

MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ I

DRUHÉ ROZŠÍŘENÉ VYDÁNÍ

doc. Ing. Milena Pavlíková, Ph.D.

doc. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Hošek, DrSc.

Předmluva

Od počátku historie stavebnictví, v období kdy člověk buduje již trvalé obydlí, byly hmoty určujícím, ale i omezujícím faktorem architektonického i konstrukčního pojetí staveb. Jejich dostupnost, opracovatelnost a vlastnosti limitovaly způsob i úroveň stavění. Jednalo se o prosté pasivní uplatňování přírodních hmot podložené pouze praktickými zkušenostmi.

Rozvojem zkušeností a poznatků stavitelů, výrobou prvních uměle připravených hmot, se postupně dominující postavení hmot ztrácí.

Za zásadní etapu v uplatňování hmot lze považovat racionální výrobu jedné z prvních umělých stavebních hmot – betonu, který umožnil tvorbu stavebních konstrukcí v novém pojetí a v tom nejširším slova smyslu. Je třeba říci, že k tomu dochází jednoznačně díky výsledkům nastupujících technických vědních oborů chemie a fyziky.

*V současné době tlak na uplatňování nových poznatků všech technických oborů vyvíjený stavebními inženýry vede přes hmoty „šité na míru“, až ke snaze vyrábět stavební materiály s předem naprogramovanými vlastnostmi pro tu kterou stavební konstrukci nebo daný prvek stavby. Je již fakticky uzavřen okruh základních hmot svou povahou vhodných pro stavební konstrukce a rozšiřování materiálové základny může probíhat jen díky poznatkům vědeckého výzkumu směrem k racionálnímu využívání hmot, přehodnocení jejich možností pro stavbu, modifikacím a kombinacím hmot v podobě kompozitů. Vzniká nový obor, **materiálové inženýrství**.*

Náplní materiálového inženýrství je prohloubení poznání o struktuře hmot, vztahu jejich struktury a vlastností, vytvoření výpočetních postupů k uvědomělému programování nových typů materiálů. Shromažďování a utřídění vstupních dat – mechanicko-fyzikálních parametrů a vzájemných závislostí vlastností hmot na vnějších vlivech a změnách prostředí a výchova kvalifikovaných pracovníků jsou základními úkoly tohoto nového oboru.

Praha, říjen 2011

Autoři

1 PODSTATA STAVEBNÍCH HMOT

1.1 STAVBA ATOMŮ

1.2 CHEMICKÁ VAZBA

1.3 ROZDĚLENÍ A VLASTNOSTI ČISTÝCH LÁTEK

Vlastnosti stavebních hmot jsou určeny povahou a velikostí soudržných sil, které působí mezi jednotlivými atomy, ionty, případně molekulami. Z praktického hlediska umožňuje poznání způsobů vazby mezi částicemi hmoty a představa o strukturním uspořádání správně zvolit vhodné materiály pro dané stavební aplikace. Z teoretického hlediska jsou tyto znalosti předpokladem pro zásahy do složení hmot, příkladem může být modifikace materiálového složení, vytváření vhodných kombinací hmot při výrobě kompozitních materiálů s často kvalitativně odlišnými vlastnostmi od výchozích hmot i návrh materiálu dle specifických požadavků konstruktérů a technologů. Studium struktury každé hmoty musíme nutně začít u charakteristických elementárních složek hmoty a poznat jejich vzájemné vazby v chemické mikrostruktuře.

1.1 Stavba atomů

Abychom mohli pochopit základní děje, které probíhají ve velmi malých oblastech látky, např. povrchový film, kapka, bublina, pór, musíme nejprve porozumět struktuře nejmenších nedělitelných částí hmoty, tedy **atomů**. Atomy jsou schopny podržet si všechny charakteristiky prvku, skládají se z elementárních částic, které tvoří jednak **atomový obal**, označují se jako **elektrony**, a jednak **jádro atomu**, nazvané **nukleony** (protony a neutrony). Jelikož je atom celkově elektricky neutrální, musí být počet protonů s jednotkovým kladným nábojem stejný, jako počet nositelů jednotkového záporného náboje, tedy elektronů v atomovém obalu. Velikost atomu je taková, že ho můžeme zaznamenat pomocí maximálního zvětšení na transmisním elektronovém mikroskopu.

Počet protonů v jádře udává **protonové** (dříve atomové) **číslo** Z , přičemž zároveň definuje atomový poloměr a je základní charakteristikou každého atomu. Závislost elektronové struktury atomů na protonovém čísle znázorňuje **periodická tabulka**. Počet neutronů v jádře

udává **neutronové číslo** N . Součet obou čísel $Z+N$ udává počet všech částic v jádře – **nukleonové (hmotnostní) číslo** A . **Nuklidem** pak nazýváme soubor identických atomů, jejichž jádra mají identické složení. Dnes je známo okolo dvou tisíc nuklidů, z toho jen 266 je stabilních. Dále rozlišujeme **izobary**, což jsou nuklidy, které mají stejné nukleonové, ale různé protonové číslo, např. ^{40}Ar , ^{40}K a ^{40}Ca . Pokud má soubor atomů stejné protonové číslo, avšak liší se v počtu neutronů, hovoříme pak o **izotopech**. Izotopy jednoho prvku mají stejné chemické a velmi podobné fyzikální vlastnosti. Jako příklad uveďme kyslík, který má osm protonů ($Z = 8$) a může existovat ve formě tří izotopů:

- ^{16}O obsahuje 8 neutronů (nejběžnější izotop kyslíku),
- ^{17}O obsahuje 9 neutronů,
- ^{18}O obsahuje 10 neutronů.

1.1.1 Atomové jádro

Převážná většina hmotnosti atomu je soustředěna do jeho jádra, protože hmotnost elektronu je pouhá $1/1837$ hmotnosti protonu. Výsledný rozměr celého atomu je až 100 tisíckrát větší než je rozměr jádra. Z toho jasně vyplývá, že hustota jádra je nepředstavitelná, 10^{15} kg/m^3 , a tak mezi kladně nabitými protony působí značné odpuzivé síly. V přírodě však najdeme řadu atomů se stabilními jádry, a proto musí existovat mezi nukleony mnohem silnější interakce, které udržují jádra pohromadě. Jedná se o tzv. **jaderné síly** o velmi malém dosahu, jež je omezený pouze na oblast jádra (10^{-15} m). Porovnáme-li hmotnost jádra určitého prvku se součtem hmotností příslušného počtu izolovaných protonů a neutronů, zjistíme, že hmotnost jádra je nižší o tzv. **hmotnostní úbytek**. Tento hmotnostní rozdíl lze vyjádřit pomocí energie, která se označuje jako **vazebná energie jádra**. Velikost střední vazebné energie je závislá na nukleonovém (hmotnostním) čísle A . Nejvyšší hodnoty energie nukleonů (8.7 MeV) mají stabilní jádra v oblasti triády železa (Fe, Co, Ni). Většina stabilních jader obsahuje sudý počet částic. Některá jádra mají tzv. „magický“ počet částic (2, 4, 20, 28, 50, 82, 126) a vyznačují se zvýšenou střední vazebnou energií. Ačkoliv se běžně používá pojem poloměr atomového jádra, kulový tvar mají pouze některá jádra s magickým počtem protonů i neutronů. Většina jader má tvar protáhlého elipsoidu, některé jádra jsou dokonce zploštělá.

1.1.2 Atomový obal

Atomový obal, tvořící převážnou většinu prostoru atomu, představuje složitě uspořádaný prostor, ve kterém se pohybují elektrony. Prudký rozvoj fyziky, matematiky, ale i samotné chemie na počátku dvacátého století, umožnil položit základy studia struktury atomového

obalu a dějů, které v něm probíhají. Niels Bohr přišel s revoluční myšlenkou, že **elektrony se mohou pohybovat jen po určitých drahách, a nikoliv mezi nimi, energie elektronu tak nemůže nabývat libovolných hodnot**. Svou teorií položil základ kvantové mechanice, na jejíž další výstavbě se později aktivně podílel. Navázal na Ruthefordův objev a důkaz existence atomového jádra a s využitím Planckovy a Einsteinovy kvantové teorie sestavil **teoretický kvantový model atomu vodíku**, jenž vycházel z planetárního modelu - kolem kladně nabitého jádra krouží záporně nabitý elektron. Tento teoretický model je správný jen částečně pro jednoduché atomy s právě jedním elektronem, nelze jej použít pro složitější atomy.

Elektron se tudíž může pohybovat jen po drahách (v tzv. **orbitech**), jejichž energie se rovná celistvému násobku Planckovy konstanty. Při pohybu elektron svou energii nemění, avšak při přechodu mezi jednotlivými drahami ztrácí nebo přijímá určité kvantum energie. Dalším předpokladem jeho teorie bylo, že se atom skládá z kladných a záporných částic, které se navzájem přitahují. Elektrony obíhající nejbližší k jádru jsou vázány nejpevněji, takže k jejich uvolnění je zapotřebí mnohem větší energie než u elektronů vzdálenějších. Na začátku dvacátých let dvacátého století vypracoval Bohr schéma obsazování energetických hladin atomů elektrony, což v roce 1925 vedlo k formulaci **Pauliho vylučovacího principu** a k teoretickému zdůvodnění uspořádání prvků v Mendělejevově periodické soustavě prvků. Jeho výzkumy umožnily na konci třicátých let pochopit štěpení atomu.

V roce 1923 Arthur Compton experimentálně prokázal, že rentgenové záření má kvantovou podstatu (to svědčí o tom, že fotony lze pojímat jako částice), a o rok později pak Louis de Broglie přišel s důkazem, že hmota má i vlnové vlastnosti, tedy byl prokázán tzv. **duální charakter částic**. V letech 1925 - 1926 se zrodil nový obor fyziky, **kvantová mechanika**, u jehož vzniku stáli Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Max Born a Paul Dirac. Roku 1927 vytvořili tzv. kodaňskou školu kvantové teorie, dospěli k názoru, že atomové jevy jsou jak částicového tak i vlnového charakteru. Škola zahrnuje i Bohrův **princip komplementarity** (jevy v mikrosvětě jsou neurčité a není možné je popsat jako analogii klasické fyziky), aplikovaný později i na filozofii a biologii.

Erwin Schrödinger vydává v roce 1926 práci nazvanou "Kvantování jako problém vlastních hodnot", kde poprvé uveřejnil rovnici, dnes tzv. **Schrödingerova rovnice**, a výpočty, které vedou ke stejným výsledkům jako Bohrova teorie. Z této rovnice je možné určit vlnovou

funkci, která má význam amplitudy pravděpodobnosti výskytu částice a její kvadrát představuje hustotu pravděpodobnosti výskytu částice.

Dnes tedy předpokládáme, že elektron se v atomovém obale vyskytuje s největší pravděpodobností v určitém prostoru, nazvaném **orbit**. Abychom pochopili uspořádání elektronového obalu, zákonitosti a děje, které v něm probíhají, bylo nutné jednotlivé elektrony systematicky uspořádat podle určitých kritérií do orbitů příslušných tvarů a energií. Na základě tohoto uspořádání jsme pak schopni objasnit chování jednotlivých atomů, jejich vlastnosti a především jejich vazebné poměry.

Jako kritéria rozdělení elektronů do jednotlivých orbitů byla zvolena **kvantová čísla**, přiřazující každému elektronu určitou energii. Tím jednoznačně vyjadřujeme stavy, v jakých se vyskytují elektrony obíhající kolem jádra.

Jednotlivé orbity charakterizují tři kvantová čísla. **Hlavní kvantové číslo n** rozhoduje o energii daného orbitu a nabývá pouze kladných celočíselných hodnot ($n = 1, 2, \dots, 7$). Každé číslo n odpovídá příslušné **hladině** (neboli slupce, vrstvě), kterou tvoří určitý počet orbitů. Kromě hlavního kvantového čísla můžeme příslušnou hladinu označit písmenem K až Q, přičemž K se nachází nejbližší k jádru. Za běžných podmínek má elektron v atomu nejmenší možnou energii – je v základním stavu, dodáním energie můžeme elektron převést do **vzbuzeného (excitovaného) stavu**, kdy elektron přejde do hladiny s vyšším energetickým stavem s větší hodnotou n .

Vedlejší kvantové číslo l charakterizuje druh atomového orbitu, především jeho tvar, závisí na hlavním kvantovém čísle a nabývá hodnot 0, 1 až $n-1$. Zároveň orbity značíme dle příslušného vedlejšího kvantového čísla jako s pro $l = 0$, p pro $l = 1$, d pro $l = 2$, f pro $l = 3$ atd. Můžeme říci, že vedlejší kvantové číslo přiřazuje elektrony do podslupek.

Magnetické kvantové číslo m souvisí s prostorovou orientací orbitu podle pravoúhlých souřadnic s počátkem v jádře atomu a nabývá hodnot ± 1 včetně 0. Pomocí tohoto čísla rozlišujeme tedy orbity o stejném vedleším kvantovém čísle. Toto číslo nemá vliv na energii atomové orbitu, to znamená, že každá skupina orbitů téhož n a l má jedinou úroveň energie. V tomto smyslu se pak hovoří o **energetické degeneraci orbitů**, přičemž orbity s jsou nedegenerované a orbity ostatní degenerované.

Základní vlastností elektronu je jeho **spin**, který určuje vlastní hybný moment elektronu. Zjednodušeně si jej představíme jako rotaci částice kolem své osy, jedná se tedy o stejný případ, kdy Zeměkoule rotuje kolem své osy a zároveň krouží kolem Slunce po příslušné dráze. Bylo prokázáno, že v každém orbitu se vyskytují nejvýše dva elektrony, které se však musí lišit svými spinovými čísly. Rozlišujeme dvě spinová kvantová čísla $-1/2$ a $+1/2$. Význam jednotlivých kvantových čísel přehledně shrnuje Tab. 1.1.

Tab. 1.1 Význam kvantových čísel.

