

Z historie a současnosti univerzity

Fotovoltaika na MU

– od základního výzkumu k aplikaci

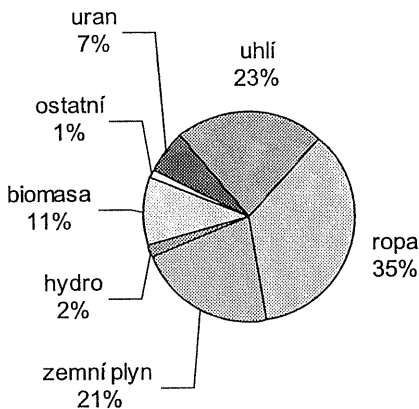
PETR SLÁDEK

Místo úvodu

Nepříliš často se stane, že se na jednom pracovišti podaří projít celým kruhem od základního výzkumu až po realizovanou aplikaci, přinášející zpětně výhody pro pracoviště. Zvláště pokud se vše odehraje jen během relativně krátké doby. Zajisté si to zaslouží shrnutí, i když ne v časové posloupnosti.

Významné trendy z hlediska energetiky

Ekonomický růst je ovlivňován především populací, hrubým domácím produktem, energetickou náročností hospodářských odvětví, účinností při výrobě a spotřebě energie, rozvojem urbanistických oblastí, elektrifikací, dopravní obslužností. Ukazuje se, že trvale udržitelný rozvoj je možné zajistit jen harmonickým vyvážením tří pilířů 3E, které zásadním způsobem ovlivňují a jsou ovlivňovány lidskou činností: Ekonomika (a z ní vyplývající potřeba energie), Energetika (dostupnost zdrojů) a Ekologie (vliv těžby surovin a výroby a spotřeby energie na životní prostředí). Je jednoznačně prokázáno, že ekonomický růst je doprovázen růstem spotřeby primární a především elektrické energie (i přes úsporná energetická opatření) a že uspokojování rostoucích energetických potřeb přináší nevratné zásahy do životního prostředí. Je zřejmé, že díky omezeným zásobám fosilních paliv (uhlí, ropa, plyn) lidstvo musí hledat nové zdroje energie. Produkce elektřiny a tepla bývá často diskutována jenom z technologického hlediska, ale přitom je potřeba brát v úvahu i otázky ekonomické, politické, sociální a vše musí být vnímáno jako jeden komplex.



Zdroje energie – svět 2004

Obr. 1 Podíl jednotlivých zdrojů energie – celý svět, rok 2004

Dnes lidstvo spotřebuje za rok víc než 10,5 Gtoe = 4 670 EJ¹ energie, z toho elektrické energie 16 661 TWh = 59,9 EJ (údaje za rok 2003). Primární energetický sektor ve světě dnes využívá fosilní paliva, uran a obnovitelné zdroje (obr. 1). Tyto zdroje jsou pak spotřebovávány v elektroenergetice, teplárenství, dopravě, průmyslu, domácnostech a službách. Světová výroba elektrické energie je zajišťována zejména z elektráren uhelných (39%), plynových (18%), jaderných (17%) a vodních (17%). V Bílé knize je uvedeno: „Z doby, během níž jsou ještě dostupné pohodlné a levné fosilní zdroje energie a během níž je nutno vyvinout nové technologie a zařízení a zajistit tak trvalý a uspořádaný přerod celosvětové energetiky do definitivně nové podoby, zbývá již málo: období ekonomické příhodnosti je daleko kratší než doba fyzické dostupnosti „konvenčních“ zdrojů energie.“ Urychlené zavedení obnovitelných zdrojů energie (dnes mají podíl kolem 12% z celkové spotřeby energie) vyžaduje vytváření k tomu příznivých podmínek či na motivaci souvisejících nutných změn, a to s dostatečným předstihem.

