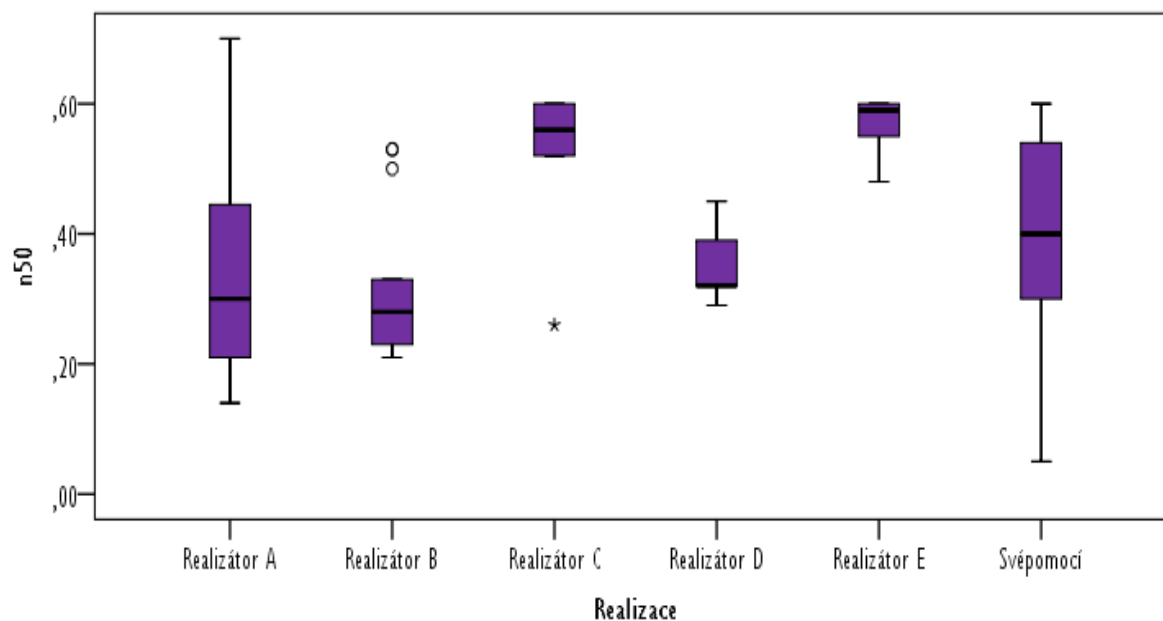
Kvalita provedení a průběžný dohled kontrolní osoby významně ovlivňuje výslednou vzduchotěsnost obálky budovy. Ze sestrojeného diagramu příčin a následků (Ishikawa diagram) a jeho následného vyhodnocení pomocí Paretovy analýzy je právě realizace a kvalita provedení stavby tím nejvýznamnějším faktorem z hlediska vzduchotěsné obálky budovy. „*Pokud má navržený systém vzduchotěsných opatření skutečně plnit svou funkci, je potřeba k jeho realizaci přistupovat s větší důsledností, než tomu bylo doposud běžné.*“ [32]

Existují dva způsoby výstavby energeticky efektivních domů. Prvním z nich je realizace pomocí profesionálních stavebních firem, druhou možností je výstavba domů svépomocí. V České republice existuje nespočet realizátorských firem zabývajících se výstavbou energeticky pasivních domů. Pro statistické ověření, či vyloučení, významnosti kvality realizace jsou testovány pouze realizátorské firmy, které z výběrového souboru realizovaly 5 nebo více energeticky pasivních domů. Realizátoři, prováděcí firmy, kteří realizovali méně než 5 energeticky pasivních domů ze 150 testovaných objektů, jsou ze statistického šetření vyloučeni. Do statistického testování je vybráno 5 realizátorských firem a výběr realizace stavby svépomocí. Z důvodu utajení identity, nebo-li anonymity, jsou realizátorské firmy označeny písmeny A až E, neboť cílem disertační práce není zhodnocení kvality realizace konkrétních firem, ale pouze ověření možné závilosti neprůvzdušnosti budov na kvalitě realizace. Nutným axiomem pro testování je tvrzení, že každá prováděcí firma má stanovené vlastní vnitřní kvalitativní předpisy, které zajišťují stejnou kvalitu provedení u všech svých realizovaných staveb.

Dle Kalameese [21], podíl výstavby svépomocí, popřípadě pouze za pomoci neodborné a nekvalifikované pracovní síly, má v bytové výstavbě malého rozměru (jednogeneční rodinné domy) stále stoupající tendenci. S vybranými realizátorskými firmami je porovnávám i výběr energeticky pasivních objektů realizovaných svépomocí. Z hlediska vzduchotěsné obálky budovy je žádoucí, aby v případě realizace svépomocí byl zajištěn profesionální odborný dohled a průběžné kontroly. Z dosavadních zahraničních experimentů je prokázáno, že absence vyškolených a zkušených pracovníků a nedůsledné provedení detailů či kontroly je zdrojem častých problémů a nedostatečné neprůvzdušnosti objektu. Z důvodu finanční a časové náročnosti dochází k nedostatečnému zalepení spojů OSB desek či použití nekvalitních vzduchotěsných pásek, což je velmi častým problémem dřevěných staveb prováděných svépomocí.



Z grafického znázornění dat pomocí krabicových diagramů je na první pohled patrné různorodé rozložení hodnot mezi jednotlivými výběry reprezentující prováděcí firmy. Z asymetrie dat některých z výběrů se dá predikovat, že ne u všech výběrů faktoru bude prokázáno normální rozdělení. Krabicový diagram diagnostikoval odlehle i extrémní hodnoty, které je ovšem žádoucí v souboru ponechat, neboť se nejedná o chybné měření ani o chybu při přepisu dat.



Graf č. 19: Krabicové diagramy vzduchotěsnosti v závislosti na realizaci, IBM SPSS Statistics [15]

Pomocí Kolmogorovova – Smirnovova testu nebyla prokázána normalita dat u výběru Realizátor B. Podle Kolmogorovova – Smirnovova testu je možné všechny ostatní rozložení považovat za normální, neboť hodnota p-value (Sig.) je větší než stanovená hladina významnosti 5 %.

Tests of Normality

	Realizátor	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
n50	Realizátor A	,152	32	,057	,967	32	,011
	Realizátor B	,258	13	,018	,865	13	,005
	Realizátor C	,334	5	,072	,923	5	,024
	Realizátor D	,299	5	,163	,967	5	,397
	Realizátor E	,294	5	,182	,801	5	,083
	Svépomocí	,108	14	,200*	,954	14	,333

a. Lilliefors Significance Correction

*. This is a lower bound of the true significance.

Tab. č. 30: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat pro výběry realizátorů, IBM SPSS Statistics [15]



Pro testování možné závilosti výběrů s neznámým rozložením je opět možné využít Kruskal – Wallisův test, pro který jsou stanoveny následující hypotézy:

- **H₀**: Realizátor objektu nemá statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy
 (Mediány všechny úrovně faktorů jsou stejné, $M_1 = M_2 = M_3$),
- **H_A**: Realizátor objektu má statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy
 (Alespoň jeden medián se liší od ostatních).

Ranks				Test Statistics ^{a,b}	
Realizace	n	Mean Rank		n_{50}	
n50	Realizátor A	32	32,91	Chi-Square	13,165
	Realizátor B	13	29,00	df	5
	Realizátor C	5	53,80	Asymp. Sig.	,022
	Realizátor D	5	38,20	a. Kruskal Wallis Test	
	Realizátor E	5	61,70	b. Grouping Variable: Realizator	
	Svépomocí	14	41,18		
	Total	74			

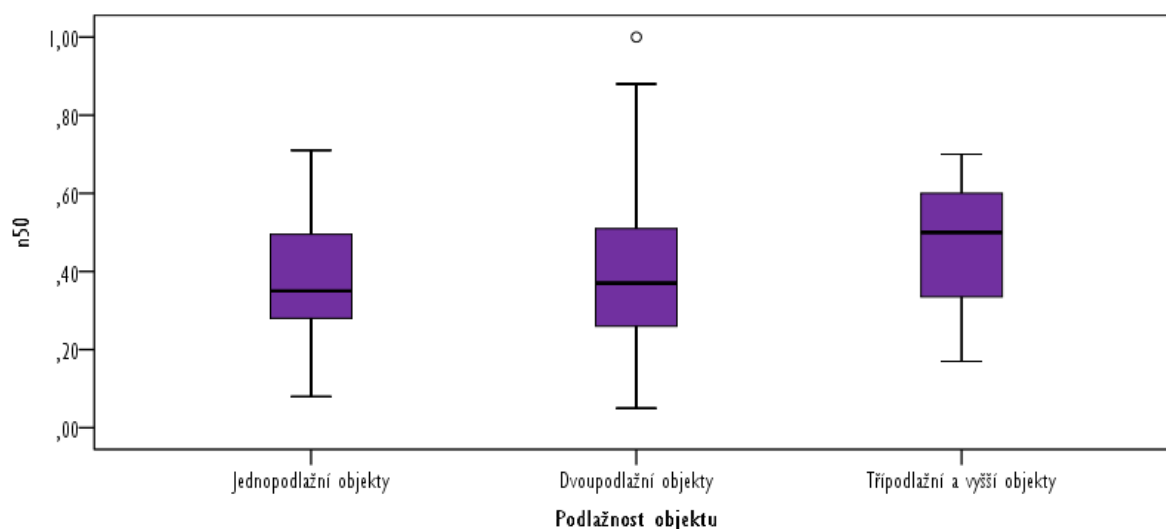
Tab. č. 31: Kruskal - Wallisův test pro realizaci objektu, IBM SPSS Statistics [15]

Deskriptivní charakteristiky vyjádřené krabicovými diagramy prokázaly značnou asymetrii rozložení sledované hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} mezi jednotlivými výběry faktoru. Vyjádřená hladina významnosti (0,022) pro kterou lze zamítnout nulovou hypotézu je menší, než stanovená hladina významnosti α (0,05). Zamítáme nulovou hypotézu ve prospěch alternativní hypotézy, tj. kvalita provedení, respektive výběr realizační firmy, má statisticky významný vliv na výslednou vzduchotěsnost budovy. Při výstavbě objektu je nutné věnovat značnou pozornost výběru vhodného realizátora stavebního objektu. Při výběru je také vhodné se seznámit s jednotlivými referencemi daných realizátorů a mimo jiné sledovat běžně dosahovanou úroveň vzduchotěsnosti stavby. V případě stavby svépomocí je doporučeno zajistit kontrolu provedení vzduchotěsné obálky budovy před zakrytím hlavní vzduchotěsné vrstvy pohledovou konstrukcí.

$$p - \text{value} (0,022) < \alpha (0,050) \Rightarrow \text{ZAMÍTÁME } H_0 \text{ VE PROSPĚCH } H_A$$

12.7 Podlažnost objektu

Cílem kapitoly je ověřit hypotézu, že vícepodlažní objekty jsou více prodyšné, než objekty jednopodlažní, jak je často prezentováno v laických i odborných publikacích. [21] [38] Potencionální vliv počtu podlaží na výslednou vzduchotěsnost obálky budovy je ověřován na výběrovém souboru zahrnující převážně jednopodlažní a dvoupodlažní budovy. Téměř tři čtvrtiny objektů výběrového souboru (71 %) jsou realizovány jako dvoupodlažní objekty. Jednopodlažní, přízemní, objekty zaujímají 27 % výběrového souboru. Objekty o třech a více podlaží jsou ve výběrovém souboru zastoupeny v minimální míře (2%).



Graf č. 20: Krabicové diagramy vzduchotěsnosti v závislosti na realizaci, IBM SPSS Statistics [15]

Z vykreslených box - plotů je patrné, že dosažené hodnoty vzduchotěsnosti budov pro jednopodlažní a dvoupodlažní budovy jsou rovnocenné bez výrazné asymetrie. Střední hodnota (medián) třípodlažních a vyšších budov je mírně vyšší, než u budov jednopodlažních a dvoupodlažních. Vzhledem k velmi nízkému počtu hodnot objektů o třech a více podlaží (pouze 3) není z krabicových diagramů statisticky relevantní predikovat, že více podlažní budovy dosahují vyšší míry průvzdušnosti než budovy o menším počtu podlaží.