Označení	Symbol	Počet orbitů	Maximální počet elektronů	Co udává?
Hlavní kvantové číslo	n	n^2	$2 n^2$	Energii orbitu
Vedlejší kvantové číslo	l	$2l + 1$	$2 (2l + 1)$	Tvar a směrovost orbitu
Magnetické kvantové číslo	m	-	-	Orientaci orbitu v prostoru
Spinové kvantové číslo	s	-	-	Otáčení elektronu kolem vlastní osy

Počet elektronů v jednotlivých orbitech je omezený, jak jsme si výše objasnili, pomocí kvantových čísel. Aby kvantování orbitů fungovalo, bylo nutné zavést určitá pravidla, tzv. **pravidla zaplňování orbitů**:

1. **Výstavbový princip** – myšlený postup obsazování elektronů do jednotlivých atomových orbitů podle jejich rostoucí energie v souladu s dalšími principy až do okamžiku, kdy je vyrovnán kladný náboj jádra, vytvoří se základní elektronová konfigurace daného atomu.

Symbolicky se značí počet elektronů v orbitu jako exponent, např. pro křemík ($Z = 14$) je elektronová konfigurace následující: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$.

Podle energetické hodnoty bylo stanoveno pořadí orbitů:

$$1s < 2s < 2p < 3s < 3p < 4s < 3d < 4p < 5s < 4d < 5p < 6s.$$

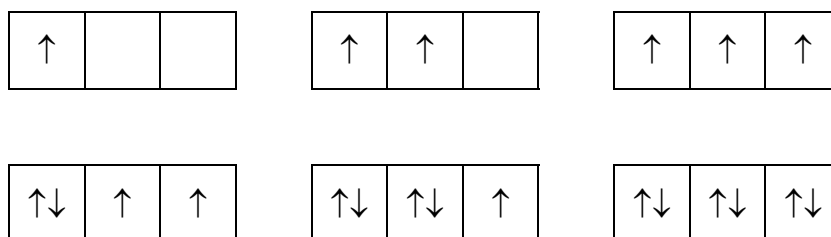
Pozn.: povšimněte si již výše zmiňované energetické degenerace (4s před 3d).

2. **Pauliho vylučovací princip** – omezuje výskyt elektronů v orbitech a to tak, že nemohou existovat dva elektrony, jejichž kvantová čísla by byla všechna stejná, z tohoto důvodu se v orbitu nacházejí maximálně dva elektrony a to s opačným

spinovým číslem, tato dvojice se označuje jako **elektronový pár**. Maximální počet elektronů v jednotlivých vrstvách je $2n^2$. Na tomto principu je založen periodický systém, který byl potvrzen kvantovou teorií.

3. **Hundovo pravidlo** – stavy (orbity) se stejnou energetickou hodnotou se všechny obsazují nejprve jedním elektronem.

V rámci slupky s daným hlavním kvantovým číslem vzrůstá energie orbitů v pořadí s, p, d, f. Se zvyšujícím se hlavním kvantovým číslem energetické hladiny jednotlivých orbitů různou měrou klesají, u středních atomových čísel dochází díky mezielektronové interakci ke křížení a odchylkám v hodnotě energií atomových orbitů. Právě obsazování elektronů do orbitů s takto tzv. **degenerovanou energetickou hladinou** řídí Hundovo pravidlo. Nepárové elektrony v degenerovaném orbitu mají souhlasný spin, protože v tomto případě je energie jejich vzájemné interakce nejvýhodnější, viz Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Postupné obsazování degenerovaných orbitů elektrony $\uparrow$ (Hundovo pravidlo).

4. **Pravidlo $n+1$** – pomáhá rozhodnout o tom, který ze dvou orbitů má nižší energii a bude se obsazovat dříve:
 - a) se stoupající energií orbitů stoupá i hodnota součtu $n+l$,
 - b) z orbitalů o stejném součtu $n+l$ má nižší energii ten, který má nižší hlavní kvantové číslo.

Stav jednotlivých elektronů ve všech složitějších atomech popisujeme pomocí systému kvantových čísel. Elektrony ve stavech se stejným n tvoří elektronovou vrstvu neboli slupku. Jednotlivé vrstvy se označují písmeny K-Q. Elektrony ve stavech se stejným n a l tvoří podslupku a mají stejnou energii. Poslední obsazenou vrstvu nazýváme jako **valenční** a je rozhodující pro vznik vazby. Výše uvedenými poznatky jsme si objasnili základní strukturu

každého atomu a získali jsme tak základní informace pro pochopení chování jednotlivých atomů.

1.1.3 Rozdělení prvků podle elektronové konfigurace, periodická tabulka prvků

Nejprve si vymezíme základní pojmy. **Prvkem** rozumíme základní strukturní jednotku hmoty, která se vyznačuje charakteristickými vlastnostmi a je tvořena atomy o stejném protonovém čísle. Chemické prvky jsou chemicky nerozložitelná, samostatné existence schopná chemická individua, tvořící součást složitějších chemických individuí – **sloučenin**. Prvky rozeznáváme přirozené nebo umělé, připravené metodami atomové fyziky. Atomy dále vytvářejí tzv. **molekuly**, což jsou nejmenší částičky určité látky, sloučeniny. Pokud sloučeninu rozdělíme tak, aby neztratila své chemické vlastnosti, vzniknou právě molekuly. Ty se vyznačují tzv. **relativní molekulovou hmotností**, která je dána součtem atomových hmotností jednotlivých atomů tvořících molekulu.

Pozn.: Atomové hmotnosti jednotlivých atomů najdeme v tabulkách nebo periodické tabulce.

Prvky obvykle dělíme na **kovy** a **nekovy**, právě podle jejich charakteristických vlastností. Kovy se vyznačují pevným stavem za normální teploty (kromě rtuti), mají vysoký lesk, dobře vedou elektřinu a teplo. Naproti tomu nekovy jsou buď pevné, nebo plynné (kromě kapalného bromu) a špatně vedou elektřinu a teplo. Hranici mezi oběma skupinami tvoří tzv. polokovy, které za určitých podmínek vykazují jak chování kovů, tak chování nekovů.

Všechny přirozené prvky se vyskytují v zemské kůře, avšak jejich zastoupení je značně nerovnoměrné, neboť téměř polovinu tvoří kyslík, čtvrtinu křemík a spolu s dalšími osmi prvky vytvářejí více než 99 % zemské kůry.

S objevem nových prvků souviselo i určování jejich relativních atomových hmotností, zkoumání jejich typických reakcí a hlavně jejich systematické řazení. Chemici zjišťovali, že některé prvky mají podobné vlastnosti. Jako první navrhl periodickou tabulku prvků Angličan J. A. R. Newlands. Tvrdil, že jsou-li prvky uspořádány podle atomové hmotnosti, jako by se u nich opakovaly určité vlastnosti na každém osmém místě – tzv. **zákon oktáv**, a přirovnal uspořádání prvků k oktávám na klávesnici klavíru. Všichni se jeho nápadu vysmáli, ale o pět let později publikoval ruský chemik Dmitrij Ivanovič Mendělejev nezávisle na Newlandsově práci vyvinutější formu tabulky, jež se používá dodnes. Mendělejev zjistil, že **u prvků**

seřazených podle vzrůstající atomové hmotnosti se pravidelně (periodicky) opakují podobné vlastnosti. V několika případech však musel udělat výjimku a předřadit těžší prvek lehčímu. Roku 1869 publikoval Mendělejev poprvé periodický zákon, který tuto závislost vyjadřuje, a periodickou tabulku prvků, která je grafickým vyjádřením periodického zákona. V tabulce vynechal místa pro prvky, o kterých předpověděl, že budou objeveny později.

Dnes je známo, že **prvky nejsou uspořádány podle relativní atomové hmotnosti, ale podle stoupajícího protonového čísla.** To byl také důvod, proč musel Mendělejev předřadit těžší prvek lehčímu. Mendělejevův periodický zákon však byl zpočátku přijat se značným skepticismem a nebyl dlouhou dobu uznáván. Až s objevením prvků gallia (1875), skandia (1879) a germania (1886), které Mendělejev předpověděl již v roce 1871, byl periodický zákon všeobecně přijat.

Dnes má tabulka 115 prvků (prvek se 118 protony byl sice již objeven, ale naopak prvky 113, 115 a 117 nebyly ještě izolovány), přičemž o názvech posledních, nově objevených prvků se vedla dlouhá diskuse. V roce 1997 konečně šest nových chemických prvků, objevených v letech 1964-1984, dostalo své jméno. Jde o další transurany, prvky s vyšším protonovým číslem než je číslo uranu (92), s pořadovými čísly 104 až 109. Jména jim udělila Mezinárodní unie pro čistou a aplikovanou chemii (IUPAC). Nové transurany dostaly názvy ruthfordium (Rf, 104), dubnium (Db, 105), seaborgium (Sg, 106), bohrium (Bh, 107), hassium (Hs, 108) a meitnerium (Mt, 109). Objeveny byly v USA, v bývalém Sovětském svazu a v Německu.

Jaké zákonitosti panují v periodické tabulce? Především, tabulka je rozdělena na horizontální řady s čísly 1 až 7, tzv. **periody**. Máme tedy sedm period, což tvoří ekvivalent k obsazování elektronů ve valenčních slupkách K až Q. Dále rozeznáváme vertikální sloupce neboli **skupiny**. Těch je šestnáct, značí se IA – VIIIA a IB – VIIIB (hlavní a vedlejší) a obsahují atomy, v jejichž valenční sféře je stejný počet elektronů, ten odpovídá označení sloupce, např. prvky v prvním sloupci IA ($Z = 1, 3, 11, 19, 37, 55, 87$) mají ve valenčním s-orbitu pouze jeden elektron. Dále jsou v tabulce vyčleněny tzv. lanthanoidy ($Z = 58 - 71$) a aktinoidy ($Z = 90 - 103$), což jsou vnitřně přechodné prvky, se kterými se běžně nesetkáme. Barevně jsou v tabulce odlišeny vpravo nahoře nekovy, směrem doleva dolů narůstá kovový charakter prvků. Dodnes používáme také tradiční názvy některých skupin prvků, např. alkalické kovy (IA od Li), kovy alkalických zemin (IIA od Ca), chalkogeny (VIA od S), halogeny (VIIA), vzácné plyny (VIIIA), triáda mědi (Cu, Ag, Au), triáda železa (Fe, Co, Ni), lehké platinové kovy (Ru, Rh, Pd) a těžké platinové kovy (Os, Ir, Pt).

Vzácné plyny jsou atomy, které mají ve všech orbitech úplný počet elektronů. Tato konfigurace je velmi stabilní, a proto jsou vzácné plyny velmi málo reaktivní. Atomy se zaplněnými s-orbity se označují jako s-prvky, atomy se zaplněnými p-orbity jako p-prvky. Chemické vlastnosti těchto prvků jsou řízeny snahou odevzdat, přijmout nebo sdílet elektrony tak, aby jejich elektronová konfigurace dosáhla konfigurace nejbližšího vzácného plynu. Z uvedených skutečností vyplývá, že periodická tabulka dobře vystihuje základní chemické vlastnosti prvků, které jsou závislé především na vnějších (valenčních) elektronech. Právě tyto elektrony jsou dostupné pro chemické vazby. Výsledkem podobnosti chemického charakteru (díky podobnosti vnější elektronové konfigurace) je podobnost chování prvků, které pak můžeme nalézt v podobných krystalografických pozicích různých minerálů.

1.2 Chemická vazba, fyzikálně-chemická vazba

Jak již bylo řečeno, snaží se atomy dosáhnout elektronové struktury, která se podobá struktuře vzácných plynů, což znamená, že potřebují zaplnit poslední, valenční vrstvu osmi elektrony. Dosáhnou toho tím, že se seskupí do větších celků, tzv. **molekul**. Podle způsobu, jakým toto spojení nastalo, můžeme rozdělit jednotlivé vazby do několika skupin. V další části si vysvětlíme vznik jednotlivých vazeb a jejich charakter, neboť způsob vazby atomů rozhoduje o chování molekul a tím i o chování hmoty. Vlastnosti čistých látek jsou právě projevem struktury a uspořádání chemických vazeb mezi jejich atomy. Pevnost vazeb, způsoby jejich rozdělení mezi atomy a jejich povaha rozhodují o vlastnostech látek z nich vytvořených.

Ve výjimečných případech se v přírodě vyskytují volné atomy, např. jednoatomové molekuly vzácných plynů, ostatní atomy se slučují pomocí valenčních sil do složitějších útvarů. Kvantová mechanika na základě vlnové mechanických představ chemické vazby může odvodit např. délku vazby, její energii, ale pouze v nejjednodušších případech. V ostatních případech je nemožné najít řešení Schrödingerovy rovnice, proto nastupují metody přibližného řešení, např. metoda valenčních struktur, navržená v roce 1927 Heitlerem a Londonem, a metoda molekulových orbitů, vypracovaná Hundem, Mullikenem a Lennard-Jonesem.

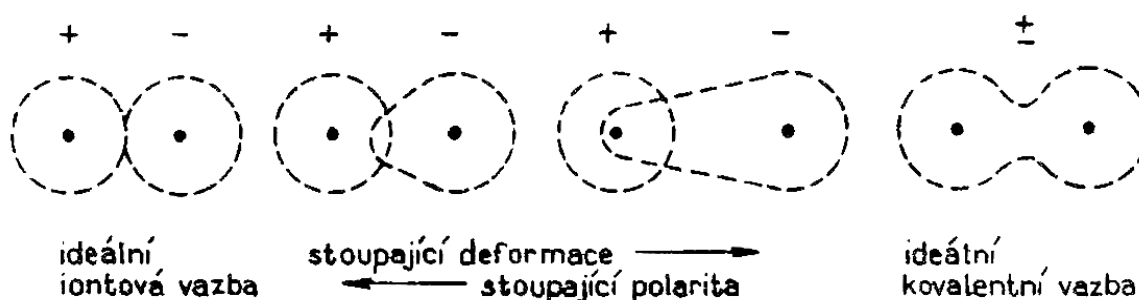
Rozeznáváme vazby s vazebnými elektrony a slabé interakce bez vazebných elektronů. Pro přehlednost si nejprve vazby rozdělíme dle jejich charakteru:

- vazby pomocí vazebných elektronů - kovalentní (atomová) vazba,
 - polarizovaná kovalentní vazba,

- iontová vazba,
- kovová vazba.