S velkým znepokojením se očekává, že světové emise CO₂ ze spalování fosilních paliv vzrostou z 24,1 miliard tun CO₂/rok v r. 2002 na 45 miliard tun CO₂/rok v r. 2030. Současná jaderná energetika „šetří“ životní prostředí eliminací asi 2,4 miliard tun CO₂/rok. Přitom úsporná opatření (především snižování energetické náročnosti při výrobě a spotřebě energie) v průmyslově vyspělých zemích povedou ke snížení podílu těchto zemí na emisích ze 70% v r. 1990 na 42% v r. 2030. Naopak extrémní absolutní nárůst je očekáván v rozvojových zemích, především Číně a Indii. Uhlíková elektrárna o ekvivalentním výkonu 1000 MWe spotřebuje ročně 2 až 6 milionů tun paliva (podle typu uhlí) a vyprodukuje 6,5 milionu tun CO₂ (960 t CO₂/GWh). Analogická plynová elektrárna spotřebuje ročně 2-3 miliardy m³ plynu a produkuje 480 t CO₂/GWh. Olejová elektrárna stejného výkonu spotřebuje ročně 1,5 miliónu tun topného oleje a produkuje 730 t CO₂/GWh. Elektrárna na spalování biomasy o stejném výkonu by představovala zábor půdy pro pěstování biomasy na rozloze 6.000 km², větrná elektrárna by zabrala 100 km² a sluneční 50 km². Naproti tomu bezemisní jaderná elektrárna o výkonu 1000 MWe spotřebuje ročně jen 35 t paliva a zabírá rozlohu několika km².

Technologie jsou již dnes pokročilé natolik, že umožňují významnější pronikání energie z obnovitelných zdrojů do hlavního proudu energetiky a společenských infrastruktur. Vládami zemí EU jsou pevně stanoveny cíle zvyšování podílu energie z obnovitelných zdrojů na primárních energetických zdrojích a zdrojích elektrické energie (u nás 8% do roku 2010). Většinou se uvádí následující dělení obnovitelných zdrojů (mimo velké vodní elektrárny; dále je uveden procentuální podíl na celosvětové výrobě energie z obnovitelných zdrojů):

1 jednotka 1 toe (tonne of equivalent) = 0,447 TJ, 1 Gtoe = 10⁹ toe, 1 EJ = 10¹⁸ J

| | |
|-----------------------------|---------|
| • Malé vodní elektrárny | 16,4% |
| • Biomasa + spalovny odpadu | 79,9% |
| • Solární - teplo | 0,3% |
| • Solární - fotovoltaické | < 0,05% |
| • Větrné | 0,2% |
| • Geotermální | 3,2% |
| • Přílivové | < 0,05% |

Každý druh obnovitelných zdrojů energie má své přednosti, ale také své omezení a limity. Např. naše republika nemá pro využití větrné energie tak výhodné podmínky jako přímořské státy. Příhodné lokality se u nás téměř vždy nacházejí ve vyšších nadmořských výškách, obvykle nad 600m n. m. Ale máme-li před sebou „větrnou“ mapu ČR s vyznačením izochar rychlostí větru, je vidět, že zcela převažují území, kde rychlost nepřesahuje 4 m/s. Oblasti s vyšší rychlostí připomínají mapu zvláště chráněných území a rezervací. Možnost výstavby „větrných farem“ je v těchto územích velmi limitovaná, a bereme-li vážně ochranu přírody a krajiny, je prakticky nemožná.

Elektrická energie ze Slunce

Stejně jako disponibilita větru i disponibilita slunečního záření má náhodný charakter, což samo o sobě představuje značný technický problém a ze samotné podstaty plyne, že tzv. koeficient ročního využití se mění s lokalitou. Sluneční záření dopadající na povrch České republiky poskytuje ročně asi 90 000 TWh² elektrické energie. Ploch použitelných pro fotovoltaické systémy je 50,2 km², což reprezentuje ročně asi 5,5 TWh, dosud však instalované fotovoltaické systémy poskytují jen 0,00003 TWh ročně.

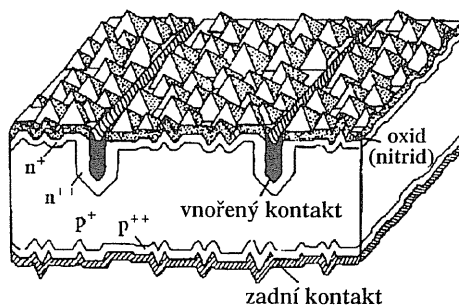
Jedna z velkých předností nabízená fotovoltaikou (FV) je možnost vyrábět elektřinu v oblastech, které nejsou napojeny na elektrické rozvodné sítě. To je významná skutečnost, protože v současné době elektrifikace narůstá pomaleji, než je růst lidské populace. Dnes např. z přes 6,3 mld. obyvatel Země nemají více než 2 miliardy lidí žádný přístup k elektřině a mnohem více lidí nemá možnost připojení na elektrickou síť. Je docela možné, že během 40 let toto číslo může narůst na 5 miliard. Klíčovým momentem ekonomického rozvoje a modernizace některých zemí je fakt, že převážná většina jejich obyvatelstva je bez elektrických zdrojů.