Tests of Normality

	Podlažnost objektu	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
n50	Jednopodlažní objekty	,119	40	,156	,958	40	,141
	Dvoupodlažní objekty	,091	107	,029	,959	107	,002
	Třípodlažní a vyšší objekty	,231	3		,980	3	,731

a. Lilliefors Significance Correction

Tab. č. 32: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat dle podlažnosti, IBM SPSS Statistics [15]



Pro verifikaci, zda výběry faktoru pocházejí z normálního rozložení, byl využit Kolmogorovův – Smirnovův test a Shapiro - Wilkův test pro soubory o malém počtu hodnot. Normalita dat není prokázána pro výběr dvoupodlažních budov. Pro ověření hypotézy, zda počet podlaží je statisticky významným faktorem ovlivňující výslednou neprůvzdušnost obálky budovy, je nutné využít neparametrický Kruskal – Wallisův test. Prvním krokem samotného testování je nutnost stanovit nulovou a alternativní hypotézu:

- **H₀**: Podlažnost objektu nemá statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy (Mediány všechny úrovně faktorů jsou stejné, $M_1 = M_2 = M_3$),
- **H_A**: Podlažnost objektu má statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy (Alespoň jeden medián se liší od ostatních).

Ranks			Test Statistics ^{a,b}	
Podlažnost objektu	n	Mean Rank		n ₅₀
n50 Jednopodlažní objekty	40	75,39	Chi-Square	,351
Dvoupodlažní objekty	107	72,13	df	2
Třípodlažní a vyšší objekty	3	90,17	Asymp. Sig.	,839
Total	150			

a. Kruskal Wallis Test
 b. Grouping Variable: Podlažnost objektu

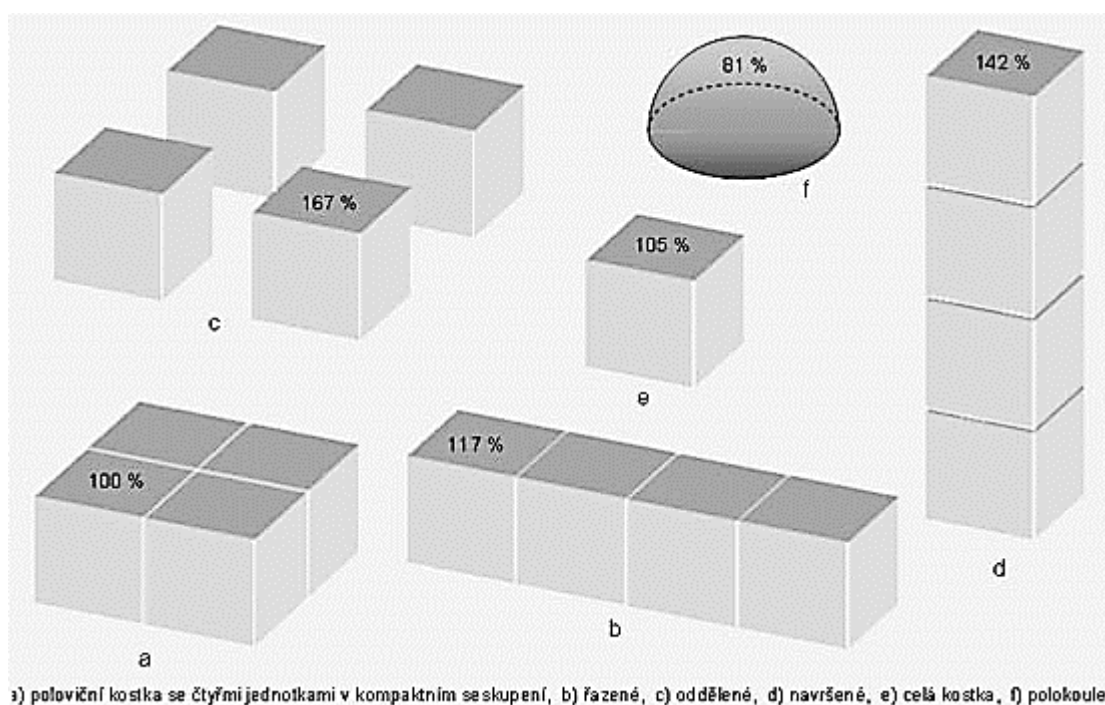
Tab. č. 33: Kruskal-Wallisův test závislosti vzduchotěsnosti na počtu podlaží, IBM SPSS Statistics [15]

Dosažená hladina významnosti (0,839), pro kterou lze zamítnout nulovou hypotézu, je větší než zvolená hladina významnosti α 0,05. Nulovou hypotézu nezamítáme na hladině významnosti 5 % a předpokládáme její platnost. Z hlediska vzduchotěsnosti obvodového pláště není volba počtu podlaží u energeticky efektivní výstavby objektů malého rozsahu statisticky významná.

$$p - \text{value} (0,839) > \alpha (0,050) \Rightarrow \text{NEZAMÍTÁME } H_0$$

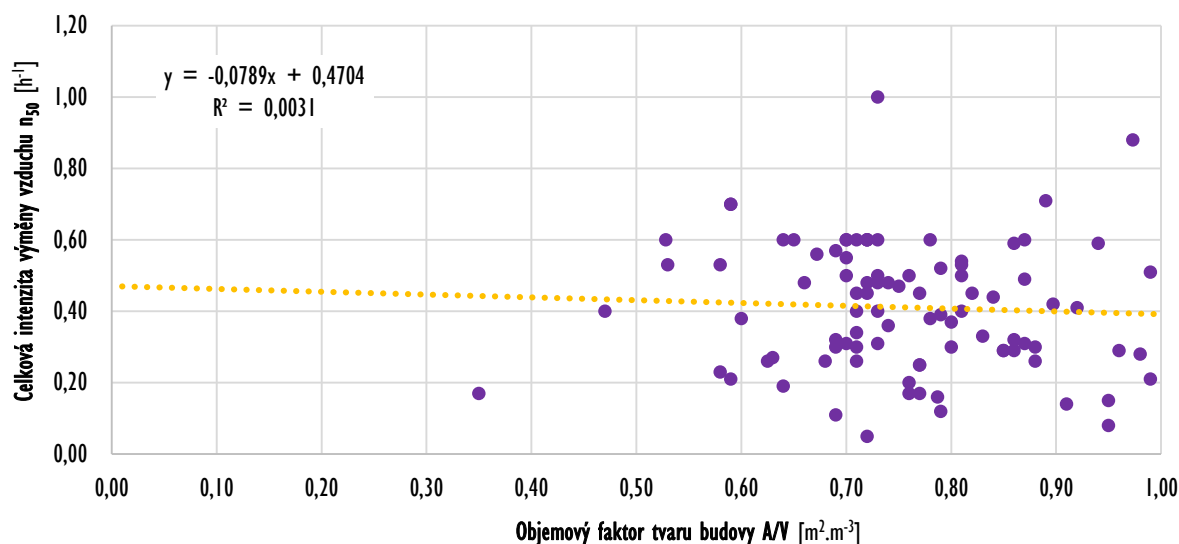
12.8 Tvarové řešení budovy

Pro vzájemnou komparaci tvarového řešení budov se nejčastěji využívá objemový faktor tvaru budovy. Objemový faktor tvaru budovy A/V [m^2/m^3] je jedním ze základních parametrů porovnávající objem a tvar objektu. Objemový faktor tvaru budovy A/V je dán poměrem celkové plochy všech ochlazovaných konstrukcí ohraničující objem budovy A_e [m^2] a vnějším objemem vytápěné zóny V [m^3]. Celková tepelná ztráta budovy je závislá na celkové velikosti ochlazovaných konstrukcí. Čím je ochlazovaná plocha větší, tím vyšší je také celková tepelná ztráta a naopak.



Obr. č. 24: Vliv tvaru objektu na tepelné ztráty [45]

Je žádoucí, aby objemový faktor tvaru budovy byl co nejmenší. Pro energeticky efektivní budovy by neměl být vyšší než $0,70 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Tvar budovy by měl být jednoduchý, kompaktní, bez zbytečných výčnělků či úskoků. Optimálním tvarem budovy je koule, respektive polokoule. Díky špatné proveditelnosti, však není z praktického hlediska koule příliš vhodná. Vhodným a velmi často realizovaným tvarem budovy je ležatý kvádr orientovaný delší stranou na jih. Obrázek č. 24 znázorňuje vliv tvaru objektu na tepelné ztráty. Jednotlivá procenta uvádí poměr velikosti ochlazované plochy obálky budovy, bez plochy v kontaktu se zemí, při stejném objemu. [45]



Graf č. 21: Korelační diagram faktoru tvaru budovy A/V a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50}

Sestrojený korelační, respektive bodový diagram XY, znázorňuje vzájemné rozložení sledovaných proměnných faktoru tvaru budovy a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} . Rozptyl hodnot se jeví značně náhodný a nepředvídatelný. V grafu je znázorněna lineární spojnice, jejíž koeficient spolehlivosti dosahuje hodnoty pouze 0,3 %. Nízký koeficient spolehlivosti značí absolutní lineární nezávislost obou sledovaných proměnných.

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Faktor tvaru budovy A/V	,095	93	,037	,981	93	,186
n_{50}	,089	93	,067	,972	93	,046

a. Lilliefors Significance Correction

Tab. č. 34: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat pro faktor tvaru budovy A/V, IBM SPSS Statistics [15]

Protože Kolmogorovův – Smirnovův test nepotvrdil normální rozložení dat, je nutné využít Spearmanovu korelační analýzu. Vyjádřený Spearmanův koeficient pořadové korelace je záporný a relativně malý (-0,120). Sílu závislosti faktoru tvaru budovy a výsledné vzduchotěsnosti budovy lze považovat za slabou. I přesto, že síla vzájemné závislosti je malá, je nutné provést Spearmanův test významnosti. Ověřujeme následující hypotézy:

- **H₀**: Objemový faktor tvaru budovy a vzduchotěsnost jsou náhodné nezávislé veličiny,
- **H_A**: Objemový faktor tvaru budovy a vzduchotěsnost jsou náhodné závislé veličiny.



Correlations

		n50	Faktor tvaru budovy A/V	
Spearman's rho	Correlation Coefficient	1,000	-,120	
	Faktor tvaru budovy A/V	Sig. (2-tailed)	,251	
	N	93	93	
	Correlation Coefficient	-,120	1,000	
	n50	Sig. (2-tailed)	,251	.
	N	93	93	

Tab. č. 35: Neparametrická korelace pro vzduchotěsnost a faktor tvaru budovy A/V, IBM SPSS Statistics [15]

Vyjádřená hodnota významnosti p-value pomocí statistického editoru IBM SPSS Statistics (0,251) je výrazně vyšší než stanovená hladina významnosti α . Nulovou hypotézu nemůžeme zamítnout na hladině významnosti 5 % a předpokládáme její platnost. Objemový faktor tvaru budovy A/V popisující tvar a objem objektu nemá statisticky významný vliv na neprůvzdušnost budovy. Objemový faktor tvaru budovy A/V a celková intenzita výměny vzduchu n_{50} jsou dvě navzájem nezávislé proměnné. Vliv faktoru tvaru budovy na vzduchotěsnost vyjádřený koeficientem determinace je pouhých 1,44 %.

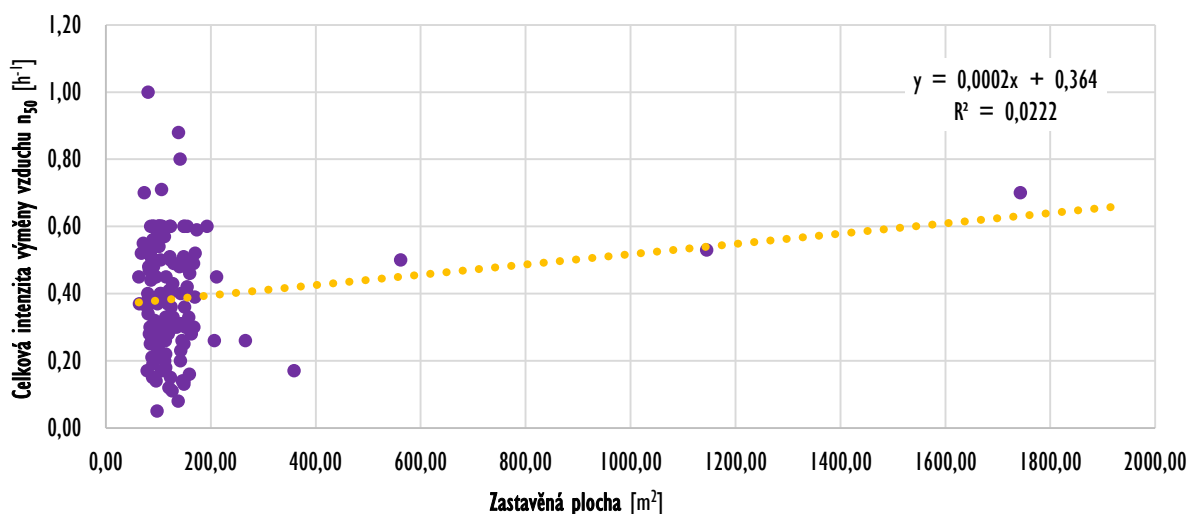
$$p - \text{value} (0,251) > \alpha (0,050) \Rightarrow \text{NEZAMÍTÁME } H_0$$