- vazby bez vazebných elektronů - vazba vodíkovým můstkem,
- van der Waalsova vazba.

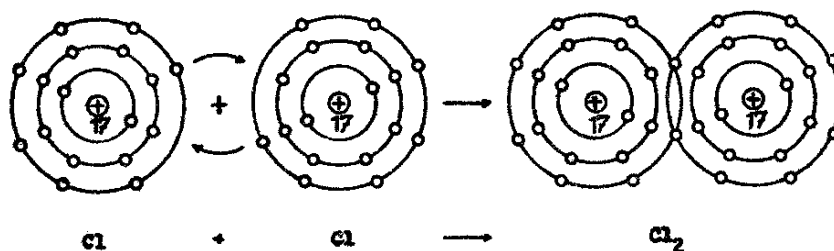
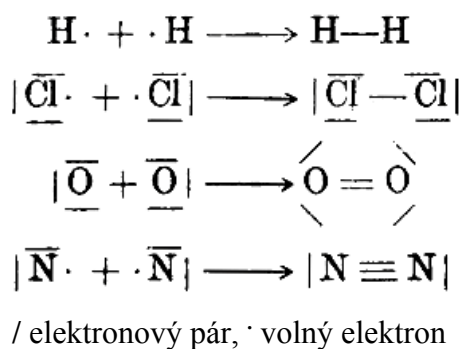
Následující Obr. 1.2 znázorňuje vliv polarizace a přechod ideální kovalentní vazby na vazbu iontovou.



Obr. 1.2 Vliv polarizace na vazbu dvou atomů.

1.2.1 Kovalentní (atomová) vazba

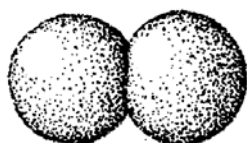
Kovalentní vazba vzniká většinou u atomů téhož druhu, kdy si oba rovnocenné atomy vzájemně doplní vnější elektronové vrstvy na **stabilní konfiguraci** (oktet). Model kovalentní vazby vychází z představy, že elektrony dvou atomů jsou vtahovány elektrostatickými silami atomových jader do společné oblasti. Vazby se účastní sudý počet elektronů $2n$ (2, 4, 6), nazývají se **vazebné**, **valenční**, přičemž dva elektrony, které spolu tvoří kovalentní vazbu, musí mít opačný spin. Jedná se o nejrozšířenější typ vazby mezi atomy, která se vyznačuje splynutím elektronových hladin dvou a více atomů za vzniku molekuly, oba elektrony náleží stejnou měrou oběma atomům a nezáleží na tom, ke kterému atomu který elektron původně patřil. Jako nejjednodušší případ si uvedeme vznik dvouatomových molekul H_2 , Cl_2 a N_2 (Obr. 1.3).



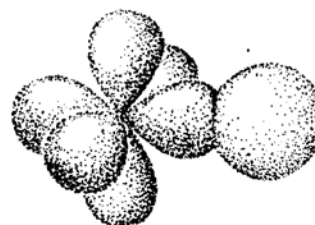
Obr. 1.3 Vznik dvouatomových molekul.

Pro vytvoření **chemické vazby** je rozhodující hledisko energetické, protože nejstabilnější jsou systémy s nejnižší energií, tudíž chemická vazba se vytvoří pouze tehdy, pokud je proces spojen s uvolněním energie. Mezi atomy se tvoří taková chemická vazba, kdy je uvolněná energie maximální. Chemickou vazbu charakterizuje **délka vazby** r_0 (pm) a **disociační energie** D_0 (kJ/mol), odpovídající práci potřebné k rozštěpení vazby mezi atomy, současně udává množství energie uvolněné při vzniku vazby, nebo můžeme říci, že je kvantitativní mírou „síly nebo pevnosti“ s jakou se atomy v molekule vzájemně poutají. Kovalentní vazba je relativně velmi silná, její energie je řádově 3-7 eV.

Podstatou slučování dvou a více atomů jsou změny ve valenční sféře a překrývání orbitů. Počet chemických vazeb, které může atom vytvořit, nazýváme **vaznost**. Pokud dojde k překrytí dvou orbitů, vzniká **vazba jednoduchá**, viz Obr. 1.4.



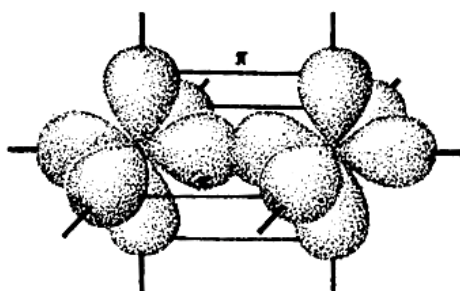
a) Jednoduchá vazba dvou atomů vodíku.



b) Jednoduchá vazba molekuly HBr.

Obr. 1.4 Vznik jednoduché vazby sdílením elektronového páru a) dvou orbitů s
b) orbitu s a p.

Pokud dojde k překryvu čtyř či šesti orbitů, vzniká **vazba dvojná a trojná**, viz Obr. 1.5.



Trojná vazba v molekule N_2 .

Obr. 1.5 Vznik trojné vazby v molekule dusíku.

Podle prostorového uspořádání, tedy podle maximálního výskytu vazebného elektronového páru vzhledem ke spojnici jader atomu se rozlišuje vazba:

σ typická pro překryv orbitů s,

π typická pro překryv orbitů p.

Další důležitou pomocnou teorií vzniku a popisu vazeb je **teorie hybridizace** – kombinací atomových orbitů jednoho atomu, které se zapojují do vazby, vznikají nové, tzv. hybridizované orbity. Ty mají takové prostorové uspořádání, které vyhovuje vytvoření dané molekuly a mají všechny stejnou energii (jsou degenerované). V praxi se podle známých, stanovených, tvarů hybridních orbitů odvozuje struktura daných molekul (postup by měl být opačný – podle experimentálně zjištěné struktury odvozovat tvar orbitů), ale zmíněné využití teorie je velmi praktické.

Přehled hybridních orbitů:

sp - lineární tvar (180°), AB_2 , B-A-B, např. CO_2 ,

sp^2 - rovnostranný trojúhelník (vazebný úhel 120°), AB_3 ,

sp^3 - tetraedr – čtyřstěn ($109^\circ 28'$), AB_4 ,

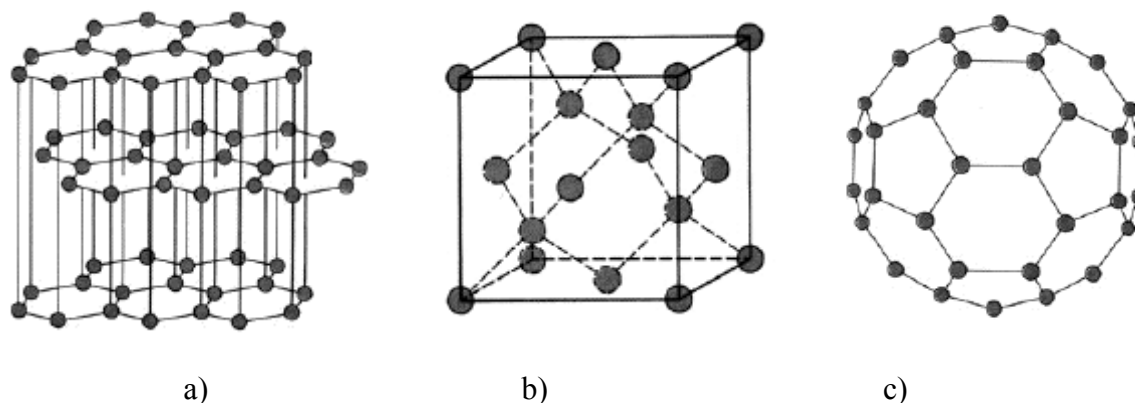
sp^3d nebo dsp^3 - trigonální bipyramida (trojboký dvojjehlan), AB_5 ,

sp^3d^2 nebo d^2sp^3 - oktaedr (osmistěn), AB_6 .

Takto odvozené geometrické tvary molekul vysvětlují, proč jsou některé molekuly polární. Jak si uvedeme podrobněji, každá **heteronukleární vazba**, vazba dvou odlišných atomů, má svůj dipólový moment s definovaným směrem. U víceatomových molekul (iontů) můžeme

tyto vazebné dipólové momenty sčítat jako vektory a získáme tak výsledný dipólový moment. Souměrně uspořádané molekuly, **nepolární**, mají výsledný dipólový moment nulový, nesymetrické molekuly, **polární**, vykazují nenulový dipólový moment.

Kovalentní vazba je důležitá zejména v chemii uhlíku, protože atomy uhlíku tvoří mezi sebou čtyři kovalentní vazby. Tím je dána velká variabilita prostorového i chemického uspořádání uhlíkových sloučenin, např. Obr. 1.6:



Obr. 1.6 Kovalentní vazby mezi uhlíkovými atomy a) grafit, b) diamant, c) fulleren.

Pokud vznikne elektronový pár překrytím orbitu obsahujícího pár s prázdným, vakantním orbitem, jedná se o vazbu **koordinálně kovalentní**, atom poskytující vazebný elektronový pár se nazývá donor (dárce), atom přijímající se označuje jako akceptor (příjemce), např.:

[Cu(NH₃)₄]SO₄ síran tetraamminměďnatý - centrální atom – Cu,
 - ligandy (abecedně) – (NH₃),
 - koordinační číslo – 4.

1.2.1.1 Elektronegativita

Jednotlivé atomy se liší také silovým působením svého jádra, tím pádem jsou elektrony přitahovány k jádru jinou silou. Tato síla působí i na elektrony, které se zúčastňují vazby, tudíž atom, který je schopen poutat elektrony větší silou, způsobí posun vazebné dvojice elektronů svým směrem. To má za následek ztrátu původního kovalentního charakteru vazby a vazba se stává **polarizovanou kovalentní**, v extrémních případech pak iontovou, o které se zmíníme později. Kvantitativní mírou tendence atomů přitahovat v molekule elektrony je veličina zvaná **elektronegativita** χ . Kvalita vazby samozřejmě rozhodujícím způsobem zasahuje do chemického, potažmo fyzikálního, chování molekul a z tohoto důvodu má

elektronegativita bezprostřední význam pro pochopení vztahů mezi reaktivitou a strukturou. Elektronegativita je veličina složitá, proměnná, závisí nejen na protonovém čísle, ale i na oxidačním stupni a valenčním stavu příslušného atomu. Obecně můžeme říci, že v periodách se s rostoucím protonovým číslem zvětšuje a ve skupinách shora dolů klesá. Atomu fluoru byla přisouzena nejvyšší elektronegativita 3.98 jako referenční, nejnižší hodnotu 0.7 má francium.

Pozn.: Někdy se setkáme s označením Paulingova elektronegativita, neboť právě on určil a vypočítal elektronegativity většiny atomů.

1.2.2 Polarizovaná kovalentní vazba

Pokud se atomové vazby zúčastní dva různé atomy, tedy atomy s rozdílnou elektronegativitou, je vazebný elektronový pár posunut směrem k atomu o vyšší elektronegativitě. Z fyzikálního hlediska se jedná pouze o poruchu původní elektrické souměrnosti molekuly. Má to však závažné důsledky. Na jednom z atomů se objeví záporný náboj a druhý získává náboj kladný. Vazba tak vlivem elektrostatického působení získává navíc polární až iontový charakter, přičemž velikost iontového příspěvku je přímo úměrná rozdílu elektronegativit příslušných atomů v molekule. V důsledku toho dojde ke zpevnění vazby. Pokud je tento rozdíl větší než 1.7, vzniká vazba iontová.

Nerovnoměrné rozdělení elektronů způsobuje elektrickou nesymetrii a atomy získávají náboj. Vzniklému stavu říkáme elektrický dipól a každé takovéto vazbě můžeme přisoudit **dipólový moment** μ , který má jistou velikost a směr. Dipólový moment, který je mírou polarizace (iontovosti) kovalentní vazby je experimentálně dostupná veličina definována vztahem

$$\mu = q \cdot l \text{ (C} \cdot \text{m)},$$

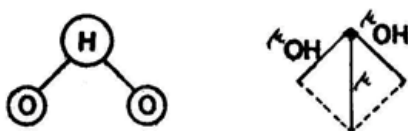
kde q (C) je náboj a l (m) je vzdálenost středů atomů.

Obecně můžeme říci, že čím je dipólový moment větší, tím má molekula polárnější (iontovější) charakter, viz Tab. 1.2.

Tab. 1.2 *Dipólové momenty vybraných molekul.*

Molekula	HCl	H ₂ O	H ₂ S	NH ₃
$\mu \cdot 10^{-30}$ (C. m)	3.4	6.1	3.1	4.9
Polarita (%)	22	30	4	15

Jako typický příklad si uvedeme molekulu vody, která vlivem uspořádání elektronů a protonů vytváří geometricky tetraedr. Dipólové momenty víceatomových molekul jsou dány vektorovým součtem dipólových momentů všech vazeb v molekule, včetně dipólových momentů způsobených volným elektronovým párem, viz Obr. 1.7.



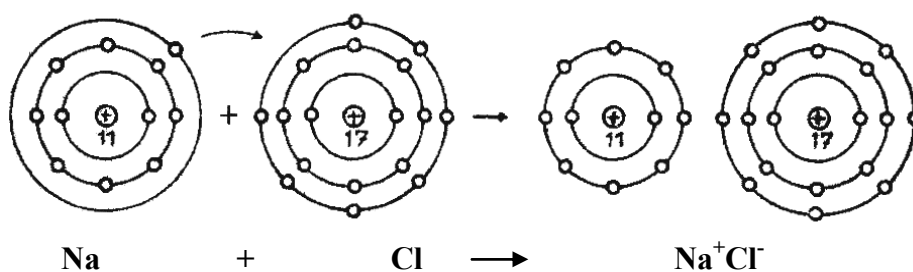
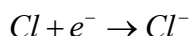
Obr. 1.7 *Polární struktura molekuly vody.*

V molekule vody je vzdálenost vazby O – H 96 pm, poloměr molekuly je 138 pm a úhel vazeb H – O – H je 105°. Úhel mezi volnými elektronovými páry a jádrem kyslíku je 120°. Polární struktura vody ovlivňuje celou řadu jejích vlastností. Propůjčuje vodě velmi dobré rozpouštěcí vlastnosti solí a sloučenin s polárními molekulami a umožňuje hydrataci maltovin. Vlivem polarity se mohou molekuly vody vázat, asociovat, neboli sdružovat do jakýchsi komplexů a tvoří se tzv. **vodíkové můstky**. Podrobněji se tímto jevem budeme zabývat ve zvláštní kapitole.