Přímá přeměna slunečního záření na elektřinu pomocí fotovoltaické přeměny má několik značných výhod: Sluneční FV systém představuje nevyčerpatelný zdroj nevyžadující další náklady a je přístupný kdekoli v světě, i ve vesmíru. Množství energie dodávané Sluncem je o 5 řádů vyšší než spotřeba elektrické energie, která je nezbytná k chodu moderní civili-

2 Jednotka 1 TWh (terawatt hodina) = 10⁹ kWh, 1 TWh = 3,6 x 10¹² J

rozdíl od ostatních materiálů těžší z mohutné průmyslové výroby integrovaných obvodů. Proto mnoho technologických procesů, které byly již vyvinuty, mohlo být snadno rozšířeno i do výroby křemíkových slunečních článků. Křemíkové krystalické fotovoltaické články mají sice vyšší účinnost (kolem 16%), ale je potřeba je deponovat v tlusté vrstvě (desítky mikronů), tím je jejich výroba dražší a časově náročnější. Většinou je možno je rozeznat podle tmavě modrého zbarvení.

Obr. 2 Schematické znázornění struktury křemíkového solárního článku se zanořenými kontakty na přední straně. Texturovaný povrch pro snížení reflexe a zvýšení „light trapping“ efektu je vytvářen využitím anizotropního leptání křemíku na rovině $\langle 100 \rangle$. Vrstva oxidu, případně nitridu křemíku je použita pro pasivaci povrchu křemíku a pro snížení reflexních ztrát. Zadní kontakt (Al) funguje jako zpětný reflektor.



Nafialovělé články na bázi amorfního křemíku jsou deponovány v tenké vrstvě (desetiny, jednotky mikronu), jejich stabilizovaná účinnost je kolem 6–7%. Přes nižší účinnost jsou ekonomicky výhodnější, ale vykazují degradační efekt, kdy se jejich účinnost při expozici světlu snižuje. Další trendy jsou nabízeny použitím depozice dvou (tandemových), popř. až čtyřnásobně vrstvených přechodů při použití vedle hydrogenovaného amorfního křemíku, např. slitin amorfni křemík-germánium, mikrokrytalického a nanokrytalického křemíku.

Pro výkonové využití (střešní systémy, fotovoltaické elektrárny) se tedy převážně využívá panelů na bázi krystalického křemíku, pro nízkovýkonové aplikace (kalkulačky) pak panelů na bázi amorfního křemíku. Pro hodnocení instalovaného výkonu se používá jednotek tzv. Wp, resp. kWp, čímž se rozumí špičkový dosažený výkon. Průměrný skutečný výkon je nižší. Navíc plný teoretický fyzikální potenciál zdrojů energie nemůže být vždy uvažován. Ten je dán jednak počtem slunečních dní, jednak hodnotou tzv. solární konstanty. Je to výkon dopadajícího slunečního záření na 1m^2 plochy. Na dvoře Pedagogické fakulty Masarykovy univerzity v Brně (PDF MU) byla za slunného dne (26. června 2001, 12h) naměřena hodnota solární konstanty 721 W/m^2 .

zace. Nemá mechanicky se pohybující části, nepotřebuje mazivo, což vede ke konstrukci snadno ovládatelné elektrárny, nevyžadující údržbu. Neprodukuje žádné emise. Další výhodou je možnost vykrytí špiček spotřeby elektrické energie v případech, kdy se odběr realizuje zejména v denních hodinách.

Mezi nevýhody FV panelů patří zatím vyšší vstupní náklady (ale snižující se), které jsou však kompenzovány dlouhou, prakticky bezúdržbovou životností (20 let a více). Dále pak potřeba velkých ploch pro články s nižší účinností a degradace, tj. snížení účinnosti zejména u amorfních FV článků. Navíc je zřejmé, že intenzita slunečního záření kolísá.