12.9 Ukazatele velikosti objektu

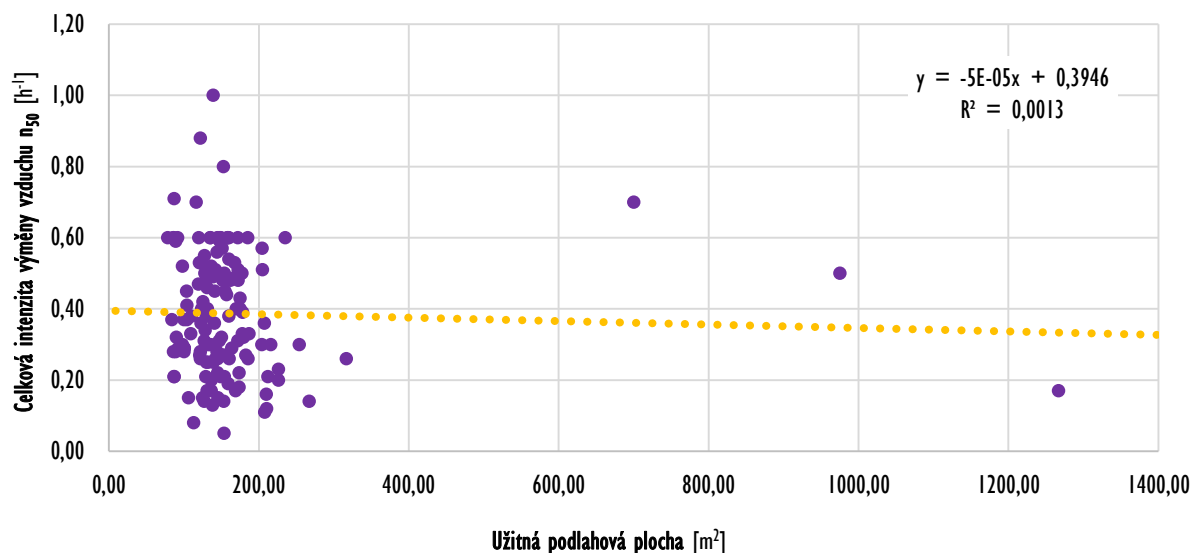
Velikost objektu je možné charakterizovat několika plošnými či objemovými ukazateli. Znalost některých z nich je nezbytná pro měření vzduchotěsnosti obálky budovy metodou tlakového spádu s externím ventilátorem. Rovnice 4 a 5 vyjadřují různým způsobem neprůvzdušnost objektu a počítají s ochlazovanou obálkou budovy, popř. objemem vytápěného prostoru posuzované budovy. Pro účely disertační práce byly vybrány následující ukazatele determinující velikost objektu: zastavěná plocha, užitná podlahová plocha, objem vytápěného prostoru, obestavěný prostor a ochlazovaná plocha obálky budovy. Ověřuje se předpoklad: čím vyšší hodnota ukazatele velikosti objektu, tím menší je vzduchotěsnosti objektu. Předpoklad je založen na hypotéze, že se vzrůstající velikostí objektu se úměrně zvyšuje pravděpodobnost výskytu lokálních netěsností v obvodovém plášti. Níže uvedené korelační diagramy znázorňují závislosti ukazatelů velikosti objektu v závislosti na výsledné neprůvzdušnosti objektu. V bodových grafech je znázorněná lineární spojnice trendu. Nelze předpokládat lineární závislost, neboť hodnoty spolehlivosti (R^2) jsou velmi nízké, téměř nulové.

Zastavěnou plochou stavby A_{zast} [m^2] se rozumí plocha ohraničená ortogonálními průměty vnějšího líce svislých konstrukcí všech nadzemních i podzemních podlaží do vodorovné roviny.



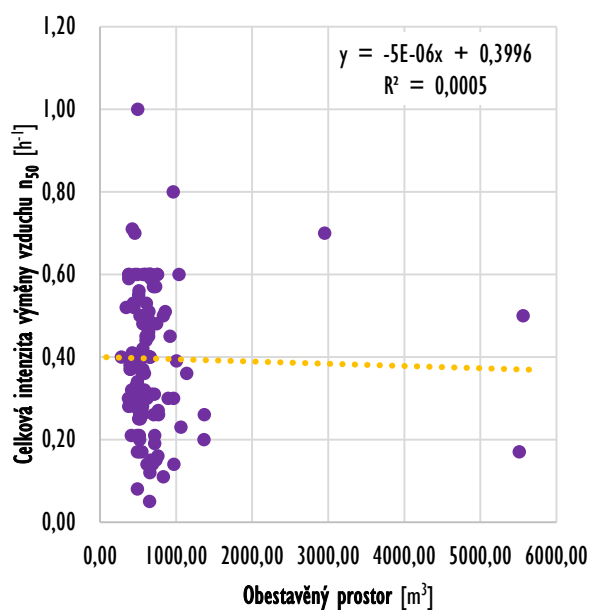
Graf č. 22: Korelační diagram zastavěné plochy a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50}

Užitná podlahová plocha $A_{užit}$ [m^2] se měří uvnitř vnějších stěn, ale nezahrnuje komponenty, které vytyčují hranice stavby. Součástí užitné plochy obytné budovy jsou plochy používané jako kuchyně, obývací pokoje, ložnice a místnosti s příslušenstvím, sklepy a společné prostory používané majiteli bytových jednotek.

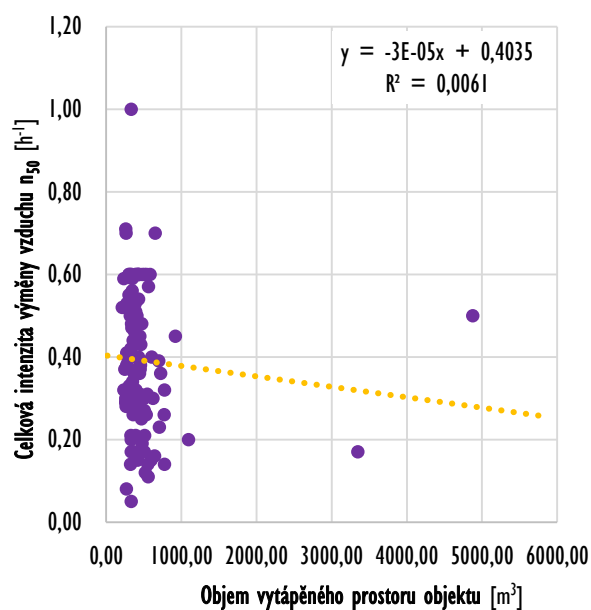


Graf č. 23: Korelační diagram užité podlahové plochy a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50}

Obestavěný prostor V_{obest} [m³] je definován jako celkový objem budovy stanovený z vnějších rozměrů, tj. včetně obalových a vnitřních konstrukcí. Objemem vytápěného prostoru V_{vyt} [m³] se uvažuje objem vzduchu v zóně objektu s vytápěním.

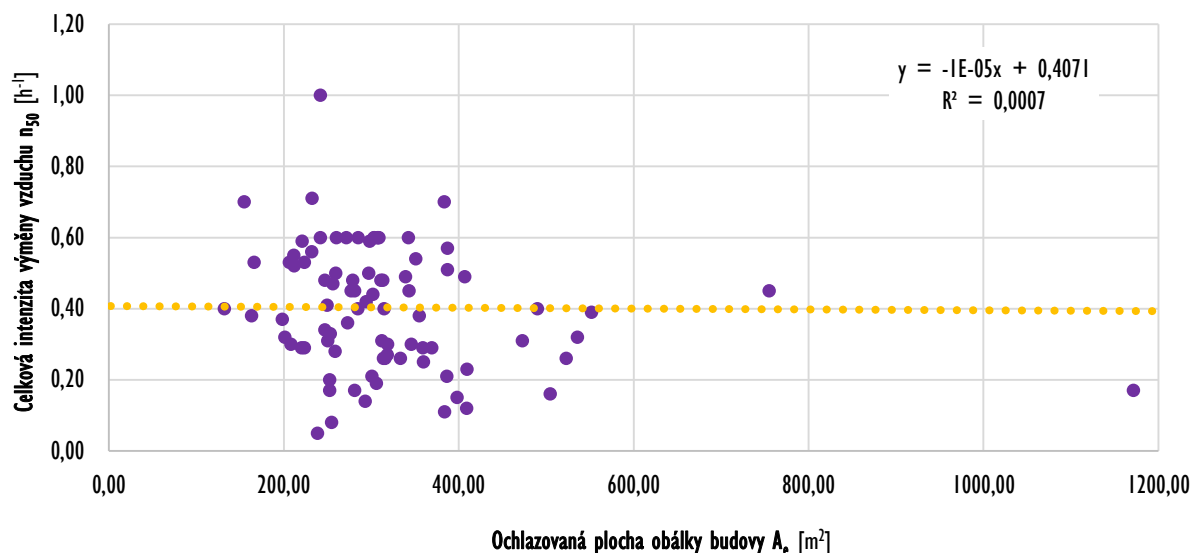


Graf č. 24: Korelační diagram obestavěného prostoru a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} (vlevo)



Graf č. 25: Korelační diagram vytápěného prostoru a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} (vpravo)

Celková ochlazovaná plocha obálky budovy A_e [m²] je dána součtem všech ochlazovaných obalových konstrukcí mezi vytápěnou zónou a exteriérem, popř. nevytápěnými prostory.



Obr. č. 25: Korelační diagram plochy ochlazované obálky a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50}

Stejně jako celková intenzita výměny vzduchu n_{50} jsou všechny hodnocené ukazatele velikosti objektu kvantitativní spojitou proměnnou a mohou nabývat libovolné hodnoty z oboru kladných reálných čísel. Pro verifikace statistické závislosti dvou kvantitativních spojitých proměnných se používá korelační analýza.

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
n50	,085	81	,200*	,971	81	,068
Azast	,384	81	,000	,308	81	,000
Aužit	,337	81	,000	,387	81	,000
Vvyt	,342	81	,000	,291	81	,000
Vobest	,382	81	,000	,338	81	,000
Ae	,354	81	,000	,268	81	,000

a. Lilliefors Significance Correction

*. This is a lower bound of the true significance.

Tab. č. 36: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat pro ukazatele velikosti, IBM SPSS Statistics [15]

Kolmogorovův test normality neprokázal normální rozložení dat u žádného z ukazatelů velikosti objektu. Pro testování vzájemné síly vztahu je využit Spearmanův korelační koeficient založený na pořadí proměnných. Hlavní výhodou Spearmanova korelačního koeficientu je menší citlivost na odlehlé hodnoty výběrů a fakt, že se neomezuje pouze na lineární závislost. Pomocí Spearmanova testu nezávislosti ověřujeme následující hypotézy:

- **H0:** Daný ukazatel velikosti objektu a vzduchotěsnost jsou náhodné nezávislé veličiny,
- **HA:** Daný ukazatel velikosti objektu a vzduchotěsnost jsou náhodné závislé veličiny.