Pro dipólový moment platí určité zákonitosti, avšak obecně platí, že pro dvouatomové molekuly prvků je jeho hodnota nulová (vazby jsou nepolární), jedná se tedy o čistě kovalentní vazbu. V případě heterogenních molekul dosahuje dipólový moment hodnot větších než nula (vazby jsou polární) a nejvyšších hodnot dosahuje u iontových sloučenin (LiH, KF). Pokud jsou víceatomové sloučeniny symetrické, dipólové momenty se ruší a výsledná hodnota je nulová (CH₄, CO₂). Dokonalejší obraz o struktuře a vzájemných polohách atomů se získá na základě studia krystalů příslušných sloučenin pomocí rentgenových paprsků.

1.2.3 Vazba iontová (elektrovalence)

Atomy, které se příliš neliší počtem elektronů od atomů vzácných plynů, se snaží stabilizovat svoji elektronovou strukturu tak, že atomy s přebývajícím počtem elektronů tyto elektrony odevzdají atomům, kterým elektrony do plného oktetu chybí. Můžeme také říci, že atom s nižší ionizační energií předává valenční elektrony prvku s vyšší hodnotou ionizační energie za vytvoření plně obsazených vnějších hladin. Takto vzniklá částice není elektricky neutrální, nese elektrický náboj a nazývá se **ion**. Obecně můžeme výše uvedené shrnout tak, že atomy alkalických kovů (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) mají v poslední orbitě jediný valenční elektron, slabě vázaný k celému atomu, naopak halogenům (F, Cl, Br, I, At) chybí v poslední orbitě jeden elektron k tomu, aby byla zcela zaplněna. Opustí-li tedy valenční elektron atom alkalického kovu a přejde do elektronového obalu halogenu, stane se z něho kladný ion. Naopak z halogenu se stane ion záporný, přičemž oba ionty mají elektronovou konfiguraci vzácných plynů (mají všechny orbity plně zaplněné elektrony). Na Obr. 1.8 je názorně ukázán vznik molekuly chloridu sodného.



Obr. 1.8 Vznik molekuly NaCl.

Pozn.: V krystalu NaCl neexistují molekuly NaCl, ale ionty Na^+ a Cl^- poutané k sobě elektrostatickými silami. Přitažlivé a odpudivé síly udržují ionty v krystalu v rovnovážných polohách, kolem nichž vlivem teploty oscilují, vzniká tzv. **pravidelná krystalová iontová mřížka**.

U tohoto druhu vazby se uplatňují značné elektrostatické síly působící mezi opačně nabitými ionty. Výsledná vazba mezi oběma ionty je čistě elektrostatická a síly mezi nimi jsou dány Coulombovým zákonem

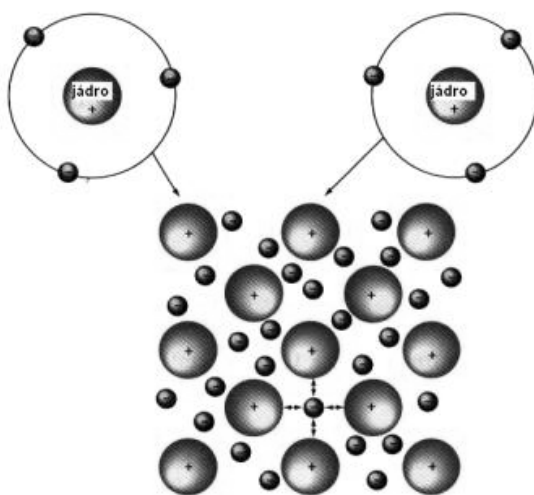
$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} \quad ,$$

kde e je náboj elektronu a ϵ_0 je dielektrická konstanta (permitivita) vakua.

Vazebná energie iontových krystalů je řádu 10^3 kJ/mol (5 eV/iont), tedy asi o dva řády vyšší, než energie van der Waalsovy vazby. Energie iontových vazeb je srovnatelná s vazbami kovovými (2-5 eV). Tvar iontů je kulový s různým průměrem. Iontová vazba je velmi pevná, nejčastěji se vyskytuje u alkalických kovů, kovů alkalických zemin a halogenů. Iontově vázané látky mají vysoký bod tání (NaCl asi 800°C), velmi vysoký bod varu (NaCl 1442°C), jejich roztoky vedou dobře elektrický proud a vykazují velkou mechanickou pevnost. Vazba se velmi snadno rozruší rozpouštědly, např. vodou, dochází k uvolnění iontů, tzv. **disociace**. Příklady látek s iontovou vazbou: NaCl, CaCl₂, MgBr₂, AlF₃, CaO, BaO, MnO₂ aj.

1.2.4 Vazba kovová

Lze ji považovat za zvláštní případ vazby iontové, kdy je soubor kladně nabitých atomů (kationů) obklopen delokalizovanými elektrony, tzv. **elektronovým plynem**. Ten vzniká tak, že se od atomů kovů oddělí elektrony a zůstanou volné, tedy pohyblivé, a udržují tak elektroneutralitu. Volné elektrony, nacházející se mezi těmito kladnými ionty jednak odstiňují jejich elektrostatické odpudivé síly a zároveň působí jako „lepidlo“, které je váže dohromady, viz Obr. 1.9.



Obr. 1.9 Schéma kovové vazby.

Soudržnost kovů je tedy způsobena přitažlivou elektrostatickou silou mezi kladně nabitými kationy a záporně nabitým elektronovým plynem, energie kovových vazeb se pohybuje v rozmezí $\sim 1.5\text{--}4\text{ eV}$. Důležitým znakem kovové vazby je její **nesměrovost**, čímž se výrazně odlišuje od kovalentní vazby. Důsledkem toho je vznik těsně uspořádaných krystalických struktur, které si můžeme představit tak, že každý atom nahradíme koulí a tyto koule se snažíme v prostoru uspořádat takovým způsobem, aby ho co nejvíce zaplnily.

Nastíněný mechanismus kovové vazby vysvětluje kvalitativně některé charakteristické vlastnosti kovů, jako je například velká tepelná a elektrická vodivost, apod. Vazebná energie kovové vazby může být jak poměrně nízká, např. 68 kJ/mol (0.7 eV / atom) pro Hg (bod tání -39°C), až po 850 kJ/mol (8.8 eV / atom) pro wolfram (bod tání 3410°C).

Typické fyzikální vlastnosti kovů, jako je lesk, vodivost, kujnost a tažnost, ale i jejich chemické vlastnosti úzce souvisí s vazbou a uspořádáním jejich atomů. Pokud vložíme kovy do elektrického pole, dojde k usměrnění pohybu delokalizovaných elektronů a výsledkem je vedení proudu kovy, proto se kovy řadí mezi **elektrické vodiče**. Elektrická vodivost kovů je tím vyšší, čím dokonalejší je uspořádání jejich mřížky. Přítomnost nečistot vede k deformaci mřížky a ke snížení vodivosti. Ta klesá také s rostoucí teplotou, protože tepelný pohyb kationů brání průchodu elektronů. **Magnetické vlastnosti** souvisejí jednak s pohybem volných elektronů, jednak se směrem jejich **rotace**, tedy spinem:

a) **Diamagnetické kovy** – vyznačují se nulovým výsledným magnetickým momentem v důsledku symetrického uspořádání elektronů v atomu, avšak elektrickou indukcí získají malý magnetický moment, směřující proti směru vnějšího pole, tím pádem jsou z něj vypuzovány, jedná se např. o Zn, Bi, Cu, Ag atd.

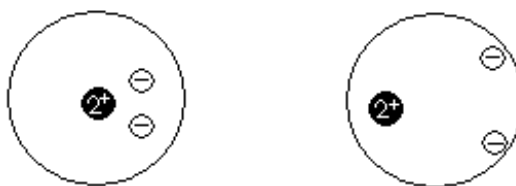
b) **Paramagnetické kovy** – mají nesymetrické uspořádání elektronů v atomu a každý atom má určitý magnetický moment. Pokud je vložíme do magnetického pole, magnetické momenty všech atomů se zorientují po směru vnějšího pole, např. Na, K, Li, Al, Pt atd.

c) **Feromagnetické kovy** – mají trvalé magnetické momenty prostorově ovlivněné uspořádáním atomů v mřížce, např. Fe, Co, Ni atd.

Kromě výše popsaných případů vazeb existují další přitažlivé (soudržné) síly: van der Waalsovy, vodíková vazba aj. Tyto síly jsou elektrostatické povahy a ve srovnání například

s kovalentní nebo iontovou vazbou jsou velmi slabé, avšak působí ve všech třech skupenstvích mezi elektricky nenabitými atomy a molekulami.

Jejich vznik se vysvětluje vzájemným elektrostatickým přitahováním opačně nabitých atomů nebo konců molekul. Náboje vznikají v důsledku okamžitého (dočasného) nevyváženého rozložení elektronů a kladně nabitých jader atomů a vytvoří se tzv. **indukovaný dipól**. Jeden takto vzniklý dipól může indukovat (vyvolat) svým elektrickým polem vznik dalších dipólů na sousedních atomech, viz Obr. 1.10



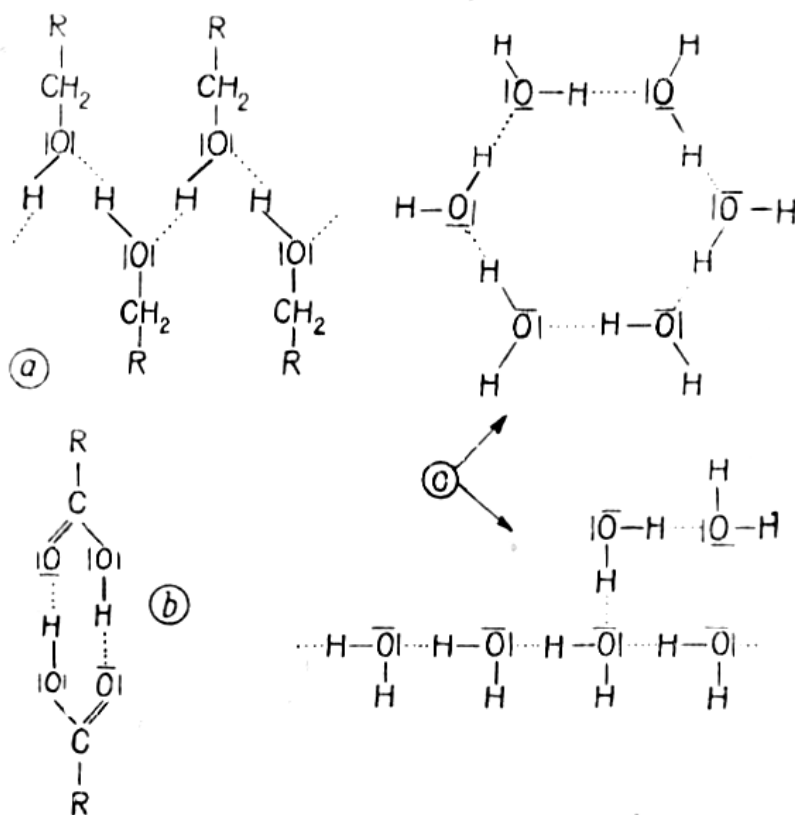
Obr. 1.10 *Model časově omezených indukovaných dipólů.*

Výsledkem je orientace jednotlivých dipólů opačně nabitými konci a vzájemné přitahování, i když jde vlastně o elektricky neutrální částice. Síly mezi dipóly působí na velice malé vzdálenosti a ani jejich energie není významná, ta závisí především na míře **polarizovatelnosti** a jejich vzdálenosti. Kationy, jako malé a obtížně polarizovatelné částice, mají polarizační účinek (sílu) a deformují tak elektronový obal anionů. Polarizační síla a polarizovatelnost mají rozhodující vliv na fyzikální vlastnosti sloučenin, např. skupenské stavy, teploty varů a tání atd. Nejsnadněji se polarizují nepolární molekuly, obtížněji ionty a nejhůře anorganické ionty.

1.2.5 Vazba vodíková (vodíkový můstek)

Vodíková vazba je definována jako vazba atomu vodíku ke dvěma či více atomům. Je tedy zřejmé, že se nemůže jednat o běžnou kovalentní vazbu, neboť atom vodíku je jednovazný. Tato vazba vzniká u většiny sloučenin, **hydridů**, které obsahují atom vodíku vázaný na atom fluóru, dusíku nebo kyslíku, tj. na prvky s vysokou elektronegativitou a volným elektronovým párem. Atom vodíku je zde vázán silně polární kovalentní vazbou, čímž atom vodíku získává částečně kladný náboj a vytváří kolem sebe elektrostatické silové pole o intenzitě úměrné velikosti získaného náboje. Atom vodíku začne přitahovat molekuly, i částice, s atomy, které mají k dispozici nevazebný elektronový pár a přebytek záporného náboje. Tímto způsobem

vznikne vazebný útvar, tzv. **vodíková vazba (můstek)**, což je ve své podstatě vazba uskutečněná na základě vzájemné přitažlivosti mezi opačně nabitými konci molekul, tedy interakce dipól – dipól, viz Obr. 1.11.



Obr. 1.11 Schéma vodíkové vazby a) alkohol, b) organická kyselina, c) voda.

Jedná se o složitý jev, který nezahrnuje pouze účinky silového pole, nýbrž musíme brát v úvahu také směrový charakter této vazby. Vodíková vazba tedy zahrnuje elektrostatické a kvantově-mechanické interakce, z elektrostatických sil je to hlavně dipól-dipólová interakce a Londonovy disperzní síly.