Snížení nákladů je přímo spojeno se zvýšením účinnosti článků. Mnoho úsilí bylo vyvinuto na každém kroku procesu výroby účinného FV systému: od základního výzkumu depozice vlastního materiálu, heteropřechodů s vhodnou volbou šířky zakázaného pásu, studia jejich degradace, po vytvoření neodrážejících povrchových textur u antireflexních povrchů s dostatečnou odolností proti mechanickému namáhání, např. při použití flexibilních substrátů.

Sluneční články

Již v minulém století byla u selenu pozorována změna elektrického odporu při osvětlení a fotovoltaický jev (vznik elektrického napětí při osvětlení) na kontaktu s kovem. Fotovoltaická přeměna v solárních člancích je založena na fotoelektrickém kvantovém jevu v polovodičích.

První skutečné fotovoltaické sluneční články (dále jen „sluneční články“) byly připraveny z monokrystalů křemíku v Bellových laboratořích v USA v roce 1954. Ty již měly účinnost 6%, více než desetinásobnou ve srovnání se selenovými články. Byly logickým vyústěním výzkumu polovodičů, byly teoreticky založeny na výsledcích kvantové mechaniky a technologicky na zvládnutí přípravy velmi čistého křemíku a jeho dopování.

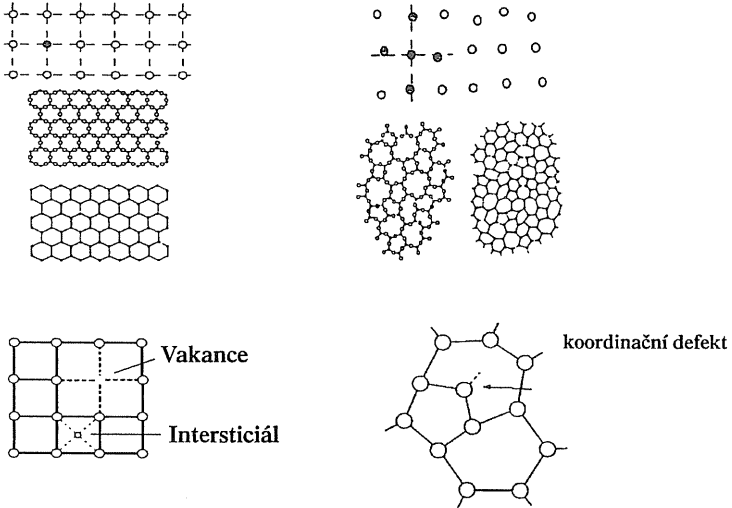
Fotovoltaický sluneční článek je polovodičová dioda (přechod p-n) mající velkou plochu (decimetry čtvereční), spodní celoplošný kovový kontakt (reflektor) a vrchní kovový kontakt (mřížku, hřeben) zabírající velmi malou plochu (4-8% plochy článku), aby nestínil.

Skutečná struktura je mnohem složitější, jak je vidět na obr. 2, s cílem zmenšení všech možných ztrát (reflexe světla, rekombinace nosičů proudu) a realizace co největší účinnosti přeměny sluneční energie v energii elektrickou. Teoretická účinnost v případě článku z krystalického křemíku je okolo 30%. Vyšší teoretickou účinností lze dosáhnout u článků složených z různých materiálů s různou absorpční hranou nebo koncentrací světla, která zvyšuje (logaritmicky) získané napětí.

Křemík zůstal dominantním FV materiálem, zahrnujícím asi 98% z celkové produkce odhadované na 65 MW. Ploché moduly z krystalického křemíku (monokrystalický a mikrokrystalický Si) reprezentují zhruba 80% celkové produkce. Pokračující převaha křemíku odráží skutečnost, že na

Základní výzkum: Fotovoltaické články na bázi a-Si:H

Na Masarykově univerzitě se věnují základnímu výzkumu fotovoltaických článků zejména pak na bázi hydrogenovaného amorfního křemíku (a-Si:H) členové katedry fyziky na Pedagogické fakultě ve spolupráci s katedrou fyzikální elektroniky na Přírodovědecké fakultě.