Correlations

		n50	Azast	Aužit	Vvyt	Vobest	Ae
Spearman's rho	Correlation Coefficient	1,000	-,193	-,042	-,131	-,127	-,249*
	n50 Sig. (2-tailed)		,085	,711	,242	,260	,025
	N	81	81	81	81	81	81
	Correlation Coefficient	-,193	1,000	,392**	,400**	,573**	,507**
	Azast Sig. (2-tailed)	0,,5		,000	,000	,000	,000
	N	81	81	81	81	81	81
	Correlation Coefficient	-,042	,392**	1,000	,834**	,845**	,630**
	Aužit Sig. (2-tailed)	,711	,000		,000	,000	,000
	N	81	81	81	81	81	81
	Correlation Coefficient	-,131	,400**	,834**	1,000	,859**	,875**
	Vvyt Sig. (2-tailed)	,242	,000	,000		,000	,000
	N	81	81	81	81	81	81
	Correlation Coefficient	-,127	,573**	,845**	,859**	1,000	,740**
	Vobest Sig. (2-tailed)	,260	,000	,000	,000		,000
	N	81	81	81	81	81	81
	Correlation Coefficient	-,249*	,507**	,630**	,875**	,740**	1,000
	Ae Sig. (2-tailed)	,025	,000	,000	,000	,000	
	N	81	81	81	81	81	81

*. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Tab. č. 37: Neparametrická korelace pro vzduchotěsnost a ukazatele velikosti, IBM SPSS Statistics [15]

Vyjádřené hladiny významnosti (Sig.) velikostních ukazatelů zastavěné plochy (0,085), užitné podlahové plochy (0,711), objemu vytápěného prostoru (0,242) a obestavěného prostoru (0,260) jsou vyšší než stanovená hladina významnosti α (0,050). Na hladině významnosti 5 % nelze zamítnout nulovou hypotézu a předpokládáme její platnost s pravděpodobností 95 %. Zmíněné velikostní ukazatele jsou zcela náhodné proměnné vzhledem ke vzduchotěsnosti.

$$p - \text{value} (0,850; 0,711; 0,242; 0,260) > \alpha (0,050) \Rightarrow \text{NEZAMÍTÁME } H_0$$

Pozorovaná hladina významnosti Spearmanova testu nezávislosti pro vzájemnou závislost ochlazované plochy obálky budovy a celkové intenzity výměny vzduchu (0,025) je menší, než zvolená hladina významnosti 5 %. Na 5% hladině významnosti α zamítáme nulovou hypotézu o vzájemné nezávislosti ochlazované plochy obálky budovy A_e a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} . Ochlazovaná plocha obálky budovy a celková intenzita výměny vzduchu jsou náhodně navzájem korelované veličiny s koeficientem determinace 6,20 %.

$$p - \text{value} (0,025) < \alpha (0,050) \Rightarrow \text{ZAMÍTÁME } H_0 \text{ VE PROSPĚCH } H_A$$



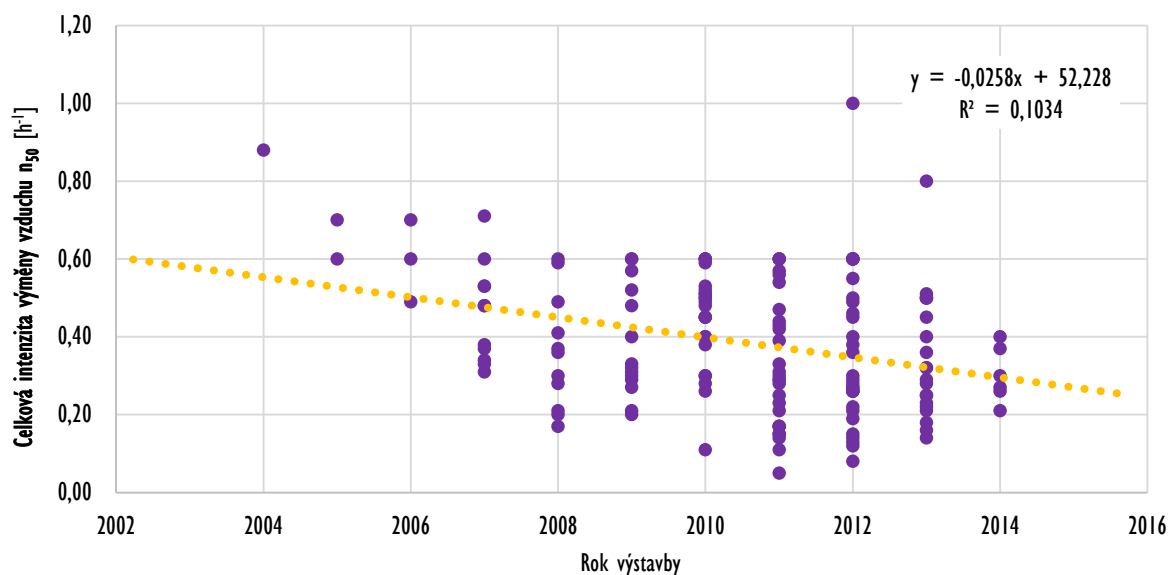
12.10 Vývojové trendy vzduchotěsnosti - rok výstavby objektu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 8.1 Výzkum vzduchotěsnosti obálky budovy u nás a v zahraničí, nedostatečná vzduchotěsnost obálky budovy je v České republice poměrně aktuální a intenzivně řešenou problematikou, na rozdíl od zahraničí, kde se problematice vzduchotěsnosti intenzivně věnují již několik desítek let. Prvním mezníkem zabývající se požadavky na neprůvzdušnost obvodového pláště byla revize ČSN 73 0540 – 2 v roce 2002. Do té doby byla nedostatečná neprůvzdušnost považována za problém nedostatečně těsných okenních spár a styků stavebních dílců. [32]

V listopadu 2011 vešla v platnost revize normy ČSN 73 0540-2: 2011, která zpřísňuje požadavky na tepelně technické charakteristiky budov. Změnám nebyly ani ušetřeny normové doporučené hodnoty týkající se vzduchotěsnosti staveb. Nově norma zavádí přednostně doporučované hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50,N}$. [8] Vzhledem k tomu, že dosažení doporučených hodnot celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50,N}$ není přímo požadováno, ale pouze doporučeno, tak ne zcela každý energeticky pasivní dům v České republice má změřenou hodnotu celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} při tlakovém rozdílu 50 Pa.

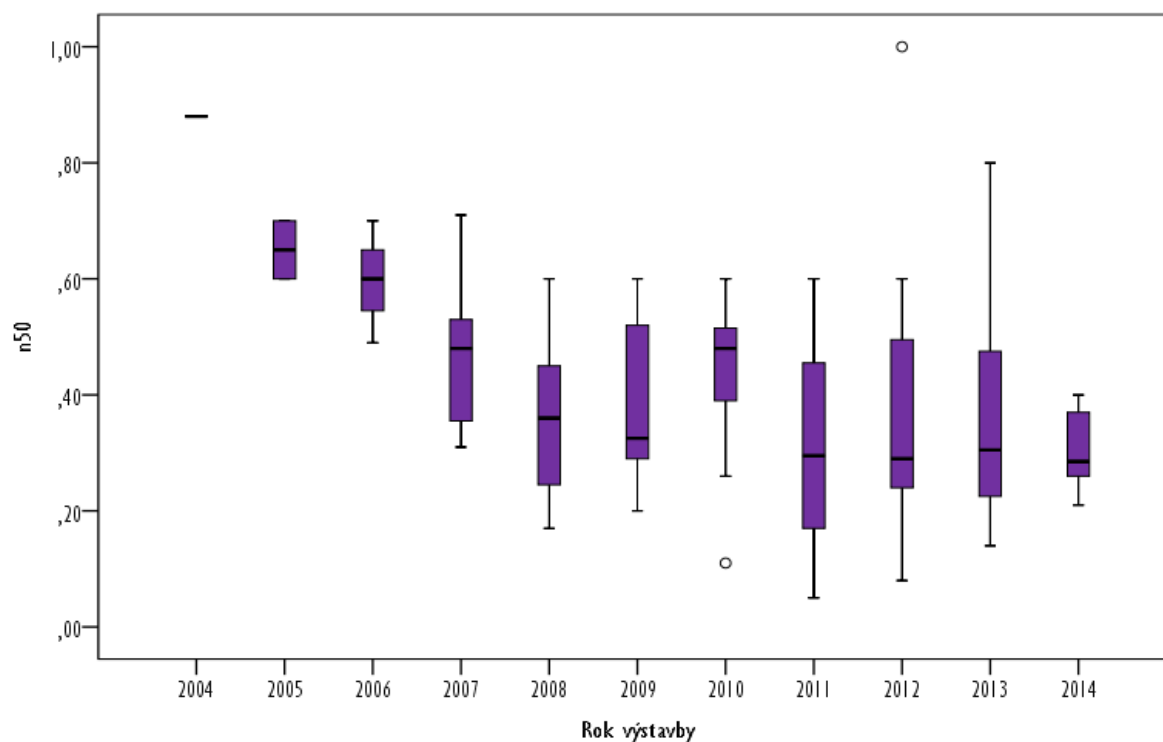
Zvýšený zájem o měření vzduchotěsnosti energeticky pasivních domů vyvolal až v roce 2009 program Ministerstva životního prostředí České republiky Zelená úsporám, který je zaměřen na využití obnovitelných zdrojů a úsporu energie v budovách. Program Zelená úsporám stanovil podmínky, kdy je možné požádat o dotaci v případě výstavby energeticky pasivního objektu. Jednou z mnoha podmínek je také požadavek dosažení celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} $0,60 \text{ h}^{-1}$ dle TNI 73 0329 (2009). V současné době již probíhá 3. etapa dotačního programu, pod názvem Nová zelená úsporám, který umožňuje získat dotaci v období od roku 2014 až 2020. Zájem o měření průvzdušnosti obvodového pláště novostaveb reflektuje harmonogram programu. V mezi pauzách, kdy je příjem žádostí o dotaci pozastaven, je patrný útlum a snížený zájem o měření neprůvzdušnosti obálky budovy. [31]

Graf č. 26 ilustruje závislost vzduchotěsnosti energeticky pasivní výstavby v závislosti na roku výstavby. Výběrový soubor zahrnuje objekty realizované v období od roku 2004 do roku 2014. Z proložené lineární spojnice trendu ($y = -0,0258x + 52,228$) se spolehlivostí 10 %, je patrný trend snižování neprůvzdušnosti obálky budovy v závislosti na době výstavby. Lze předpokládat, že novější výstavba dosahuje vyšší míry vzduchotěsnosti, než výstavba starší.



Graf č. 26: Vliv doby výstavby na výslednou vzduchotěsnost objektu

Při porovnání výběrů celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} v jednotlivých letech je patrná značná rozptýlenost hodnot mezi jednotlivými výběry. Z porovnání středních hodnot výběrů, tj. mediánů, je patrná klesající tendence míry neprůvzdušnosti. Od roku 2004 do roku 2008 je patrný prudký pokles středních hodnoty výběrů. Od roku 2011 pokles míry neprůvzdušnosti již není tak prudký, ovšem stále má degradující tendenci. Výběr roku 2010 se odchyluje od popsaného modelu a průběhu vzduchotěsnosti v závislosti na roku výstavby.



Graf č. 27: Krabicové diagramy v závislosti na roku výstavby, IBM SPSS Statistics [15]



Tests of Normality

Rok výstavby	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
2005	,260	2				
2006	,179	3		,999	3	,948
2007	,190	11	,200*	,927	11	,383
2008	,118	11	,200*	,931	11	,423
n50 2009	,224	14	,055	,896	14	,097
2010	,171	23	,078	,918	23	,059
2011	,117	28	,200*	,933	28	,073
2012	,173	31	,019	,09	31	,012
2013	,158	20	,200*	,899	20	,040
2014	,176	6	,200*	,951	6	,750

*. This is a lower bound of the true significance.

a. n50 is constant when rok = 2004. It has been omitted.

b. Lilliefors Significance Correction

Tab. č. 38: Kolmogorovův test normality dle doby výstavby, IBM SPSS Statistics [15]

Vyjádřená hladina významnosti výběru roku 2012 (0,019) neprokázala normální rozložení dat na hladině významnosti α 5 %. Výběry 2004, 2005, 2006 obsahují pouze malé množství hodnot pro verifikaci Gaussova rozložení. Výběr 2004 je konstantní a nelze provést statistické šetření pro verifikaci či odmítnutí normality dat. Výše zmíněné výběry nepocházejí z normálního rozložení dat. Předpokládáme neznámé rozložení dat, pro jejich rozhodování o statisticky významném vlivu je nutné využít neparametrické testy.