Vodíkový můstek není tak pevný jako např. vazba kovalentní, pouze 2-10 kcal, zatímco kovalentní vazba má kolem 80 kcal. Ještě je nutné poznamenat, že vodíkové můstky se mohou tvořit uvnitř téže molekuly (**intramolekulární můstek**, DNA), nebo mezi dvěma molekulami (intermolekulární můstek, voda). Vznik intermolekulárních můstků mění fyzikální vlastnosti látky, omezuje volnou pohyblivost molekul a tím zvyšuje bod varu, měrné teplo a viskozitu. Díky tvorbě vodíkových můstků můžeme u vody pozorovat vysoký bod varu, který by byl v případě, že by voda nebyla polární, -80°C .

1.2.6 Van der Waalsovy síly

Van der Waalsovy síly patří mezi nejslabší typ vazebné interakce mezi nenabitými atomy a molekulami. Existenci této vazby se vysvětluje odlišné chování částic v plynném stavu od stavu teoretického (ideálního).

Jedná se o interakci nepochárních atomů, kdy vzniká okamžitý dipól, přičemž směr a jeho velikost se rychle mění. Okamžitý dipól vzniká neustálým pohybem elektronů vzhledem k atomovému jádru, což má za následek vznik odchylky v rovnováze kladného a záporného náboje. Podle konkrétního způsobu vytvoření těchto dipólů dělíme van der Waalsovy síly na tři druhy:

1. **Disperzní interakce** (indukovaný dipól - indukovaný dipól) – vychází z představy, že atomy v molekule chaoticky oscilují (kmitají) kolem rovnovážných poloh a že v určitých momentech se poruší elektroneutrální stav molekuly a z neutrálních atomů vzniknou malé dipóly. Ty se mohou vzájemně orientovat tak, že se přitahují, nebo odpuzují. Jak ale ukazují podrobné výpočty, v případě přitahování je celková energie systému nižší, než v případě odpuzování. Proto dojde přednostně ke vzniku přitažlivých sil mezi dipóly a vznikne vazba. Kvantově mechanické zpracování této interakce podal F. London (1930), proto se těmito silám říká také Londonova interakce. Energie této vazby je velice malá (řádově 10 kJ/mol) a síly mají krátký dosah.

2. **Interakce indukované** (permanentní dipól – indukovaný dipól) – některé molekuly tvoří dipóly samy o sobě, tzv. polární molekuly, ty pak mohou indukovat dipóly v sousedních nepochárních molekulách, nebo atomech, tím pádem mezi nimi vzniká vazba. Jedná se o vazbu silnější, než je vazba disperzní, ale opět se jedná o vazbu velmi krátkého dosahu. Její interakční energii odvodil P. J. W. Debye (1920), který roku 1936 dostal Nobelovu cenu za chemii za výzkum stavby molekul a za zkoumání dipólových momentů.

3. **Interakce mezi permanentními dipóly** – jedná se o síly působící mezi polárními molekulami, kdy záporný konec jedné molekuly je přitahován ke kladnému konci molekuly druhé atd. Jedná se o elektrostatický jev, který můžeme popsat Coulombovým zákonem. O teoretické vysvětlení původu těchto sil se jako první pokusil W. H. Keesom (1912), proto se někdy také označují jako Keesomovy interakce.

Všechny tři výše uvedené interakce se uplatňují v různé míře, avšak většinou převládají Londonovy disperzní síly nad ostatními, pro nepochární uhlovodíky dokonce dosahují až 100%.

Ve všech případech je ale přitažlivá energie mezi interagujícími molekulami nepřímo úměrná šesté mocnině jejich vzdálenosti. Van der Waalsova vazba je sice poměrně dosti slabá, ale má svůj velký význam, neboť se vyskytuje u všech látek (u většiny je však překryta některou ze silnějších vazeb), např. mezi řetězci polymeru. V její čisté podobě se s ní můžeme setkat u inertních plynů v kapalném a pevném stavu.

Závěrem ještě shrneme v Tab. 1.3 energii jednotlivých typů vazeb, která je objektivním ukazatelem pevnosti dané vazby a rozhoduje o reaktivnosti, chemickém a fyzikálním chování dané látky.

Tab. 1.3 *Energie různých vazeb.*

Typ vazby	Energie vazby (kJ/mol)
Kovalentní, iontová, kovová	40 - 600
Vodíkový můstek	20 - 40
Mezimolekulární interakce	4 - 25

1.3 Rozdělení a vlastnosti čistých látek

Jak jsme zmiňovali dříve, struktura a uspořádání chemických vazeb má přímý vliv na vlastnosti pevných látek. Uvedené typy vazeb mezi atomy či molekulami pevných látek jsou mezními případy vazeb skutečných, protože existuje celá řada přechodných vazeb. Z tohoto hlediska můžeme čisté chemické látky rozdělit do čtyř základních tříd na látky nízkomolekulární, iontové (soli), kovové a vysokomolekulární.

Nízkomolekulární látky mají atomy poutané kovalentními polárními nebo nepolárními vazbami, tvoří molekuly o konstantním počtu atomů a mezi molekulami působí slabě přitažlivé van der Waalsovy síly. Tyto látky mají nízký bod tání a varu, snadno těkají a za vyšší teploty se rozkládají. Nevedou elektrický proud a rozpouští se v nepolárních rozpouštědlech. Jako příklad si uvedeme molekuly halogenů, síru, kyslík a většinu organických látek.

Dalším typem čisté chemické látky jsou **soli**. U nich rozeznáváme pravidelnou krystalovou strukturu, tzv. **krystalovou mřížku**. Atomy jsou v iontech poutány kovalentními nebo iontovými vazbami. Tyto látky odolávají relativně vysokým teplotám, v pevném stavu nevedou teplo ani elektrický proud, v tavenině nebo v roztoku jsou elektrolytickými vodiči, ve

vodě jsou dobře rozpustné. Příkladem typické soli je chlorid sodný, uhličitan vápenatý, síran sodný a další.

Mezi **kovové látky** řadíme takové molekuly, které mají atomy vázané velmi pevnou kovovou vazbou, tvoří krystalovou mřížku a mají specifické vlastnosti. Ty jsou dány existencí tzv. elektronového plynu, který je delokalizovaný mezi atomy pevně poutanými v mřížce. Z tohoto důvodu kovy dobře vedou teplo a elektrický proud, jsou tvárné, kujné, tažné a velmi pevné, dále jsou neprůhledné a mají typický kovový lesk. Příkladem je hořčík, hliník, železo, chrom, nikl atd.

Pokud vazby spojují soubory atomů a tvoří tzv. **makromolekuly** o vysoké hmotnosti, hovoříme o **vysokomolekulárních látkách**, nebo též **polymerech**. Ve struktuře se opakuje vždy určitý motiv, tzv. **monomer**, který má schopnost se řetězit. Vznikají tak lineárně, rovinně nebo prostorově uspořádané struktury. Lineární řetězce jsou mezi sebou vázány van der Waalsovými silami, látky jsou beztvaré vláknitého charakteru. Jsou dále měkké, rozpustné nebo bobtnají, např. plastická síra, organické polymery. Rovinné makromolekuly mají atomové vazby rozvinuté dvojrozměrně, mezi paralelními makromolekulami působí van der Waalsovy síly, které jsou snadno narušitelné. Tyto krystaly mají charakteristický šupinkovitý vzhled, jsou měkké a štěpné, mají vysoký bod varu a tání, některé snadno sublimují. Jedná se například o grafit a kyselinu boritou. Prostorové polymery tvoří trojrozměrnou makromolekulu, atomový krystal. Z tohoto důvodu jsou velice tvrdé, mají vysoký bod tání a bod varu nelze stanovit, nevedou elektrický proud a jsou nerozpustné. Typickým příkladem je diamant, korund, křemen a karbid křemičitý.

2 SKUPENSKÉ STAVY LÁTEK

2.1 PLYNNÉ SKUPENSTVÍ

2.2 KAPALNÉ SKUPENSTVÍ

2.3 PEVNÉ SKUPENSTVÍ

Podle soudržných sil působících mezi základními částicemi (atomy, ionty, molekulami) určujeme skupenství látky. Rozlišujeme dva krajní stavy, jeden se vyznačuje úplnou nezávislostí částic a tím i neuspořádaností – **stav ideálního plynu**, druhý uspořádáním částic do pravidelných a zákonitě uspořádaných tvarů – **stav ideálního krystalu**. Mezi těmito ideálními stavy leží reálné látky, které se vyskytují v **plynném**, **kapalném** nebo **tuhém (pevném) stavu**. Změny skupenství vyplývají pak z velikosti a typu soudržných sil mezi jednotlivými částicemi hmoty.

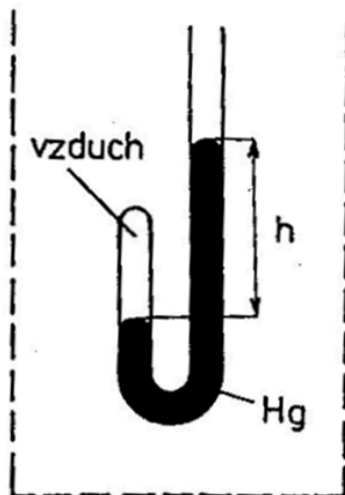
2.1 Plynné skupenství

Soubory atomů či molekul s minimální soudržností mají za normálních podmínek (tlak, teplota) podobu plynů. Většinou se jedná o malé molekuly, např. dvouatomové molekuly kyslíku, dusíku, vodíku a vzácných plynů, mezi nimiž působí nepatrné soudržné síly. Kinetická energie jednotlivých částic je mnohem větší než jejich potenciální energie, tedy energie odpovídající vzájemným přitažlivým silám, a z tohoto důvodu se částice po vzájemné srážce velice rychle a snadno vymaní z dosahu přitažlivých sil a v daném objemu se pohybují téměř volně. Charakteristickou vlastností plynů je jejich dokonalá schopnost zaujímat tvar nádoby, ve které jsou uzavřeny. Určité množství plynu vždy vyplní beze zbytku prostor, který je mu určen tvarem nádoby. Kdybychom plyn neomezovali stěnami nádoby, okamžitě by se rozptýlil do prostoru. Molekuly plynu se neustále velice rychle pohybují a plyn se roztahuje až do okamžiku, kdy narazí na stěny nádoby. Projevem tohoto jevu je tlak plynu, který můžeme změřit jako sílu působící kolmo na plošnou jednotku povrchu nádoby. Energie molekul plynu se navenek projeví jako teplota plynu.

Pro vyjádření chování plynu byla odvozena celá řada závislostí mezi veličinami, které popisují plynný stav, tlak (p), objem (V), absolutní teplota (T) a hmotnost (m). Boyle proměřoval pomocí jednoduchého experimentu stlačitelnost plynů při pokojových teplotách,

viz Obr. 2.1, a došel k závěru, že pro konstantní množství plynu a konstantní teplotu měření platí:

$$pV = \text{konst. } [n, T].$$



Obr. 2.1 Boyleova měření stlačitelnosti vzduchu.

Gay-Lussac proměřoval závislost objemu určitého množství plynu na teplotě za konstantního tlaku. Z jeho pokusů vyplynulo, že objem je za konstantního tlaku lineární funkcí teploty:

$$V = V_0(1 + \alpha t) [n, p],$$

kde t ($^{\circ}\text{C}$) je teplota a V_0 je objem plynu při 0°C . Zjistil dále, že číselná hodnota koeficientu α je nezávislá na tlaku a pro různé plyny je v mezích experimentálních chyb stejná

$$\alpha = 0,0036609 = 1/273,15 = 1/T_0.$$

Odtud byla zavedena nová teplotní stupnice s absolutní teplotou T (K), přičemž teplotní rozdíl 1K je zcela shodný s 1°C .

Shrnutí výše uvedených poznatků provedl poprvé Clapeyron roku 1845 a formuloval **stavovou rovnici ideálního plynu**:

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad \text{nebo-li} \quad pV = nRT,$$

kde M (g/mol) je molární hmotnost, R je univerzální plynová konstanta ($R=8,314$ J/K mol) a n je látkové množství (mol). Na základě rozsáhlých měření bylo zjištěno, že 1 mol plynu zaujímá za teploty 0°C a tlaku 101.325 kPa objem 22.4140 dm³/mol.

Pro běžnou praxi stavová rovnice ideálního plynu vyhovuje, zvláště v oblasti nízkých tlaků, ale u většiny plynů působí slabé soudržné síly, a proto chování reálných plynů lépe vystihuje např. **van der Waalsova rovnice**:

$$\left(p + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT,$$

kde a ((Pa m³)²/mol²), b (m³/mol) jsou van der Waalsovy konstanty.

V případě, že nepopisujeme čisté látky, ale směsi, musíme rozšířit stavové rovnice o další veličiny. Platí tzv. **Daltonův zákon**, který definuje parciální tlak p_i čisté složky i při stejné látkové hustotě $n_i/V = 1/V_{m,i}$ a stejné teplotě T jako ve směsi:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_k,$$

$$p_i = px_i \text{ (ideální plyn)}.$$

Tento tlak můžeme změřit, odečíst z tabulky nebo vypočítat ze stavové rovnice.

Podle **Amagatova zákona** je objem směsi V určen součtem objemů V_i čistých složek směsi při dané teplotě a tlaku:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_k.$$

Amagatův zákon má zvláštní význam, protože směs, která se jím řídí v širokém rozsahu teplot, tlaků a koncentrací, je definována jako **ideální směs**. U takovéto směsi pak můžeme určovat její vlastnosti na základě vlastností čistých látek za dané teploty a tlaku.