Obr. 3 a) Krystalická struktura b) Amorfní struktura

Jde zejména o studium hlavní nevýhody a-Si:H (je to ve skutečnosti neuspořádaná slitina křemíku s 5-10% vodíku, který pasivuje většinu defektů v materiálu), tj. tvorby nových defektů v materiálu následkem silného osvětlení, tzv. Staeblerův-Wronského jev. Základním strukturálním rozdílem mezi amorfním a krystalickým křemíkem je jistá deviace v úhlech vazeb (ideálně cca 109°) a délce vazeb (vzdálenosti sousedních atomů) - viz obr. 3. Tyto deviace mají za následek vznik „chvostových“ stavů v energetickém pásovém spektru. Některé teorie předpokládají, že „chvostové“ stavy valenčního pásu jsou spojeny s odchylkami v úhlech vazeb, naopak chvostové stavy vodivostního pásu souvisí s odchylkami v délce vazeb. Rozuspořádání mřížky vede ke vzniku koordinačního defektu - nenasycených vazeb křemíku, které mohou být neutrální nebo záporně či kladně nabitě. Nenasycené vazby tvoří energetické stavy v pohyblivostní mezeře, což nepříznivě ovlivňuje jejich součástkové aplikace. Proto jsou pasivovány atomy vodíku. Světelné záření a zvýšená teplota vazby Si-H rozrušují, resp. znovuvytvářejí. Takto vzniklé změny v hustotě stavů v pohyblivostní mezeře tenkých vrstev amorfních polovodičů jsou na KF PdF MU studovány pomocí optoelektrických metod.

Dále jsou studovány mechanické vlastnosti tenkých vrstev a struktur, jako je mikrotvrdost, houževnatost, pružnost dynamickou metodou mikrovýchluhu a jejich vazba na podmínky depozice a výsledné vlastnosti fotovoltaických článků.

Aplikace:

40kWp fotovoltaický systém na budově PdF MU

V současnosti je v provozu největší fotovoltaický systém v ČR na budově PdF MU v Brně. Jedná se o panely s instalovaným výkonem 40 kWp, umístěné jednak na ploché střeše (30+5 kWp), jednak ve vertikálním pásu (5kWp) v horní části fasády budovy Poříčí 31 (obr. 4).



Obr. 4 Fotovoltaický systém na budově PdF MU v Brně, Poříčí 31

Fotovoltaický systém na bázi krystalického křemíku byl dodán v rámci projektu Ministerstva životního prostředí, které poskytlo na projekt dotaci ve výši 90%. Před instalací bylo potřeba žádat o souhlas památkáře (budova je v samém okraji památkové zóny), kteří požadovali snížit o něco sklon střešních panelů, čímž dochází k poklesu výtěžnosti.

Celý fotovoltaický systém je napojen v hlavním rozvaděči na vnitřní silnoproudou síť fakulty, která zahrnuje tři budovy. Je tak do budoucna umožněno dodávat vyrobenou elektrickou energii do rozvodné sítě.

Fv panely na střeše a čelní fasádě jedné ze tří čtyřpodlažních budov pedagogické fakulty pokrývají v létě téměř denní potřebu elektrické energie celé fakulty. To je možno vidět na obr. 5, kdy např. dne 18. 6. 2005 byla spo-

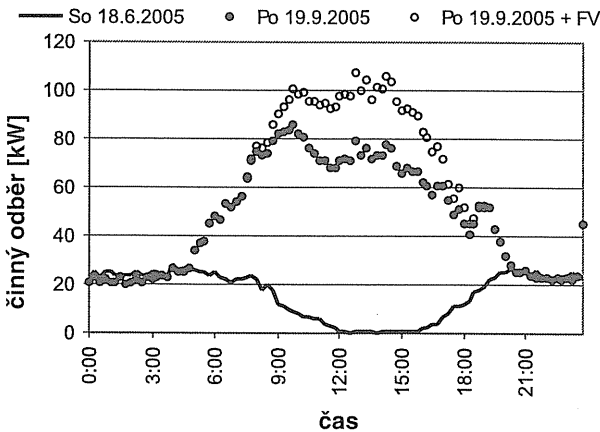
třeba fakulty mezi 12-16 hodinou pokryta plně, v pondělí 19. 9. 2005 se snížil špičkový odběr v poledních a odpoledních hodinách. Tento příznivý stav platí za slunného dne, pro dny, kdy je zataženo a slunce je níže na obloze, výkon FV panelů klesá na 5-10% jejich špičkové hodnoty.

Je zřejmé, že aplikace fotovoltaického systému na školní budově velmi dobře vykryvá její spotřebu elektřiny a že navíc odpadá potřeba úschovy vyrobené elektrické energie.