Ranks				Test Statistics ^{a,b}	
	Rok výstavby	n	Mean Rank		n ₅₀
n50	2004	1	149,00	Chi-Square	26,117
	2005	2	140,75	df	10
	2006	3	128,67	Asymp. Sig.	,022
	2007	11	98,18		
	2008	11	69,95		
	2009	14	78,11		
	2010	23	93,74		
	2011	28	61,98		
	2012	31	67,40		
	2013	20	63,08		
	2014	6	53,83		
	Total	150			

a. Kruskal Wallis Test
 b. Grouping Variable: Rok výstavby

Tab. č. 39: Kruskal – Wallisův test závislosti vzduchotěsnosti na době výstavby, IBM SPSS Statistics [15]



Pro ověření statistické významnosti je využit neparametrický Kruskal – Wallisův test. Testujeme nulovou hypotézu H_0 proti alternativní hypotéze H_A na hladině významnosti α (5 %) :

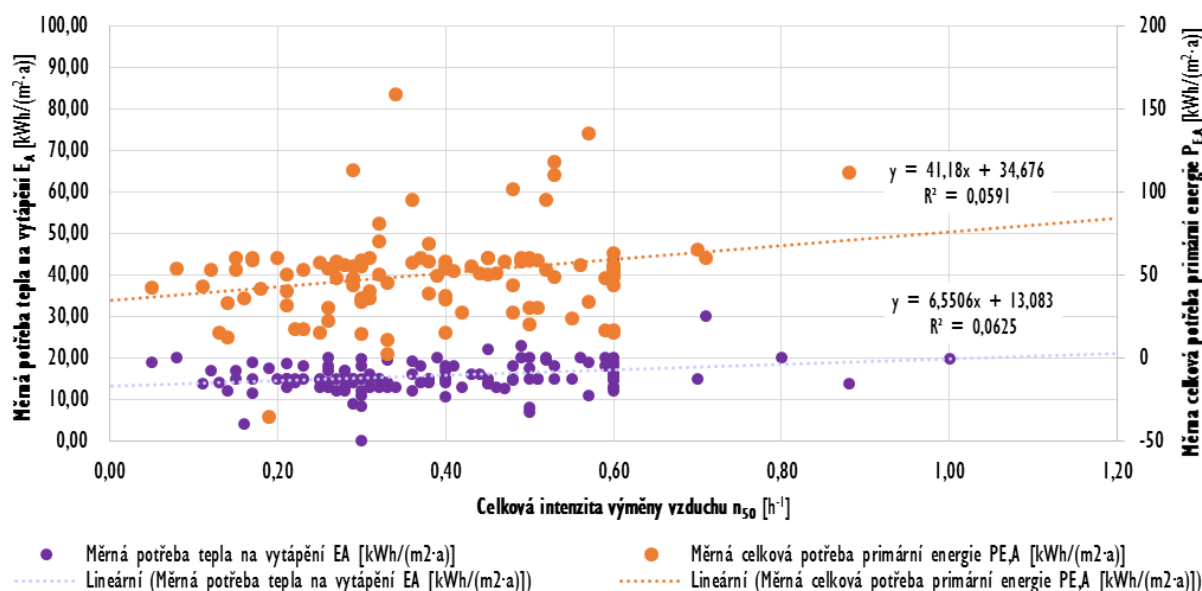
- **H_0** : Rok výstavby objektu nemá statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy (Mediány všechny úrovně faktorů jsou stejné, $M_1 = M_2 = M_3$),
- **H_A** : Rok výstavby objektu má statisticky významný vliv na vzduchotěsnost budovy (Alespoň jeden medián se liší od ostatních).

Výše uvedená tabulka reflektuje výpočet Kruskal – Wallisova testu ve statistickém editoru IBM SPSS Statistics. Vyjádřená hodnota významnosti p-value (0,022) je menší než stanovená hladina významnosti α (5 %). Test prokázal zamítnutí nulové hypotézy a přijetí alternativní hypotézy. Rok výstavby má statisticky významný vliv na výslednou vzduchotěsnost obálky budovy. Z porovnání grafických závislostí vyjadřující dobu výstavby a vzduchotěsnost, je patrné, že čím novější výstavba, tím vyšší vzduchotěsnost obálky budovy.

$p - value (0,025) < \alpha (0,050) \Rightarrow \mathbf{ZAMÍTÁME H_0 VE PROSPĚCH H_A}$

12.11 Statistická verifikace významnosti vzduchotěsnosti budov

V poslední kapitole statistické verifikace determinačních faktorů není statisticky testován již žádný z potenciačních faktorů vzduchotěsnosti, ale nýbrž statistický vliv samotné vzduchotěsnosti obálky budovy na energetickou náročnost objektu. Hlavním úkolem této kapitoly je potvrdit či vyloučit statisticky významný vliv vzduchotěsnosti objektu na měrnou potřebu tepla na vytápění E_A a celkovou potřebu primární energie $P_{E,A}$. Měrná potřeba tepla na vytápění E_A [kWh/(m²·a)] charakterizuje tepelně izolační vlastnosti budovy bez ohledu na účinnost topného systému či zdroje tepla a vyjadřuje množství tepla, které je vztaženo na jednotku plochy. Měrná potřeba primární energie $P_{E,A}$ [kWh/m²·a] udává potřebu primární energie na vytápění, přípravu teplé vody a technické systémy v kWh vztaženou na 1 m² posuzované plochy budovy za rok.



Graf č. 28: Korelační diagram ukazatelů energetické výkonnosti a celkové intenzity

Výše uvedený korelační diagram znázorňuje vzájemné závislosti základních ukazatelů energetické výkonnosti budovy (měrná potřeba tepla na vytápění a měrná celková potřeba primární energie) na celkové intenzitě výměny vzduchu n_{50} . V grafu jsou proloženy lineární spojnice trendů s vyjádřenými koeficienty spolehlivosti R^2 . Je možné předpokládat platnost hypotézy, že s klesající mírou vzduchotěsnosti obvodového pláště se zvyšuje energetická náročnost objektu. A naopak. Vzhledem k nízkým hodnotám koeficientů spolehlivosti lineární závislosti (cca 6 %) je pro statistickou verifikaci vzájemné významnosti vhodné využít neparametrickou Spearmanovu korelaci. Hlavní předností této neparametrické metody je



skutečnost, že výpočet lze využít pro popis lineární i nelineární závislosti dvou proměnných a zároveň není nutné ověřovat, zda jednotlivé výběry pocházejí z normálního rozložení.

		n50	P _{EA}	E _A
n50	Correlation Coefficient	1,000	,202*	,188*
	Sig. (2-tailed)		,037	,036
	N	150	107	124
Spearman's rho	Correlation Coefficient	,202*	1,000	,196
	Sig. (2-tailed)	,037		,057
	N	107	107	95
E _A	Correlation Coefficient	,188*		1,000
	Sig. (2-tailed)	,36		
	N	124	95	124

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Tab. č. 40: Neparametrická korelace pro vzduchotěsnost a energetickou výkonnost, IBM SPSS Statistics [15]

Vyjádřené hodnoty pořadového korelačního součinitele (0,188 a 0,202) reflektují nízkou až střední závislost. Vzájemnou závislost, respektive nezávislost, je nutné verifikovat pomocí Spearmanova testu nezávislosti, pro který jsou stanoveny následující hypotézy:

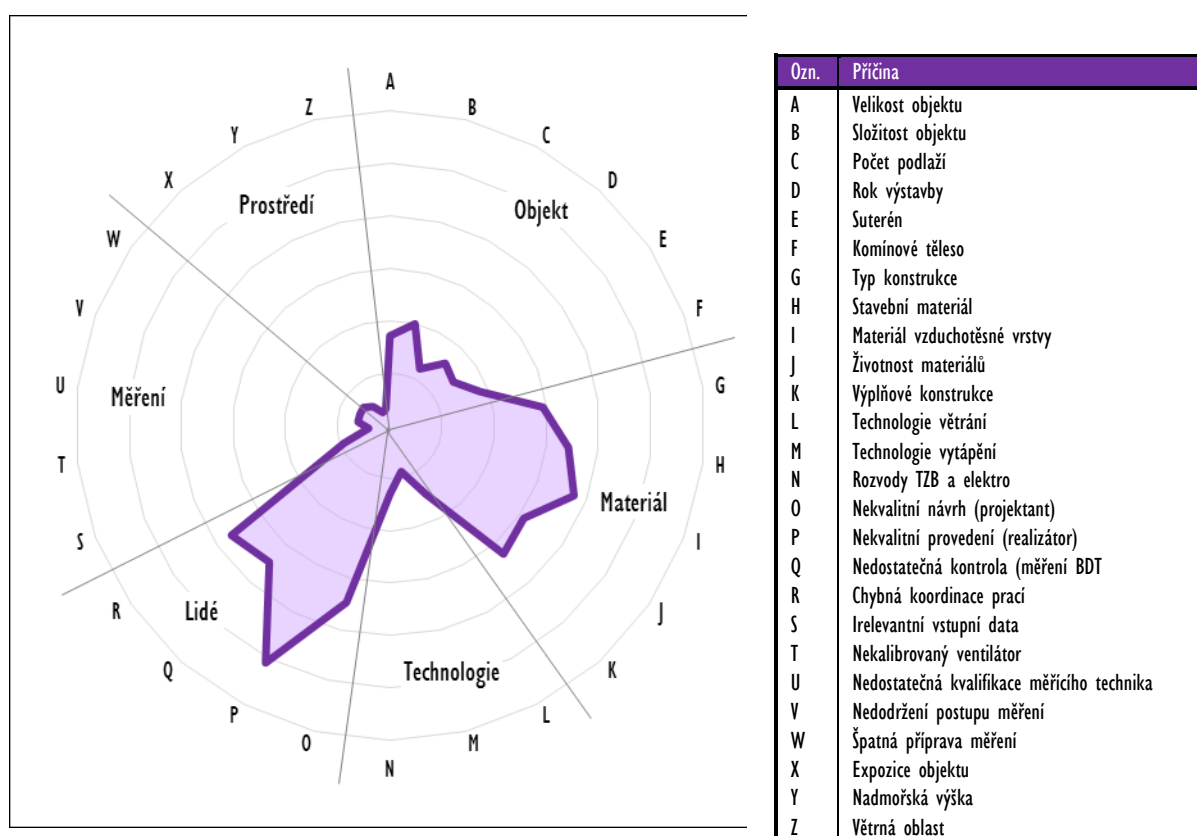
- **H₀**: Ukazatel energ. výkonnosti a vzduchotěsnost jsou náhodné nezávislé veličiny,
- **H_A**: Ukazatel energ. výkonnosti a vzduchotěsnost jsou náhodné závislé veličiny.

Hladina významnosti obou posuzovaných ukazatelů energetické výkonnosti je menší než stanovená kritická hladina významnosti α (5 %). Na zadané hladině významnosti 5 % nulovou hypotézu zamítáme u obou ukazatelů energetické výkonnosti a předpokládáme platnost alternativní hypotézy. Testem nezávislosti pomocí Spearmanova korelačního koeficientu byla prokázána malá až střední lineární či nelineární závislost proměnné n_{50} na měrné potřebě tepla na vytápění E_A a měrné celkové potřebě primární energie $P_{E,A}$. Celková intenzita výměny vzduchu n_{50} ovlivňuje výslednou měrnou potřebu tepla na vytápění z 3,534 % a celkové potřebě primární energie ze 4,080 %.

- $p - value (0,036; 0,037) < \alpha (0,050) \Rightarrow$ **ZAMÍTÁME H₀ VE PROSPĚCH H_A**

13 Výsledky disertační práce s uvedením nových poznatků

Výsledky Paretovy analýzy jasně identifikují jako hlavní nejvýznamnější příčinu nedostatečné výsledné vzduchotěsnosti obálky budovy nekvalitní provedení, tj. kvalitu realizace objektu. Z výsledného souhrnu Paretovy analýzy (Graf č. 29) je patrné, že právě vlivy a příčiny způsobené lidmi a materiálem jsou významné z hlediska kvalitní vzduchotěsné obálky objektu. Nekvalitní provedení, materiál vzduchotěsné vrstvy, chybná koordinace prací, nedostatečná kontrola, stavební materiál a výplňové konstrukce jsou nejvýznamnějšími faktory ovlivňující výslednou neprůvzdušnost objektu až o 50 %. Optimalizace nejvýznamnějších faktorů může přinést významnou redukci hodnot neprůvzdušnosti objektu a tím i zvyšovat energetickou výkonnost současné výstavby.



Graf č. 29: Souhrn výsledků Paretovy analýzy nedostatečné vzduchotěsnosti budov

Stěžejní část doktorské disertační práce je věnována statistickému testování selektovaných determinačních faktorů vzduchotěsnosti obálky budovy. S ohledem na neverifikování normálního (Gaussova) rozložení dat u všech výběrů faktorů je pro testování hypotéz použito neparametrických nástrojů a metod. V závislosti na typech proměnných je aplikována metoda Spearmanovy pořadové korelace, Spearmanův test nezávislosti či Kruskal



– Wallisův test. Vyjádřená hladina významnosti (p-value) je komparována s předem stanovou, běžně užívanou hladinou významnosti α (5 %).

Níže uvedená tabulka reprezentuje výsledky statistického testování vzájemného vlivu verifikovaných determinačních faktorů stanovených na základě Ishikawa diagramu. Pro výběrový soubor jsou použita sekundární data z volně dostupného a relevantního zdroje – databáze Centra Pasivního domu ČR, která jsou doplněna o měření FAST, VŠB TUO. Výběrový soubor je tvořen 150 referenčními energeticky pasivními objekty.

Výběr realizátora, výběr stavebního materiálu, výběr materiálu hlavní vzduchotěsné vrstvy, existence komínového tělesa, ohlazovaná plocha obálky budovy a rok výstavby jsou determinační faktory, u kterých byl prokázán statisticky významný vliv na výslednou celkovou intenzitu výměny vzduchu n_{50} . Zbylé testované faktory lze považovat za staticky nevýznamné s ohledem na konečnou vzduchotěsnost obálky budovy. Ochlazovaná plocha obálky budovy je spojitou kvantitativní proměnnou, pro kterou lze vyjádřit koeficient determinace. Ochlazovaná obálka budovy ovlivňuje výslednou vzduchotěsnost budovy z 6,2 %. Z 93,8 % je vzduchotěsnost obvodového pláště ovlivněna jinými faktory, než je právě ochlazovaná obálka budovy.