Avšak ani van der Waalsova rovnice a celá řada empiricky odvozených rovnic nevystihují hlavní odchylku skutečných a ideálního plynu, a totiž přeměnu skutečných plynů při dostatečně nízké teplotě a vysokém tlaku na kapaliny, **kondenzace**, nebo pevné látky, **tuhnutí**. Tato změna skupenství nastane tehdy, když pohyb molekul vlivem teploty a tlaku nestačí přemoci přitažlivé mezimolekulární síly a molekuly se dostávají do takové blízkosti, jak jim jejich objem dovoluje. Jejich pohybová energie se ovšem neztrácí, molekuly se v kapalině dále mohou pohybovat, avšak uvolňuje se značné množství potenciální energie,

neboť se uplatní mezimolekulární přitažlivé síly. Navenek se přeměna plynného skupenství v kapalném projeví vývinem tzv. **skupenského tepla**.

Závěrem můžeme shrnout základní charakteristiky plynného skupenství. Plyny jsou látky s nejmenším zastoupením hmotnosti v objemové jednotce a za normálního atmosférického tlaku je jejich hustota tisíckrát nižší než hustota kapalin nebo pevných látek. Na rozdíl od kapalin netvoří volný povrch (hladinu) a jsou stlačitelné. Plyny vedou elektrický proud jen za určitých speciálních podmínek, teplo se v nich šíří prouděním, koeficient tepelné roztažnosti ideálního plynu je cca 0.0036 K^{-1} .

2.2 Kapalně skupenství

Kapalně skupenství se vyznačuje tím, že jednotlivé molekuly jsou oproti plynům značně stěsnány (vnitřní tlak kapaliny má např. u vody hodnotu asi 1200 MPa), avšak je zachována jejich pohyblivost a mohou se tudíž vzájemně posouvat. Mezi molekulami působí přitažlivé síly, které podle druhu kapaliny nabývají různého charakteru, mohou být spíše povahy elektrostatické (solné taveniny, NaCl), kovové (kovové taveniny, Cu), disperzní (nepolární kapalina, benzín) či dipólové s vodíkovými můstky (polární kapaliny, voda). Čím jsou tyto soudržné síly menší a čím je pohyb s růstem teploty větší, tím snazší je i pohyb a přesun molekul a látka je kapalnější. Kinetická energie částic kapaliny je malá ve srovnání s vazebnou potenciální energií, takže částice se vzájemně udržují v určitých rovnovážných polohách, kolem kterých vykonávají kmitavý pohyb. Tyto rovnovážné polohy se u kapalin mohou přemísťovat, tudíž dochází k přemísťování částic v celém objemu látky a kapalina teče. Protože mezi jednotlivými molekulami kapaliny existuje vazba, za běžných podmínek se objem kapalných látek nemění.

Hustota kapalin je asi 1000krát vyšší než hustota plynů, avšak neliší se příliš od hustoty pevných látek. Z tohoto důvodu se také velice liší objem, který látka zaujímá v plynném a kapalném stavu. Hustota kapalin se zmenšuje se vzrůstající teplotou, neboť se zvětšují mezimolekulární vzdálenosti. U četných látek můžeme tuto závislost vyjádřit **Mendělejevovým vztahem**:

$$\rho_t = \rho_0(1 - \alpha t),$$

kde ρ_0 udává hustotu při 0°C a α koeficient teplotní roztažnosti kapalin. Platnost tohoto vzorce je však omezena teplotním rozsahem, proto lépe vyhovuje **empirický vzorec** se dvěma až třemi látkovými konstantami a , b , c :

$$\rho_t = \rho_0(1 - at - bt^2 - ct^3).$$

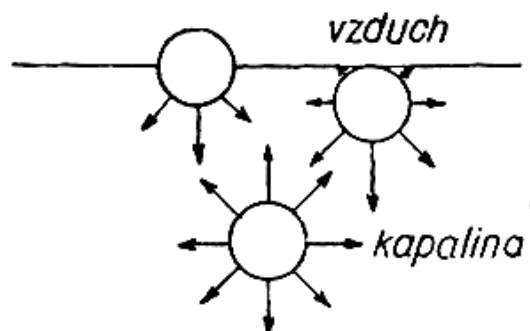
Pozn.: Chování vody se značně odchyľuje, protože nejvyšší hustotu má při $3.9 \sim 4^{\circ}\text{C}$.

Závislost hustoty kapalin na teplotě je dnes poměrně dobře proměřena a je uvedena v tabulkách.

Vlivem působící gravitace se na rozhraní kapalina-plyn tvoří **hladina**, která tvoří důležitou oblast, kde se odehrává řada povrchových dějů, např. vypařování. Kapalina se vypařuje za každé teploty a v plynném prostoru nad ní jsou vždy obsaženy její molekuly. **Vypařování** nastává, pokud kinetická energie molekul kapaliny dosáhne určité velikosti a molekuly se začnou odpoutávat od jejího povrchu. V otevřené nádobě pokračuje toto vypařování až do úplného převedení kapalné fáze v plynnou. Rychlost vypařování závisí na druhu kapaliny, velikosti mezimolekulárních sil, velikosti povrchu kapaliny a na teplotě. Jestliže necháme kapalinu vypařovat v uzavřené nádobě, nemohou se vypařené molekuly volně rozletět do prostoru, naráží na sebe, na stěny nádoby i na hladinu kapaliny. Na hladině se uplatňují přitažlivé povrchové síly a část molekul se tak v kapalině zachytí, **zkondenzuje**. Vypařování a kondenzace jsou tedy dva protichůdné děje. Čím více se molekul odpařuje, tím více molekul musí zkondenzovat, mezi oběma ději se ustavuje dynamická rovnováha a hovoříme o **nasycení páry** nad kapalinou a její tlak se označuje jako **tlak nasycené páry**. Dosáhne-li tlak par kapaliny tlaku nad kapalinou, změní se vypařování na povrchu ve vypařování v celém objemu kapaliny a kapalina začne **vřít**. Každému vnějšímu tlaku odpovídá vždy jediná teplota varu, zvaná **bod varu**. Proto je bod varu důležitou konstantou pro čistou látku. V tabulkách bývá uveden normální bod varu ($p = 101\,325\text{ Pa}$), s poklesem tlaku se totiž bod varu snižuje, kapalina vře při nižší teplotě, se stoupajícím tlakem naopak vzrůstá. Kromě toho najdeme v tabulkách také křivky nasycených par pro jednotlivé teploty.

Pozn.: Varu při sníženém tlaku se využívá v případech, kdy je látka za vyšších teplot nestálá.

Jednou z charakteristických vlastností kapalin je snaha zmenšit svůj povrch. Proto je v nádobách povrch kapalin vždy rovný a kapky, které nejsou deformované působením vnějších sil, jsou vždy kulovité, protože koule má ze všech těles daného objemu nejmenší povrch. V povrchové vrstvě kapalin se neuplatňuje vliv molekul plynné fáze, ale působí zde přitažlivost molekul kapaliny směrem kolmo od povrchu dovnitř kapaliny, viz Obr. 2.2.



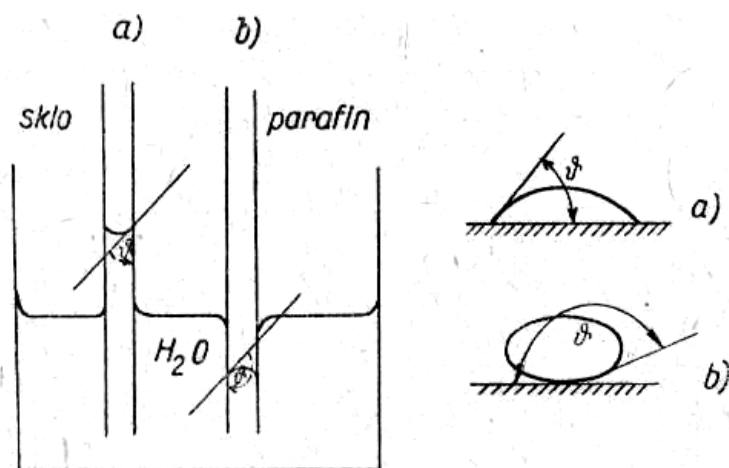
Obr. 2.2 Přitažlivé síly působící na molekulu v kapalině (délka šipek značí poměrnou velikost přitažlivých sil).

Mírou těchto přitažlivých sil je povrchové napětí. Je to tedy síla, která brání zvětšování povrchu kapalin za konstantního objemu. Abychom povrch zvětšili, musíme vynaložit určitou práci, která je úměrná energii, se kterou jsou molekuly povrchu poutány v kapalině, tzv. **povrchová energie**. Povrchové napětí jako látková konstanta závisí na druhu sousedících fází (kapalina – plyn, kapalina – pevná látka) a klesá se vzrůstající teplotou. Některé látky se chovají odlišně, jako např. voda.

Povrchové napětí kapaliny se také velice liší podle povahy sousedící látky, což souvisí s druhem mezimolekulární přitažlivosti mezi oběma fázemi. Hladina kapaliny obecně proto nesevřá s další fází pravý úhel, ale velikost tohoto úhlu závisí na poměru mezipovrchových napětí soustavy plyn (vzduch) – kapalina – pevná látka. Pokud jsou molekuly přitahovány více k pevné látce, úhel je menší než 90° , kapalina **smáčí** tuhou látku (voda – sklo), pokud jsou molekuly přitahovány více ke vzduchu, úhel je větší než 90° a kapalina povrch **nesmáčí** (voda – parafín). Přitažlivost mezi kapalinou a tuhou látkou se nazývá **adhese** a přitažlivost mezi molekulami kapaliny **koheze**. Kapalina smáčí tuhou látku tehdy, převažují-li adhezní síly nad kohezními. S tímto chováním kapalin souvisí také jev označovaný jako **kapilární elevace** (kapalina smáčí stěny nádoby), nebo **deprese** (kapalina nesevřá stěny nádoby). Ponoříme-li skleněnou kapiláru o poloměru r do kapaliny smáčející stěny, vystoupí kapalina do takové výšky h v kapiláře, až se vyrovná vliv gravitace g se silovými účinky povrchového napětí γ .

$$2\pi r \gamma = \pi r^2 h \rho \quad \text{nebo-li} \quad \gamma = \frac{1}{2} g r h \rho.$$

kde ρ je hustota kapaliny, viz Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Smáčení povrchů a) povrch smáčený a kapilární elevace, b) povrch nesmáčený a kapilární deprese.

Koeficient tepelné roztažnosti je řádově stejný jako u plynů, ale asi 100krát větší než u pevných látek. Stlačitelnost kapalin je mnohem menší než u plynů a je blízká stlačitelnosti pevných látek. Koeficient stlačitelnosti kapalin se pohybuje řádově v hodnotách 10^{-1} až 10 Pa, pro pevné látky se tato hodnota pohybuje v rozpětí 10^{-2} až 10^{-1} Pa.

Stejně jako u plynů i u kapalin je definována **ideální kapalina**, která je naprosto nestlačitelná a nemá žádné vnitřní tření. U reálné kapaliny však ke tření dochází, hovoříme o **viskozitě kapalin**. Hodnota viskozity dosahuje mnohem vyšších hodnot než u plynů a její závislost na teplotě je opačná než u plynů (se stoupající teplotou se viskozita kapalin zmenšuje). Odvození základních vzorců pro určení viskozity a způsoby jejího stanovení budou podrobně popsány ve cvičení.

Kapaliny se často rozdělují na polární a nepolární. První mají velký dipólový moment molekul nebo vodíkové můstky. Oba typy kapalin se od sebe svým chováním značně liší a především se neochotně spolu mísí (olej a voda).

Díky volnějším vazebným silám mezi molekulami probíhá v kapalném prostředí většina chemických reakcí. Bez kapalného prostředí by nebylo možné vyrábět plasty a stavební látky na bázi anorganických pojiv. Na rozhraní kapaliny a pevné látky se uskutečňují i všechny vytvrzovací reakce, na jejichž existenci je založeno použití stavebních pojiv, ale také většina korozních pochodů, karbonatace a sulfatace betonu, karbonatace vápenných omítek, vyluhování pojiva a tvorba výkvětů.

2.2.1 Disperzní soustavy

Stavební látky se vyrábí a zpracovávají převážně v tzv. **dispergovaném stavu** a vytvářejí určitou **disperzní soustavu**, čímž rozumíme jakékoliv rozptýlení jedné látky ve druhé. V těchto soustavách můžeme rozlišit nespojitou **disperzní fázi (dispersum)**, neboli dispergovaný podíl (látku), a spojitě **disperzní prostředí (dispersens)**. Disperzní soustavy jsou tedy všechny systémy, které se skládají alespoň ze dvou druhů částic nebo ze dvou fází. Disperzní soustavy můžeme dělit jednak podle počtu fází, dále podle velikosti a tvaru částic, ale také podle skupenství disperzního prostředí a podílu. Právě disperzní soustavy se vyznačují diskontinuitami ve složení a specifickými vlastnostmi, kterými se liší jak od roztoků, tak od kompaktních látek.

Podle počtu fází dělíme disperzní systémy na **homogenní**, kde oba systémy tvoří jednu fázi, a na systémy **heterogenní**, ve kterých jsou jednotlivé fáze zřetelně odděleny tzv. **fázovým rozhraním**. Homogenní disperzní systémy se tvoří samovolně a vyznačují se značnou stálostí. Jako příklad si uvedeme **pravý roztok** (např. iontová disperze - sůl ve vodě) a **lyofilní koloidní roztok** (roztoky vysokomolekulárních sloučenin). Pravý roztok tvoří zcela homogenní soustavu, v níž je nemožné opticky rozeznat jednotlivé fáze, tudíž neexistuje fázové rozhraní. Jaké množství látky se při dané teplotě rozpustí v daném objemu rozpouštědla udává **rozpustnost** příslušné látky, jejíž hodnotu najdeme v analytických tabulkách, např. při 20°C se ve 100 ml vody rozpustí 36.0 g NaCl. Heterogenní disperzní soustavy nevznikají samovolně, ale k jejich vzniku je třeba dodat systému energii. Z tohoto důvodu jsou nestálé a samovolně zanikají, příkladem jsou všechny **hrubé disperze** (dým, záměsi stavebních pojiv ve vodě) a **lyofobní koloidy** (roztoky polymerních látek, pěny).