Osvěta: Fotovoltaika jako obnovitelný zdroj

Vedle základního výzkumu týkajícího se fotovoltaiky se na katedře fyziky na PdF MU věnují ještě didaktice obnovitelných zdrojů, a to jak při laboratorní výuce studentů učitelství fyziky, tak i v předmětu Enviromentální výchova, který absolvují i studenti nefyzikálních oborů. Vzhledem k možnosti získat v rámci projektu MŽP „Slunce do škol“ informace o denní výrobě elektrické energie z fotovoltaických panelů (většinou 100 Wp)

Odběr el. energie ze sítě – PdF MU



Obr. 5

Odběr elektrické energie ze sítě se současnou dodávkou z 40 kWp FV systému na PdF MU v Brně – slunečné dny, pro 19. 9. 2005 je doplněna křivka spotřeby, tj. odběr ze sítě + odběr z FV systému

rozmístěných po celé České republice lze z těchto informací zjistit např. délku slunečního svitu a využít je i v předmětech, jako je geografie či biologie. Mimo univerzitu je katedrou např. organizována celostátní soutěž pro žáky základních škol „O solární čepici“. Je připravována www stránka (přístupná z www.ped.muni.cz/wphy), na které jsou obdobné informace.

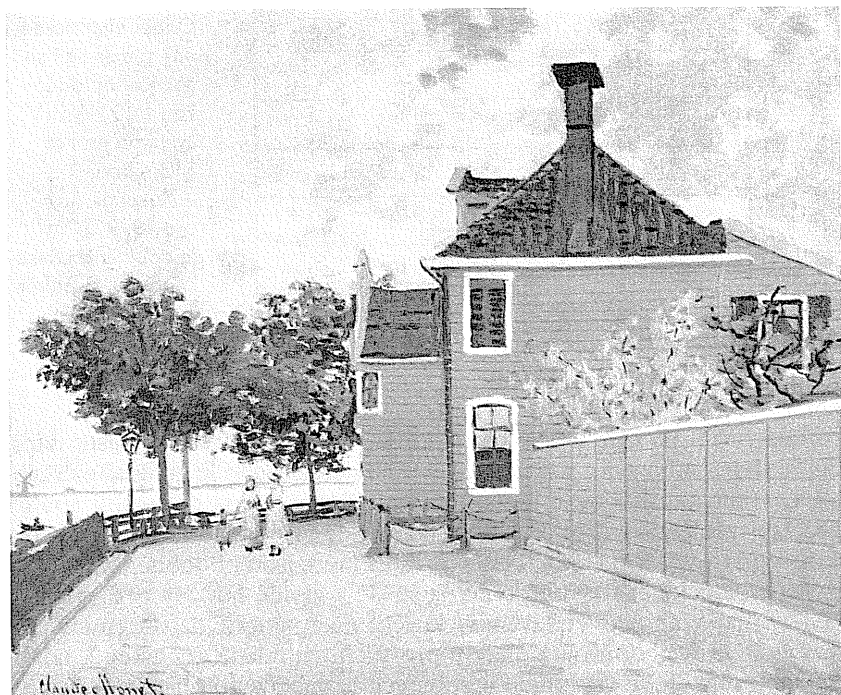
Fotovoltaické články umístěné na střeše a fasádě budovy pedagogické fakulty mají tak mimo získávání elektrické energie ještě další, neméně důležitý cíl. Jsou podpůrným pilířem pro výchovu mladé generace k udržitelnému rozvoji. Ve vstupních vestibulech je vyhrazeno místo pro dva informační panely, na nichž je zobrazován aktuální stav ve výrobě elektrické energie přímou konverzí z dopadajícího slunečního záření a další sledo-

vané parametry, jako je teplota či informace o větru a v neposlední řadě informace o snížení emisí CO_2 .

Očekáváme, že jedním z nejvýznamnějších dopadů umístěného fotovoltaického systému na naší fakultě bude větší rozšíření povědomosti o obnovitelných zdrojích energie přes budoucí učitele a jejich žáky na značnou část populace.

A co závěrem?

Přejí, všem, kteří pracují v základním výzkumu, aby měli možnost vidět výsledky své tvůrčí práce v běžném životě.



C. Monet: **Modrý dům v Zandamu**, 1871–1872