Determinační faktor	Statistická významnost
Nadmořská výška	Statisticky nevýznamný vliv
Větrné oblasti	Statisticky nevýznamný vliv
Konstrukční charakteristika a typ	Statisticky nevýznamný vliv
Stavební materiál svislých nosných konstrukcí	Statisticky významný vliv
Materiál hlavní vzduchotěsné vrstvy	Statisticky významný vliv
Komínové těleso	Statisticky významný vliv
Realizace a kvalita provedení	Statisticky významný vliv
Podlažnost objektu	Statisticky nevýznamný vliv
Tvarové řešení budovy	Statisticky nevýznamný vliv
Zastavěná plocha budovy	Statisticky nevýznamný vliv
Užitná podlahová plocha budovy	Statisticky nevýznamný vliv
Objem vytápěného prostoru	Statisticky nevýznamný vliv
Obestavěný prostor	Statisticky nevýznamný vliv
Ochlazovaná plocha obálky budovy	Statisticky významný vliv
Rok výstavby	Statisticky významný vliv

Tab. č. 41: Přehled statistické významnosti determinačních faktorů vzduchotěsnosti budov



14 Konkrétní závěry pro další rozvoj vědního oboru

Kvalitně provedená vzduchotěsná obálka budovy představuje takové stavební řešení objektu, které vede k výraznému snížení potřeb energií na vytápění a samotný jeho provoz. Snížená energetická náročnost jednotlivého subjektu je v rámci celospolečenského blaha téměř zanedbatelná, proto společnost klade silný důraz na zvýšení počtu objektů, které splňují kritéria vysokého energetického výkonu s minimální spotřebou energie. Se zvyšováním počtu energeticky efektivních staveb logicky roste i její celospolečenská efektivita.

Cílem disertační práce je pomocí analytických a statistických nástrojů stanovit a následně vyhodnotit faktory, které ovlivňují výslednou vzduchotěsnost objektu. Mezi nástroje metodologické aparátu jsou v disertační práci zařazeny zejména Paretova analýza, Ishikawa diagram, testy závislostí a testy korelace.

Dílním a zásadním výsledkem disertační práce je fakt, že mezi významné faktory ovlivňující vzduchovou neprůvzdušnost objektu patří lidé. Pod faktorem lidé si představujeme veškerou psychickou i fyzickou činnost, kterou museli lidé vynaložit k realizaci posuzovaného objektu. Faktor lidé zahrnují projektanty, ale také realizátory stavby. Kvalita výstupů lidské činnosti je velmi těžko zhodnotitelná a do značné míry představuje ztížení pro zhodnocení dalších atributů ovlivňujících vzduchotěsnost objektu. Na základě tohoto zjištění bylo nutné stanovit předpoklad, že faktor lidé je sice významný, ale pro posuzování významnosti dalších faktorů bude stanoven za daný.

Z hlediska vzduchotěsnosti obálky obvodového pláště je nutné věnovat patřičnou pozornost během výběru realizátora. Rozpětí dosahovaných hodnot finální neprůvzdušnosti obvodového pláště je mezi různými realizátory velmi proměnlivé a nestálé. Při výběru realizátora stavby je nezbytné porovnat referenční stavby a průměrně dosahované hodnoty vzduchotěsnosti obálky budovy u daných referenčních staveb. Výběr realizátora, respektive kvality provedení, má statisticky významný vliv na výslednou neprůvzdušnost obálky budovy. Již při samotném návrhu a první koncepci objektu je nutné věnovat pozornost velikosti ochlazované plochy obálky budovy. Naopak, tvarové řešení budovy (faktor tvaru A/V), velikost zastavěné plochy, objem obestavěného prostoru, objem vytápěného prostoru a počet podlaží nemá statisticky významný vliv na výslednou vzduchotěsnost budovy. Pro dosažení maximální míry vzduchotěsnosti se nedoporučuje v objektu realizovat žádné komínové těleso. Existence komínového tělesa má statisticky negativně významný vliv na vzduchotěsnost objektu. Z



hlediska volby stavebního materiálu je možné pro maximální vzduchotěsnost doporučit výstavbu z prefabrikovaných dřevěných masivních panelů (SWP). Naopak, statisticky nejnižší míry vzduchotěsnosti dosahují objekty na bázi monolitického betonu ve ztraceném bednění. Výsledná vzduchotěsnost obálky budovy má ze statistického hlediska průměrně 4% podíl na měrné potřebě tepla na vytápění a na měrné celkové potřebě primární energie.

Přínos disertační práce lze členit na pedagogický, vědecký a praktický. Teoretická část disertační práce může sloužit jako ucelený studijní materiál předmětů zaměřených na energeticky efektivní výstavbu. Práce obsahuje teoretické a praktické informace, které studentům přinesou dostatečný pojmový, obsahový a praktický aparát v oblasti vzduchotěsnosti budov, energetické výstavy a principů trvale udržitelné výstavby. Vědecký přínos disertační práce se především opírá o statistickou metodiku testování hypotéz a jejího rozšíření do oblasti stavební praxe. Za praktický přínos disertační práce lze považovat konkrétní zjištění důležitých faktorů ovlivňujících vzduchotěsnost obálky budovy. Implementace zjištěných výsledků do stavební praxe může výrazně ovlivnit kvalitu vzduchotěsnosti obálky budovy, zároveň jsou výsledky vhodné k dalším analýzám a praktickému testování na reálných stavbách.



15 Summary

According to the current trend of reducing energy consumption, it is necessary to define and determine the key factors in terms of airtightness of the building envelope. The reduction of energy consumption leads to individual savings of individuals, but also it brings the whole society positive externalities in the form of support for the principles of sustainable development.

The aim of the dissertation thesis is to identify and evaluate the factors affecting the final airtightness of the building using analytical and statistical tools. The methodological apparatus of the dissertation thesis includes among others Pareto analysis, Ishikawa diagram, tests of independence and correlation analysis. The partial and essential result of the thesis is the fact that people are among the most important factors affecting building airtightness. The factor People includes all mental and physical activities which designers and implementers must expend to the implementation of sufficiently airtight building. The quality of the outputs of human activity is very difficult evaluable and it represents restrict to evaluate other attributes influencing airtight building. The quality is a valid assumption (axiom) for assessing the significance of other factors. The significant factors influencing the airtightness of are the building materials of walls, the building materials of airtight layer, the presence of chimney, the selection of implementers, the surface area of the building envelope and the year of construction.

The benefits of dissertation thesis can be divided into educational, scientific and practical. The theoretical part of the thesis can be used as a comprehensive study material courses focused on energy-efficient construction and its airtightness. The thesis includes theoretical and practical information which bring sufficient conceptual, content and practical apparatus in the field of airtightness of energy efficient building. The scientific merit of dissertation thesis is mainly based on testing of statistical hypothesis and its extension into practice in airtightness of energy efficient buildings. For practical benefits of the dissertation can be considered a specific determine of important factors influencing the airtightness of the building envelope. The implementation of the obtained results into the civil engineering practice can significantly affect the quality of the air tightness of the building envelope. At the same time the results are appropriate to further analyze and practical testing on already realized buildings.



16 Zdroje a použitá literatura

- [1] ANDERSON, A. The History of the Blower Door. *Home Energy Magazine* [online]. 1995, November/December 1995 [cit. 2014-07-06]. Dostupné z: <http://www.homeenergy.org/show/article/year/1995/id/1171>
- [2] BRIŠ, R. *Statistické metody v inženýrské praxi* [online]. 2007 [cit. 2013-02-06].
- [3] BUDÍKOVÁ, M. *Statistika II: distanční studijní podpora*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2006, 158 s. ISBN 80-210-4105-6.
- [4] CENTRE FOR ENERGY AND THE ENVIRONMENT. Airtightness in Buildings. Low Carbon Building Design: Course Notes [online]. 2011, s. 7 [cit. 2014-07-05]. Dostupné z: http://emps.exeter.ac.uk/mediaAirtightness%20in%20Building/emps/research/cee/lchsmodule1notes/Air_Leakage_Testing.pdf
- [5] CENTRUM PASIVNÍHO DOMU. *Katalog pasivních domů: Katalog pasivních domů* [online]. Brno: Centrum pasivního domu, 2006, 2014 [cit. 2014-08-18]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/domy/>
- [6] Česká republika. Vyhláška č. 78/2013 ze dne 22. března 2013 o energetické náročnosti budov. In: *Sbírka zákonů*. 2013, č. 78, 36.
- [7] Česká republika. Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů*. 2000.
- [8] ČSN 73 0540-2, *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 2011, p. 1-56.
- [9] ČSN EN 13829. *Tepelné chování budov - Stanovení průvzdušnosti budov - Tlaková metoda*. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [10] ENVIC A KOL. *Enviromentálně šetrné stavby: Výukové materiály* [online]. Plzeň: Dragon Press, 2011 [cit. 2014-08-30]. Dostupné z: <http://www.enviprogramy.cz/enviromentalne-setrne-stavby-vyukove-materialy/>
- [11] Evropská Unie. Směrnice Evropského parlamentu a rady 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov. In *Úřední věstník Evropské Unie*. 2010, 153, 2010/31/EU.
- [12] HÁJEK, P. Udržitelná výstavba budov a její uplatňování ve střední Evropě. *Časopis Stavebnictví*. 2007, 11 - 12. Dostupné z: <http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanek.php?detail=465>
- [13] HAZUCHA, J. Neprůvzdušnost, zkoušky kvality. *Pasivní domy* [online]. Brno: Centrum pasivního domu, 2006, 2013 [cit. 2013-02-06]. Dostupné z: www.pasivnidomy.cz/tepelna-ochrana/nepruvzdusnost-zkousky-kvality.html



- [14] HUDEC, M. *Pasivní rodinný dům: Proč a jak stavět*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2008. 112 s. ISBN 978-80-247-2555-0.
- [15] IBM. *IBM SPSS Statistics ver. 20* [software]. Dostupné z: <http://www.ibm.com>. Požadavky na systém: Minimální počet CPU: 2 CPU s frekvencí 1GHz nebo vyšší, Paměť: 8 GB RAM, Minimální volné místo na pevném disku 500 MB.
- [16] IBM SPSS Statistics. IBM. *IBM* [online]. 2014 [cit. 2014-08-21]. Dostupné z: <http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss/products/statistics/>
- [17] JACCARD, M. *The objective is quality: an introduction to quality, performance and sustainability management systems*. 1st ed. Switzerland: EPFK Press, 2013. ISBN 978-146-6572-997.
- [18] JANULÍKOVÁ, M. Zatížení klimatická – zatížení větrem. *Zatížení stavebních konstrukcí* [online]. Ostrava: VŠB - TUO, 2014 [cit. 2014-08-26]. Dostupné z: <https://homen.vsb.cz/~jan731/Zatizeni%20stavebnich%20konstrukci/Zatizeni%20stavebnich%20konstrukci.html>
- [19] JOHNSON, D. *Low Carbon Housing Learning Zone: Airtightness* [online]. Leed Metropolitan University [cit. 2014-07-30]. Dostupné z: http://www.leedsmet.ac.uk/teaching/vsite/low_carbon_housing/airtightness/introduction/index.htm
- [20] JURAN, J. *Juran's quality control handbook*. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 1988, 50 s. ISBN 00-703-3176-6.
- [21] KALAMEES, T. Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment*. 2007, vol. 42, issue 6, s. 2369-2377. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.001
- [22] KORECKÝ, M. a V. TRKOVSKÝ. *Management rizik projektů: se zaměřením na projekty v průmyslových podnicích*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3221-3.
- [23] KOTLER, P a K. L. KELLER. *Marketing management*. 12. vyd. Praha: Grada, 2007, 788 s. ISBN 978-80-247-1359-5.
- [24] KRAUS, M., B. HRUBÁ a P. ORAVEC. *Metodika měření průvzdušnosti: Blower Door Test*. Ostrava, 2011.
- [25] LEVAY, R. Diagramy příčin a následků. *Ikvalita.cz: portál pro kvalitáře* [online]. 2005, 2013 [cit. 2014-08-03]. Dostupné z: <http://www.ikvalita.cz/tools.php?ID=26>
- [26] LIMB, L. *A Review of International Ventilation, Airtightness, Thermal Insulation and Indoor Air Quality Criteria*. Coventry, UK: Air Infiltration and Ventilation Centre, 2001.
- [27] Měření Blower-Door test. *Finhaus* [online]. 2014 [cit. 2014-07-07]. Dostupné z: <http://www.finnhaus.cz/vzduchotesne-staveni-blower-door-test.php>