Velikost částic dispergovaných v disperzním prostředí rozhoduje o vlastnostech celého systému. Mezi tyto vlastnosti patří zejména **optické**, zda jsou viditelné v optickém nebo elektronovém mikroskopu, a **kinetické**, zda difundují, vykovávají tepelný pohyb a osmotický tlak, či zda sedimentují. Hrubé disperze obsahují částice o velikosti 1 až 50 μm (mlha, emulze), koloidní disperze se vyznačují částicemi o rozměrech 1 – 5 nm až 1 μm a analytické disperze obsahují částice menší než 1 nm (pravé roztoky, roztoky nízkomolekulárních látek).

Dále můžeme klasifikovat disperzní soustavy podle tvaru částic na systémy **globulárně disperzní** (isometrické částice), **laminárně disperzní** (jeden rozměr částice je řádově menší) a **fibrilárně disperzní** (jeden rozměr částice je řádově větší).

V Tab. 2.1 je přehledně shrnuto rozdělení disperzí a uvedeny typické příklady jednotlivých typů disperzních soustav.

Tab. 2.1 *Disperzní systémy.*

Disperzní prostředí	Disperzní podíl	Disperze		
		Analytická	Koloidní	Hrubá
Plynné	Plynný	Směs plynů	-	-
	Kapalný	Páry kapaliny ve vzduchu	Aerosoly	Děšť, mlha
	Pevný	Páry pevné látky ve vzduchu	Aerosoly	Prach, dým
Kapalné	Plynný	Roztoky plynů v kapalinách	Pěny	Bubliny, pěny
	Kapalný	Roztoky, směsi kapalin	Lyosoly (želatina)	Emulze (olej a voda)
	Pevný	Roztoky pevných látek	Lyosoly (asfalt)	Suspenze (křída a voda)
Pevné	Plynný	Pohlčené plyny	Pevné pěny (umělé houbovité polymerní materiály)	Pevné pěny (pěnová skla a beton, pemza)
	Kapalný	Krystalizační voda	Pevné pěny	Pevné pěny, minerály s uzavřenými kapkami
	Pevný	Pevné roztoky (směsné krystaly)	Pevné soly	Pevné směsi (slitiny)

S existencí disperzních soustav je spojena řada tzv. **kapilárních jevů**, např. povrchové napětí, adsorpce a elektrokinetické jevy, které budou předmětem další části skript.

Pozn.: Mezi disperzní systémy nepatří jednosložkové jednofázové soustavy (např. čistý plyn, čistá kapalina, čistá pevná látka) a heterogenní jednosložkové systémy, ve kterých každá fáze tvoří kompaktní celek (např. kapalina v nádobě, oddělená makroskopickou hladinou od parní fáze). K disperzním systémům patří směs plynů, pravé kapalné a pevné roztoky. Zvláštním případem koloidně disperzní soustavy jsou gely, které tvoří spojitě jak disperzní prostředí, tak disperzní podíl, např. želatina.

Přechod z kapalného nebo kvazikapalného skupenství (pryskyřice, asfalt) na pevné (přes monokrystaly) do souborů prostorových molekulárních mříží, kterými jsou tvořeny látky

pevného skupenství, je pochodem, při kterém vzniká většina materiálů používaných v současné stavební praxi. Zdálo by se tedy, že nashromážděním širokého souboru vstupních dat o soudržných (kohezních) silách, kterými jsou k sobě poutány již zmíněné částice hmoty a s využitím počítačového modelování by bylo možné na teoretické bázi přímo navrhovat materiály optimálního složení i vlastností s ohledem na požadovanou funkci. Bohužel, v současnosti máme k dispozici nedostatečné množství vstupních dat o soudržnosti mezi částicemi hmoty a číselné vyjádření pevnosti vazby je známo jen pro několik jednoduchých vazeb, navíc získání těchto dat je velice obtížné.

2.3 Pevné skupenství

Základní stavební jednotky všech pevných látek jsou mezi sebou v určitém vazebném kontaktu a jsou vázány ve svých „pevných“ **rovnovážných polohách**, kolem kterých kmitají. Kinetická energie neuspořádaného pohybu částic (molekul nebo atomů) je menší než potenciální energie odpovídající molekulovým přitažlivým silám, které udržují částice v rovnovážných polohách. Na rozdíl od kapalin se tyto polohy nemění a nepřemísťují, pevné látky si tudíž zachovávají jak svůj objem, tak i tvar. Působením vnějších sil mohou pevné látky měnit svůj vnější tvar, a to buď dočasně (deformace pomíjí, jakmile přestane působit síla), látky **pružné** nebo-li **elastické**, nebo deformace zůstává trvale, pak mluvíme o látkách **plastických**.

Jak jsme již zmiňovali, většina pevných látek vzniká zpevněním a ztuhnutím roztoku, (disperzní soustavy). Vzniká pevná fáze, která se vyznačuje nejorganizovanějším stavem hmoty, svojí **mikrostrukturou**. Mikrostruktura představuje uspořádání heterogenních látek, ze zrn stejného nebo různého složení, může obsahovat i póry. Toto uspořádání je dáno velikostí, tvarem, množstvím, orientací a vzájemným rozložením zrn a pórů. Stupeň uspořádání je různý, od úplné nahodilosti až po určitou uspořádanost, pak hovoříme o **mikrotextuře**. Například mikrostruktura zatvrdlého cementového slínku je dána zrny hydratačních produktů maltovin spojených v souvislou tuhou fázi a póry. Mikrostruktura heterogenních látek zcela překrývá vlastní vnitřní strukturu přítomných fází, udává poměr pevné fáze a pórů a tudíž ovlivňuje všechny technické vlastnosti, zejména mechanické, které jsou u stavebních látek v podstatě rozhodující.

V případě čistých (homogenních) látek rozlišujeme uspořádání nepravidelné, **amorfní**, a pravidelné, **kryсталické**. U homogenních pevných látek můžeme určit jejich **složení** (atomy,

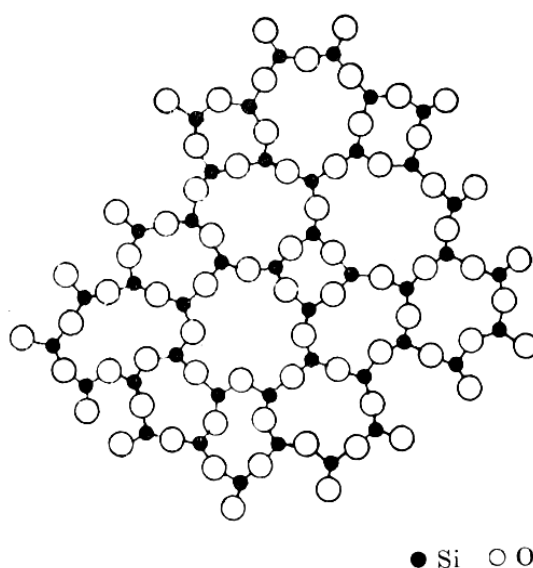
ionty, molekuly) a **strukturu**. Amorfnní látky jsou obecně **izotropní**, což znamená, že jejich vlastnosti jsou ve všech směrech stejné. U krystalických látek vzniká závislost vlastností a specifických veličin na směru působení, tyto látky se proto označují jako **anizotropní**. Zvláštním případem jsou látky **ortotropní**, u kterých lze stanovit vzájemný úhel mezi směry, ve kterých látka nabývá minimální nebo maximální zkoumané vlastnosti, např. v případě materiálů s orientovanými vlákny (laminát ze skelné tkaniny, dřevo, minerální vlna atd.) je anizotropní úhel pravý (po vláknech – kolmo na vlákna).

Vzniklé krystalické látky můžeme rozdělit také podle chemického složení. **Monokrystaly** vznikají vysrážením z chemicky čistých roztoků a jsou tudíž tvořeny jedním druhem molekul. Jejich vnitřní struktura je pravidelně uspořádána z molekul daného chemického složení, což se navenek projeví typickým tvarem krystalu příslušné krystalografické soustavy. Toto uspořádání se opakuje na dlouhé vzdálenosti, nazývá se proto **dalekodosahové**. V přírodě tvoří monokrystal například sůl kamenná NaCl, křemen SiO₂, diamant a další. Dále mohou vznikat krystaly tvořené pravidelným seskupením dvou nebo i více molekulových druhů v přesném a jednoduchém poměru, tzv. **polykrystaly**. Polykrystaly se skládají z velikého počtu drobných krystalků, **zrn**, přičemž uvnitř zrn je uspořádání pravidelné, avšak vzájemná poloha zrn je nahodilá. V tomto seskupení se vyskytuje většina krystalických látek, např. kovy. Dále při krystalizaci mohou vznikat **směsné krystaly**, v jejichž krystalové mřížce vystupují jako rovnocenní partneři dvě nebo více různě tvarově podobných částic s obdobnými soudržnými silami. Tyto částice se mohou v mřížce vzájemně zastupovat, tzv. **isomorfní látky**, např. NaCl a MgCl₂.

Při krystalizaci pevných látek z vodných roztoků solí dochází často k tomu, že integrální součástí krystalické mřížky se stává **krystalová voda**. Molekula vody se vyznačuje velkou elektrickou polaritou a poměrně malým objemem. V mnoha **hydrátech** voda jednoduše obklopí kationy a tím rozšíří jejich poloměr. Zvětšením poloměru kationu umožní vytvořit strukturu s větším koordinačním číslem. Voda má v těchto sloučeninách podstatný vliv na strukturu a stabilitu a nemůže být z krystalu odstraněna bez porušení jeho struktury. Říkáme, že hydráty obsahují **koordinačně vázanou vodu**, jako např. CuSO₄·5H₂O a NiSO₄·7H₂O. V mnohých krystalech vázaná voda neporuší elektrostatickou rovnováhu a její odstranění z krystalu nemá proto za následek zhroucení struktury. Většinou se vyskytují oba typy vázané vody současně, např. jílové minerály.

2.3.1 Amorfní pevné látky

Každou čistou kapalnou látku v blízkosti jejího bodu tuhnutí můžeme nazvat **taveninou**. Pokud budeme tuto kapalinu nadále ochlazovat, začne **tuhnout**, tzn. její molekuly se začnou shlukovat do více méně pravidelných prostorových útvarů a při malé viskozitě dokonce do pravidelných krystalů, jak si vysvětlíme dále. Pokud ale s poklesem teploty vzroste viskozita kapaliny natolik, že všechny částice nemohou zaujmout patřičné vzájemné polohy a dosáhnout určité uspořádanosti, nevytvoří se mřížka ale „beztvará“, **amorfní**, struktura, např. u skla. Rentgenografickou analýzou se zjistilo, že amorfní látky mají určitou nepravidelnou strukturu, která se blíží stavbě přechlazených kapalin, viz Obr. 2.4.



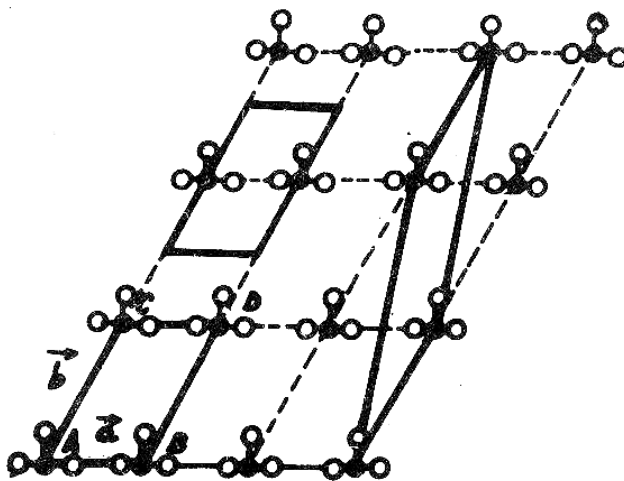
Obr. 2.4 *Struktura amorfních látek, např. sklo.*

Jejich tání probíhá v daném teplotním rozmezí, stejně tak i tuhnutí. V tomto intervalu se prudce změní tvrdost a pevnost látek. Obecně tento stav nazýváme také skelný, přičemž nemáme na mysli jen klasické sklo, ale i další materiály, které se vyznačují podobnými vlastnostmi. Pro amorfní materiály je typické, že jejich volná krystalizace probíhá velice pomalu, ale můžeme ji urychlit např. změnou teploty, vlhkosti, či mechanickými nárazy, pak dojde k tzv. **odskelnění struktury** a materiál ztrácí své vlastnosti optické, mechanické atd. Skelný stav je stav přechodný, **metastabilní**, který samovolně přechází na stabilní krystalický, pevný, stav. Samovolný obrácený pochod není možný.

2.3.2 Krystalová struktura pevných látek

U většiny látek se atomy seskupují do nepřetržitých řad sítí, nebo prostorových mříží. Nemůžeme tedy v pravém slova smyslu používat pojem molekula, ale mluvíme o fiktivním celku, **elementární buňce**, která vystihuje zastoupení jednotlivých atomů tak, aby vyjadřovaly poměr v celé látce. Periodickým opakováním této elementární buňky, tedy určitého motivu, do třech směrů vznikají trojrozměrné útvary atomů, nebo skupin atomů, a vzniká **krystal**. Krystal je tedy pravidelné prostorové uspořádání atomů. Nejjednodušší strukturu mají čisté látky, neboť se skládají z jednoho druhu atomů, nejsložitější jsou pak látky, jejichž základní strukturní motiv je tvořen několika atomy.

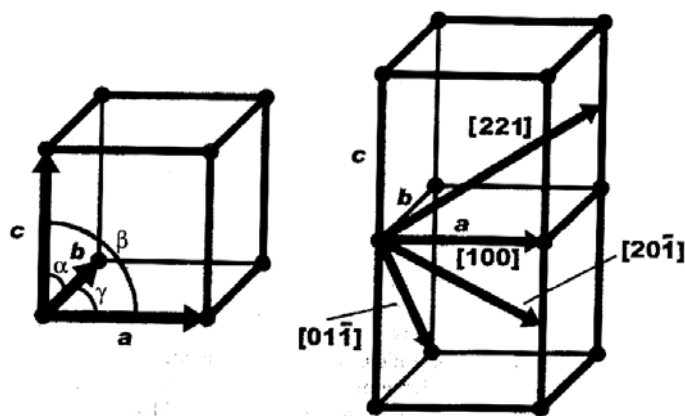
Elementární dvourozměrnou mřížku můžeme volit několika způsoby, maximálně však pěti, vždy se však snažíme vybrat co nejjednodušší a nejvýhodnější tvar, jak ukazuje Obr. 2.5.