- [28] MICROSOFT CORPORATION. *Microsoft Office EXCEL 2010* [software]. Dostupné z: <http://office.microsoft.com/>. Požadavky na systém: procesor 1 GHz nebo rychlejší x86 nebo 64bitový procesor s instrukční sadou SSE2, paměť 1 GB RAM (32bitová verze), volné místo na disku 3 GB, operační systém Windows Server 2008 R2, Windows 7, Windows Server 2012, Windows 8.
- [29] MOLDAN, B. Indikátory trvale udržitelného rozvoje: Centrum pro otázky životního prostředí. Univerzita Karlova, 1996. Dostupné z: http://home.zf.jcu.cz/~mbartos00/PREDNASKY_QUVZ/PODKLADY/MOLDAN_INDIKATORY-1996.pdf
- [30] NAGY, E. *Nízkoenergetický a energeticky pasivní dům*. Bratislava: JAGA Group, 2009. 207 s. ISBN 978-80-8076-077-9.
- [31] *Nová zelená úsporám: Oficiální web programu* [online]. 2014 [cit. 2014-09-03]. Dostupné z: <http://www.zelenausporam.cz/>
- [32] NOVÁK, J. *Vzduchotěsnost obvodových pláštů budov*. 1. vyd. Praha: Grada, 2008, 203 s. ISBN 978-80-247-1953-5.
- [33] OLIVIER, D. *Air Leakage Standards: Unpublished DTLR Report*. London, 1999.
- [34] PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY (PNNL). *Building Energy Code Resource Guide: Air Leakage Guide*. US Department of Energy, 2011, 46 s. PNNL-SA-82900.
- [35] PAVLÍK, J. *Aplikovaná statistika*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 172 s. ISBN 80-708-0569-2.
- [36] RICHTER, Nadine Pahl. Anne. *SWOT Analysis - Idea, Methodology And A Practical Approach*. 1. Auflage. München: GRIN Verlag GmbH, 2007. ISBN 978-364-0303-038.
- [37] SHARMA, A. K. *Text Book Of Correlations And Regression*. India: Discovery Publishing House, 2005. ISBN 978-817-1419-357.
- [38] SHERMAN, M. H., R. CHAN. *Building Airtightness: Research and Practice: Lawrence Berkeley National Laboratory report no. LBNL-53356*. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.
- [39] SCHNEIDEROVÁ, R. *Udržitelné pořizování staveb: ekonomické aspekty*. Vyd. 1. Praha: Wolters Kluwer Česká republika, 2011, 256 s. ISBN 978-80-7357-642-4.
- [40] SUCHÝ, J., J. DOVALIL a T. PERIČ. Současné trendy tréninku ve vyšší nadmořské výšce, *Česká kinantropologie* 13(2), 2009, ISSN: 1211-9261, s. 38-53.
- [41] SULATINSKY, M. *Airtightness Tests on 200 New Houses Across Canada: Summary of Results*. anada, Buildings Energy Technology Transfer Program, 1984.
- [42] THE ENERGY CONSERVATORY. Software TECTITE Express ver. 3.6 [software]. Leden 2007. Dostupné z: <http://products.energyconservatory.com/tectite-express/>.



- [43] TICHÝ, M. a kol. *Zatížení stavebních konstrukcí: Technický průvodce 45*. Praha: SNTL, 1987.
- [44] VAUS, D. *Surveys in social research*. 6th ed. London: Routledge, 2001. ISBN 978-041-5268-578.
- [45] VAVERKA, J. *Stavební tepelná technika a energetika budov*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006, 648 s. ISBN 80-214-2910-0.
- [46] VEBER, J. *Kapesní počítačový slovník anglicko-český*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2003, 60 s. ISBN 978-8024717821.
- [47] VELEBA, P. Tepelná technika: Navrhování nákladově optimálních domů. In *Wienerberger forum: Poklady k přednáškám*. 2013.
- [48] ZVÁROVÁ, J. *Základy statistiky pro biomedicínské obory*. 2. vyd. Praha: Karolinum, 2011. ISBN 80-7184-786-0.



17 Seznam vlastních publikací autora¹

17.1 Publikace evidované v databázi SCOPUS (Conference Paper)

[1] KRAUS, M., K. KUBENKOVÁ a D. KUBEČKOVÁ. The Energy Diagnostics of Current Trend in the Construction of the Single-Family Residential Buildings. In: *14th international multidisciplinary scientific geoconferences SGEM 2014: Nano, bio and green technologies for a sustainable future*. Volume II. Albena, Bulgaria: STED92 Technology, 2014, s. 691-698. ISBN 978-619-7105-21-6 ISSN 1314-2704.²

[2] KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. The Influence of Construction Fillings of Building on Airtightness. *Advanced Materials Research*. 2014, č. 899, s. 166-169. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.899.166.

[3] KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. Diagnostics of Current Developments in the Field of Building Airtightness. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, 501-504, s. 2227-2230. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.2227.

[4] KRAUS, M., M. ČERNÁ, B. HRUBÁ, B. SOUČKOVÁ a D. KUBEČKOVÁ. Influence of Building Materials on Building Airtightness. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, č. 372, s. 195-198. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.372.195.

[5] KRAUS, M. a F. KONEČNÝ. The Evaluation of Nearly Zero Energy Buildings in the Czech Republic. *Advanced materials research: enviBUILD 2012*. 2013, vol. 649, s. 15-18. ISSN 1022-6680.

[6] KUBEČKOVÁ, D., V. MATĚJKA, M. KRAUS, M. ČERNÁ, J. KUKUTSCHOVÁ a L. ŽÍDEK. Biotic Attack in Claddings of Prefabricated Buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, č. 372, s. 189-194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.372.189.

¹ Tučně označené publikace se věnují problematice vzduchotěsnosti obálky budovy řešené v disertační práci.

² Již publikováno, čeká se na zaevidování v databázi SCOPUS



17.2 Publikace v českém recenzovaném časopise

[7] KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. Analýza závislosti vzduchotěsnosti budovy na konstrukčním systému. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 93 - 102. ISSN 1213-1962.

17.3 Další nehodnocené publikace

[8] KUBENKOVÁ, K., B. HRUBÁ, M. KRAUS a D. KUBEČKOVÁ. The analysis of influence of boundary conditions on the energy performance of houses. In: *6th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction*. 1st edition. Ostrava: VŠB - TUO, 2014. ISBN 978-80-248-3147-3.

[9] KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. Airtightness of energy efficient buildings. In: *Designing Buildings Wiki* [online]. United Kingdom: Designing Buildings Ltd., 2014 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z:http://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Airtightness_of_energy_efficient_buildings

[10] KRAUS, M., B. HRUBÁ, J. WINKLER a D. KUBEČKOVÁ. Participace Ph.D. studentů ve vědě a výzkumu. In: *7. vědecká mezinárodní konference ústavů a kateder pozemního stavitelství Ostrava 2013: téma: "Nejnovější poznatky v oboru pozemního stavitelství"* : Ostrava 3. - 6. září 2013. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, s. 29-32. ISBN 978-80-248-3127-5.

[11] KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. Airtightness of Energy Efficient Buildings. *GSTF Journal of Engineering Technology*. 2013, č. 2, s. 72-78. DOI: 10.5176/2251-3701_2.2.74.4

[12] KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. The Influence of Construction Fillings of Building on Airtightness. In: *EnviBuild 2013: zborník prednášok z medzinárodnej konferencie: [17. október 2013, Univerzitná knižnica, Ventúrska 11, Bratislava]*. Bratislava: STU Bratislava, 2013, s. 302-305. ISBN 978-80-227-8.

[13] KRAUS, M. Modularita v energeticko efektivní výstavbě. In: *MMK 2013: Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky : [9.-13. prosince 2013, Hradec Králové]*. Hradec Králové: MAGNANIMITAS, 2013, s. 1-6. ISBN 978-80-87952-00-9.



[14] KRAUS, M., L. KUČEROVÁ a D. KUBEČKOVÁ. Posouzení obálky objektu z hlediska nákladově optimální úrovně. In: *Sborník konference Progress 2013: Teplo, tepelná technika, vzduchotechnika, vytápění a akustika*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2972-2.

[15] KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. **Airtightness of Energy Efficient Buildings**. In: *1st Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*. Singapore: Global Science and Technology Forum, 2013, 29 - 35. ISSN 2301-394X. DOI: **10.5176/2301-394X_ACE13.10**

[16] KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. Energetická a finanční náročnost budovy s nízkou spotřebou energie. In: *Structura 2012: 2. Ročník mezinárodní stavební konference: energetika, ekologie, udržitelnost a Smart city*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, s. 45-46. ISBN 978-80-248-2879-4.

[17] KRAUS, M. a F. KONEČNÝ. The Evaluation of nearly Zero Energy Buildings in the Czech Republic. In: *Budovy a prostředí 2012: enviBUILD 2012*. Brno: VUT, 2012. ISBN 978-80-214-4505-5.

[18] KRAUS, M., D. KUBEČKOVÁ a F. KONEČNÝ. **Trends in Airtightness of the Building Envelope**. In: *Grant Journal: recenzovaný časopis*. Vol. I., Issue I. Hradec Králové: Magnanimitas, 2012, 132 - 134. ISSN 1805-0638. Dostupné z: <http://www.grantjournal.com/issue/actual>

[19] KRAUS, M., D. KUBEČKOVÁ a F. KONEČNÝ. **Trends in Airtightness of the Building Envelope**. In: *Quaere 2012: recenzovaný sborník příspěvků interdisciplinární mezinárodní vědecké konference doktorandů: 14.-18. května 2012*. Vol. II. Hradec Králové: Magnanimitas, 2012, 1054 - 1060. ISBN 978-80-905243-0-9.

[20] KONEČNÝ, F., M. KRAUS a D. KUBEČKOVÁ - SKULINOVÁ. **Exploratory input data analysis**. In: *8th International Bata Conference for Ph.D. Students and Young Researchers*. 1. vyd. Zlín: UTB ve Zlíně, 2012, s. 12. 1. ISBN 978-80-7454-013-4.

[21] KRAUS, M. Technologie variantního provedení konstrukce obvodového pláště. In: *Sborník anotací Juniorstav 2012*. Brno: VUT v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4393- 8.



18 Seznam obrázků

Obr. č. 1: Transformační proces konvenční výstavby na trvale udržitelnou výstavbu.....	12
Obr. č. 2: Základní aspekty trvale udržitelného rozvoje, vlastní zpracování na základě dat.....	13
Obr. č. 3: Infiltrace vzduchu vyvolaná účinky větru, rozdílem teplot a spalovacím či větracím zařízením.....	21
Obr. č. 4: Tlakový rozdíl vyvolaný rozdílem teplot v různé výšce obálky budovy.....	22
Obr. č. 5: Schéma podtlakového měření průvzdušnosti metodou tlakovou spádu – Blower Door Test	27
Obr. č. 6: Osazení aparatury a měření průvzdušnosti metodou tlakového spádu - Blower Door Test.....	28
Obr. č. 7: Detail kalibrovaného ventilátoru aparatury Blower Door Testu Minneapolis no. 4	29
Obr. č. 8: Detail regulátoru výkonu ventilátoru aparatury Blower Door Testu Minneapolis no. 4.....	29
Obr. č. 9: Ukázka výstupu software TECTITE EXPRESS při měření průvzdušnosti budovy	31
Obr. č. 10: Riziko šíření vlhkosti a kondenzace v místech netěsností obálky budovy	38
Obr. č. 11: Procesní diagram návrhu, realizace a kontroly vzduchotěsnosti obálky budovy	39
Obr. č. 12: Schéma procesu strategického plánování a rozhodování	40
Obr. č. 13: Ishikawa diagram nedostatečné výsledné vzduchotěsnosti obálky budovy	47
Obr. č. 14: Struktura testované databáze – vstupní data.....	54
Obr. č. 15: Znázornění koeficientu šikmosti α	59
Obr. č. 16: Znázornění koeficientu špičatosti β	59
Obr. č. 17: Stínění objektu objektem a terénem	72
Obr. č. 18: Rozložení působení větru v závislosti na morfologii terénu	73
Obr. č. 19: Zastoupení objektů výběrového souboru dle územního členění v České republice	73
Obr. č. 20: Mapa větrných oblastí na území ČR dle ČSN EN 1991-1-4.....	76
Obr. č. 21: Energeticky pasivní dům na bázi lehkého dřevěného skeletu v Novém Hrozenkově	79
Obr. č. 22: Zděný energeticky pasivní dům v obci Davle	80
Obr. č. 23: Kombinovaná konstrukce energeticky pasivního domu ve Frýdku Místku	81
Obr. č. 24: Vliv tvaru objektu na tepelné ztráty	100
Obr. č. 25: Korelační diagram plochy ochlazované obálky a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50}	105



19 Seznam tabulek

Tab. č. 1: Základní požadavky na energicky nulové budovy	17
Tab. č. 2: Požadované hodnoty třídy průvzdušnosti dle ČSN 73 0540-2 (2011)	32
Tab. č. 3: Doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50,N}$	33
Tab. č. 4: Normalizace požadavků na vzduchotěsnost obálky budov	35
Tab. č. 5: Matice SWOT analýzy významu vzduchotěsnosti energeticky efektivních budov	41
Tab. č. 6: Výsledky skupinové diskuze a váhové hodnocení potenciačních příčin	50
Tab. č. 7: Charakteristika typů proměnných selektovaných faktorů vzduchotěsnosti budov	57
Tab. č. 8: Chyba I. a II. druhu při statistickém testování hypotéz	60
Tab. č. 9: Interpretace síly vztahu dvou proměnných dle korelačního koeficientu	64
Tab. č. 10: Exploratorní charakteristiky vzduchotěsnosti výběrového souboru, IBM SPSS Statistics	68
Tab. č. 11: Kolmogorovův – Smirnovův test normality, IBM SPSS Statistics	70
Tab. č. 12: Přehled determinačních faktorů vzduchotěsnosti pro statistickou verifikaci významnosti	71
Tab. č. 13: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat pro výběr nadmořské výšky, IBM SPSS Statistics ..	74
Tab. č. 14: Neparametrická korelace pro vzduchotěsnost a nadmořskou výšku, IBM SPSS Statistics	75
Tab. č. 15: Test normality výběrů větrných oblastí, IBM SPSS Statistics	77
Tab. č. 16: Kruskal-Wallisův test, IBM SPSS Statistics	78
Tab. č. 17: Podíl typů konstrukce zastoupený ve výběrovém souboru	82
Tab. č. 18: Exploratorní charakteristiky v závislosti na typu konstrukce, IBM SPSS Statistics	82
Tab. č. 19: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat dle typu konstrukce, IBM SPSS Statistics	83
Tab. č. 20: Kruskal-Wallisův test závislosti vzduchotěsnosti na typu konstrukce, IBM SPSS Statistics	84
Tab. č. 21: Stavební materiál nosných svislých konstrukcí	85
Tab. č. 22: Exploratorní charakteristiky v závislosti na materiálu stěn, IBM SPSS Statistics	86
Tab. č. 23: Test normality dat výběrů materiálů stěny, IBM SPSS Statistics	87
Tab. č. 24: Kruskal-Wallisův test pro materiál stěn, IBM SPSS Statistics	88
Tab. č. 25: Materiály HVV dle typu konstrukce a jejich relativní četnosti	90
Tab. č. 26: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat dle materiálů HVV stěny, IBM SPSS Statistics	91
Tab. č. 27: Kruskal-Wallisův test pro materiál HVV stěny, IBM SPSS Statistics [50]	92
Tab. č. 28: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat dle komínového tělesa, IBM SPSS Statistics	94
Tab. č. 29: Kruskal-Wallisův test závislosti v závislosti na realizaci komína, IBM SPSS Statistics	94
Tab. č. 30: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat pro výběry realizátorů, IBM SPSS Statistics	96
Tab. č. 31: Kruskal - Wallisův test pro realizaci objektu, IBM SPSS Statistics [50]	97
Tab. č. 32: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat dle podlažnosti, IBM SPSS Statistics	98
Tab. č. 33: Kruskal-Wallisův test závislosti vzduchotěsnosti na počtu podlaží, IBM SPSS Statistics	99
Tab. č. 34: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat pro faktor tvaru A/V, IBM SPSS Statistics	101
Tab. č. 35: Neparametrická korelace pro vzduchotěsnost a faktor tvaru budovy A/V, IBM SPSS Statistics	102
Tab. č. 36: Kolmogorovův – Smirnovův test normality dat pro ukazatele velikosti, IBM SPSS Statistics	105
Tab. č. 37: Neparametrická korelace pro vzduchotěsnost a ukazatele velikosti, IBM SPSS Statistics	106
Tab. č. 38: Kolmogorovův test normality dle doby výstavby, IBM SPSS Statistics	109
Tab. č. 39: Kruskal – Wallisův test závislosti vzduchotěsnosti na době výstavby, IBM SPSS Statistics	109
Tab. č. 40: Neparametrická korelace pro vzduchotěsnost a energetickou výkonnost, IBM SPSS Statistics	112
Tab. č. 41: Přehled statistické významnosti determinačních faktorů vzduchotěsnosti budov	114



20 Seznam grafů

Graf č. 1: Ilustrační vyjádření křivky nákladového optima	15
Graf č. 2: Srovnání celkové měrné potřeby energie různých druhů budov bytové výstavby	16
Graf č. 3: Grafické znázornění objemového toku vzduchu na tlakovém rozdílu	20
Graf č. 4: Závislost vzduchotěsnosti obálky budovy na měrné potřebě tepla na vytápění	37
Graf č. 5: Vliv doby výstavby na vzduchotěsnost	44
Graf č. 6: Vliv typu konstrukce na vzduchotěsnost obvodového pláště	45
Graf č. 7: Paretova analýza a Lorenzova křivka	52
Graf č. 8: Výběrový soubor seřazený dle velikosti celkové intenzity výměny vzduchu n_{50}	67
Graf č. 9: Statistika míry průvzdušnosti pláště výběrového souboru dle ČSN 73 0540-2 (2011)	67
Graf č. 10: Histogram celkové intenzity výměny vzduchu výběrového souboru	68
Graf č. 11: Krabicový diagram výběrového souboru, IBM SPSS Statistics	70
Graf č. 12: Znázornění závislosti vzduchotěsnosti (n_{50}) budov na nadmořské výšce	74
Graf č. 13: Podíl větrných oblastí zastoupených ve výběrovém souboru	77
Graf č. 14: Krabicové diagramy v závislosti na větrné oblasti, IBM SPSS Statistics	77
Graf č. 15: Krabicové diagramy v závislosti na typu konstrukce, IBM SPSS Statistics	83
Graf č. 16: Krabicový diagram vzduchotěsnosti budov v závislosti na materiálu stěn, IBM SPSS Statistics	87
Graf č. 17: Krabicové diagramy vzduchotěsnosti v závislosti na materiálu HVV stěny, IBM SPSS Statistics	91
Graf č. 18: Krabicové diagramy v závislosti na realizaci komínového tělesa, IBM SPSS Statistics	93
Graf č. 19: Krabicové diagramy vzduchotěsnosti v závislosti na realizaci, IBM SPSS Statistics	96
Graf č. 20: Krabicové diagramy vzduchotěsnosti v závislosti na realizaci, IBM SPSS Statistics	98
Graf č. 21: Korelační diagram faktoru tvaru budovy A/V a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50}	101
Graf č. 22: Korelační diagram zastavěné plochy a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50}	103
Graf č. 23: Korelační diagram užité podlahové plochy a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50}	104
Graf č. 24: Korelační diagram obestavěného prostoru a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} (vlevo)	104
Graf č. 25: Korelační diagram vytápěného prostoru a celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} (vpravo)	104
Graf č. 26: Vliv doby výstavby na výslednou vzduchotěsnost objektu	108
Graf č. 27: Krabicové diagramy v závislosti na roku výstavby, IBM SPSS Statistics	108
Graf č. 28: Korelační diagram ukazatelů energetické výkonnosti a celkové intenzity	111
Graf č. 29: Souhrn výsledků Paretovy analýzy nedostatečné vzduchotěsnosti budov	113



21 Seznam zkratek

ACH	Air Change per Hour
ANOVA	Analysis of variance
APT	Automated Performance Testing
BDT	Blower Door Test
EAD	Energeticky autarktní dům
END	Energeticky nulový dům
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EPD	Energeticky pasivní dům
FSSP	Four Step Solving Problem
LLC	Life Cycle Costs
NED	Nízkoenergetický dům
PED	Plusenergetický dům;
SRI	Stanford Research Institute
SSSP	Seven Step Solving Problem
TZB	Technické zařízení budov
ZZT	Zpětné získávání tepla



22 Profesní životopis

Ing. Michal Kraus,

narozen 14. listopadu 1985 ve Vsetíně



VZDĚLÁNÍ & KVALIFIKACE

únor 2011 - dosud	VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební - doktorské studium (Ph.D.), obor Teorie konstrukcí
leden 2012 - květen 2012	University of Portsmouth, Faculty of Technology - výměnný pobyt Erasmus
září 2009 - leden 2011	VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební - magisterské studium (Ing.), obor Provádění staveb
září 2005 - květen 2009	VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební - bakalářské studium (Bc.), obor Architektura a stavitelství
září 1997 - květen 2005	Osmileté všeobecné Gymnázium, Frenštát pod Radhoštěm

ODBORNÁ PRAXE

2013 – dosud	Výzkumné energetické centrum, VŠB – TUO - externí spolupráce, zaměření a pasportizace budov
2011 - dosud	Fakulta stavební, VŠB – Technická univerzita Ostrava - pedagogická praxe, vedení cvičení
2011 - 2013	Lyon s.r.o. - externí stavební konzultant
2010 - 2010	Norman Rouke Pryme s.r.o. - asistent TDI, pomocná administrativní činnost
2009 - 2010	Akastav, s.r.o. - odborná řízená praxe

OCENĚNÍ

- Čestné uznání ČKAIT za diplomovou práci na téma "Technologie variantního provedení konstrukce obvodového pláště - Vyhodnocení variant z hlediska časové a finanční náročnosti" ve studijním programu Stavební inženýrství a studijním oboru Provádění staveb Fakulty stavební VŠB TU Ostrava.

OBLAST VĚDECKÉHO ZÁJMU

- Diagnostika vzduchotěsnosti budov a omezení nekontrolovatelné tepelné ztráty objektu
- Integrovaný návrh nízkoenergetických, pasivních a energeticky nulových domů
- Problematika energeticky efektivních budov dle principů udržitelné výstavby
- Využití statistických metod a metod řízení kvality ve stavební praxi



VÝZNAMNÉ PUBLIKACE

- KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. The Influence of Construction Fillings of Building on Airtightness. *Advanced Materials Research*. 2014, č. 899, s. 166-169. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.899.166.
- KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. Diagnostics of Current Developments in the Field of Building Airtightness. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, 501-504, s. 2227-2230. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.2227.
- KRAUS, M., M. ČERNÁ, B. HRUBÁ, B. SOUČKOVÁ a D. KUBEČKOVÁ. Influence of Building Materials on Building Airtightness. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, č. 372, s. 195-198. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.372.195.
- KUBEČKOVÁ, D., V. MATĚJKA, M. KRAUS, M. ČERNÁ, J. KUKUTSCHOVÁ a L. ŽÍDEK. Biotic Attack in Claddings of Prefabricated Buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, č. 372, s. 189-194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.372.189.
- KRAUS, M. a F. KONEČNÝ. The Evaluation of Nearly Zero Energy Buildings in the Czech Republic. *Advanced materials research: enviBUILD 2012*. 2013, vol. 649, s. 15-18. ISSN 1022-6680.
- KRAUS, M. a D. KUBEČKOVÁ. Airtightness of Energy Efficient Buildings. In: *1st Annual International Conference on Architecture and Civil Engineering*. Singapore: Global Science and Technology Forum, 2013, 29 - 35. ISSN 2301-394X. DOI: 10.5176/2301-394X_ACE13.10.
- Celkem více než 20 publikací

VÝZKUMNÉ PROGRAMY & PROJEKTY

- SP2014/18, Možnosti aplikace statistických metod a analytických nástrojů ve stavební praxi, Specifický VŠ výzkum, leden 2014 – dosud, odpovědný řešitel.
- FRVŠ-TO – 3/11/2014, Biotické napadení omítek na zateplených fasádách, IRP/FRVŠ, leden 2014 - dosud, člen řešitelského týmu.
- CZ.1.07/2.3.00 /20.0013, Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO, OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost (OP VK), oblast podpory 2.3 Lidské zdroje ve výzkumu a vývoji, březen 2011 – únor 2014, člen řešitelského týmu.
- SP2013/27, Determinační faktory vzduchotěsnosti energeticky efektivních budov, Specifický VŠ výzkum, leden 2013 – prosinec 2013, odpovědný řešitel.
- SP2012/31, Diagnostika vzduchotěsnosti budov s využitím statistických metod řízení kvality, Specifický VŠ výzkum, leden 2012 – prosinec 2012, odpovědný řešitel.

DOVEDNOSTI

jazykové	anglický jazyk, ruský jazyk
počítačové	Microsoft Office, Adobe Photoshop, Corel, SPSS Statistics, Autocad, ArchiCad, SVOBODA Stavební fyzika, Build Power
ostatní	řidičský průkaz skupiny B



23 Seznam příloh

Příloha I Testovaná databáze energeticky pasivních budov