Obr. 2.5 Pět typů dvourozměrné elementární mřížky.

Většinou vybíráme rovnoběžnostěn s co nejkratšími hranami. Elementární mřížka je pak zadána dvěma tzv. **translačními vektory** $\vec{a}$, $\vec{b}$ a úhlem mezi nimi. Tato mřížka je ve svých vrcholech, uzlových bodech, obsazena atomy, nebo skupinou atomů. Protože každý vrchol zároveň přísluší čtyřem sousedním elementárním mřížkám, připadá na každou elementární mřížku jeden atom. Periodické přenášení, **translace**, zvoleného motivu vytváří celý krystal libovolných rozměrů. U skutečných látek se primitivní mřížky nevyskytují, ale krystal se skládá z několika vůči sobě posunutých elementárních buněk, které tvoří **prostorovou mřížku**. Prostorová mřížka podle A. Bravais je definována jako „nekonečný počet bodů uložených v prostoru tak, že uspořádání bodů v okolí každého bodu je identické

s uspořádáním v okolí jakéhokoliv jiného bodu“. Prostorovou mřížku můžeme jednoznačně popsat translačními vektory $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$ a úhly α , β , γ , které mezi sebou svírají tak, že vyčerpáme všechny možné posuvy základního motivu ve směru vektorů $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$, Obr. 2.6. V prostoru je možné sestavit čtrnáct prostorových mřížek, které jsou přiřazeny k sedmi krystalovým soustavám. Tyto soustavy byly stanoveny z makroskopické symetrie krystalů.



Obr. 2.6 Základní translační vektory.

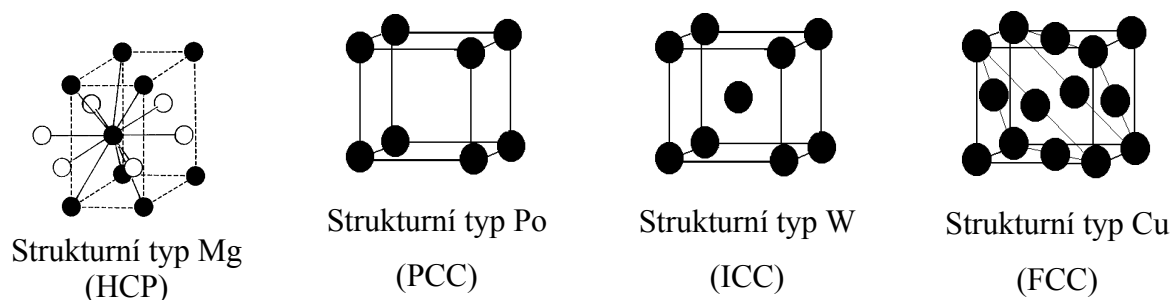
Tab. 2.2 stručně uvádí soustavy, prvky souměrnosti a zástupce příslušných mřížkových typů. Následující obrázky ukazují čtrnáct elementárních Bravaisových buněk s příslušným strukturním typem.

Tab. 2.2 Krystalografické soustavy, strukturní typy a charakteristické znaky mřížkových typů.

Krystalografická soustava	Strukturní typ	Typ mříže	Syngonie	Koordinační číslo	Příklady
Triklinická (trojklonná)		P	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$		vzácně minerály (albit, anorthit, kyanit), syntetické materiály
Monoklinická (jednoklonná)		P C	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$		sádrovec, ortoklas, slídy, chlority
Orthorombická (kosočtverečná)		P I C F	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$		S, $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, Sb_2S_3 , FeS_2 , TiO_2 , BaSO_4 , CaSO_4
Tetragonální (čtverečná)		P I	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$		SnO_2 , rutil TiO_2 , anatas TiO_2 , ZrSiO_4

Romboedrická (trigonální, klencová)	CdCl ₂	P	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$		As, Sb, Bi, Al ₂ O ₃ , siderit FeCO ₃ , Fe ₂ O ₃ , MnCO ₃ , CaCO ₃ , ZnCO ₃ , MgCO ₃
Hexagonální (šesterečná)	Mg	P	$a=b\neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$		Zn, Cd, většina kovů vzácných zemin, tuha, křemen, vápenec, He, H ₂ a N ₂
Kubická (krychlová)	Po W Cu	P I F	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	4 8 12	za vysokých tlaků Sb a P alkalické kovy, Ba, Fe, Cr, Zr, V, Ta, Mo Cu, Ag, Au, Ca, La, Ni, Pb, Al, Pt

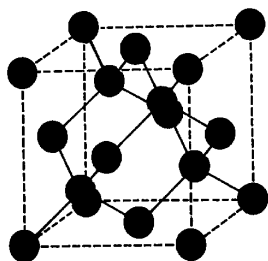
Následující Obr. 2.6 demonstruje vybrané základní strukturní typy uvedené v Tab. 2.2.



Obr. 2.6 Vybrané základní strukturní typy.

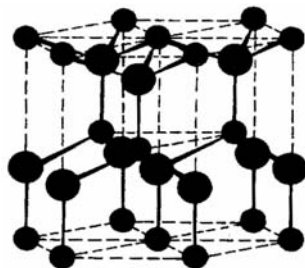
Jak již bylo uvedeno, definujeme elementární buňku, základní rovnoběžnostěn, který se v prostorové mřížce pravidelně opakuje. Protože je možné zvolit takovou buňku několika způsoby, byla definována pravidla pro její výběr. Volíme ji tak, aby měla pokud možno minimální objem, maximální počet pravých úhlů a aby obsahovala minimální počet mřížkových bodů. Právě podle mřížkových bodů rozlišujeme několik typů mříže a to elementární buňky primitivní (P), bazálně centrované (C), prostorově centrované (I) a plošně centrované (F).

Kromě základních strukturních typů, jež uvádí předchozí tabulka a obrázky, existuje řada dalších strukturních typů, podle toho, jaký typ částic tvoří krystalovou mřížku, jaké vazby v mřížce převažují, či zda se struktury vrství jako např. u grafitu a slídy, Obr. 2.7.

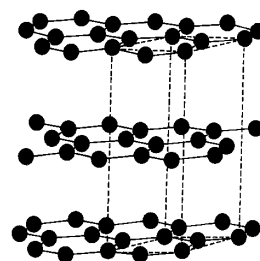


Strukturní typ diamant
(FCC)

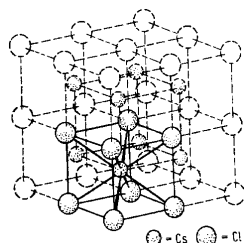
Př.: Si, Ge, šedý Sn



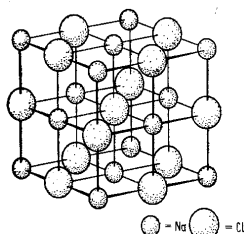
Strukturní typ diamant (FCC)



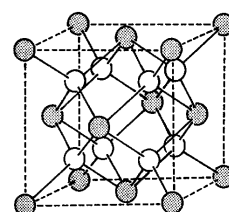
Strukturní typ grafit
Př.: BN



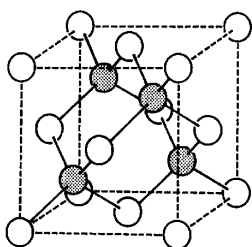
Strukturní typ CsCl (PCC)
Př.: halogenidy



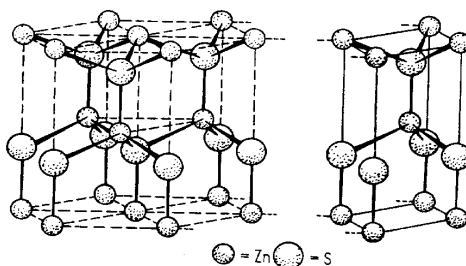
Strukturní typ halit NaCl (FCC)
Př.: halogenidy, hydroxidy a oxidy kovů



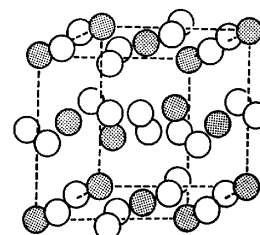
Strukturní typ fluorit
CaF₂ (FCC)
Př.: difluoridy, dioxidy



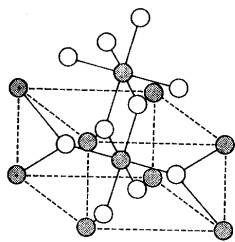
Strukturní typ sfalerit α -
ZnS (FCC)
Př.: oxidy, selenidy a
sírany kovů



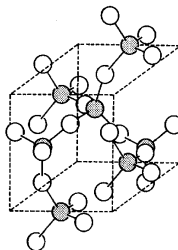
Strukturní typ wurtzit β -ZnS (HCP)
Př.: BeO, ZnO, sulfidy selenidy,
telluridy Zn^{II}, Mn^{II}, Cd^{II}, nitridy Al^{III},
Ta^{III}, Ga^{III}, In^{III} polovodiče



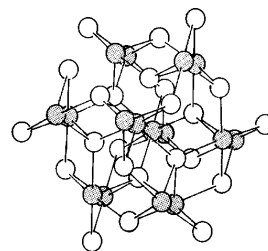
Strukturní typ pyrit FeS₂
(tetraedr)
Př.: dichalkogenidy Co,
Ni, Fe, Mn, Os, Rh a Ru



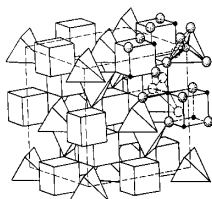
Strukturní typ rutil TiO_2
(oktaedr a rovnostr.
trojúh.)



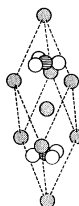
Strukturní typ křemen SiO_2
(tetraedry)



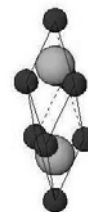
Strukturní typ korund
 Al_2O_3 (HCP)
Př.: Ti_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3



Strukturní typ spinel
 MgAl_2O_4 (tetraedr MgO_4 ,
oktaedr AlO_6)



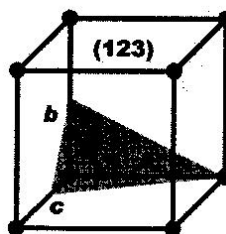
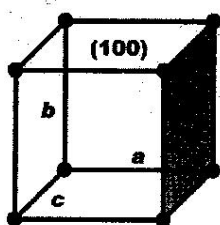
Strukturní typ kalcit CaCO_3 (FCC)



Strukturní typ CdCl_2
(klencová)

Obr. 2.7 Vybrané strukturní typy.

Kromě základních translačních vektorů $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$, které odpovídají hranám elementární buňky a které svírají úhly α , β , γ , můžeme v mřížce zvolit libovolný **mřížkový směr** pomocí vektoru (u, v, w) . Často je také potřeba označit **mřížkové roviny**, užíváme opět tři indexů (h, k, l) , jež vymezují úsek mezi zvoleným počátkem a průsečíkem mřížkové roviny s příslušným základním translačním vektorem, Obr. 2.8.



Obr. 2.8 Příklady značení mřížkových rovin.

Např.: Rovina (1 0 0) protíná vektor a ve vzdálenosti $1a$ od počátku a s vektory b a c je rovnoběžná (index roven 0). Rovina (1 2 3) protíná vektor a ve vzdálenosti $1a$ od počátku ($h=1$), vektor b v $\frac{1}{2}b$ od počátku ($k=2$) a vektor c v $\frac{1}{3}c$ od počátku ($l=3$).

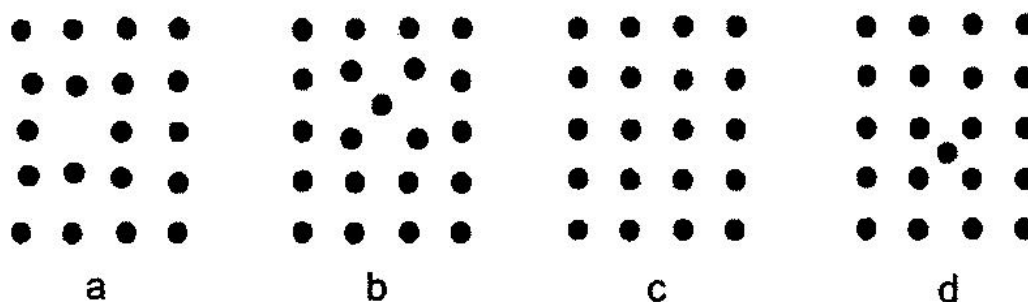
Celou teorii krystalových struktur můžeme výhodně využít při studiu a identifikaci krystalických pevných látek pomocí **difrakční rentgenové strukturní analýzy**. Dopadne-li totiž na atom elektromagnetické záření, dojde k rozkmitání elektronů v atomu a jejich záření o frekvenci shodné s frekvencí dopadajícího záření. Rozptýlené světelné vlnění **interferuje**, skládá se, a odráží se, **difraktuje**, právě v závislosti na uspořádání atomů v krystalické struktuře. Výsledkem je soubor zesíleného a zeslabeného záření, které se pomocí statistiky a výpočtových modelů zpracuje a výsledkem je určení struktury a identifikace krystalické látky. Můžeme také určit velikosti krystalických zrn a jejich orientaci.

2.3.3 Poruchy krystalové struktury

Představy o struktuře krystalů jsou značně idealizované, ve skutečnosti se v krystalové mříži vyskytují nejrůznější typy odchylek od ideálního uspořádání, které nazýváme **poruchy krystalové struktury**. Existence těchto poruch byla prokázána experimentálně, např. měřením elektrické vodivosti, absorpcí záření či optickými metodami. Výskyt poruch v krystalové struktuře pevných látek má rozhodující vliv na technicky důležité vlastnosti, jako jsou mechanické, optické, elektrické a další vlastnosti. Podle prostorového charakteru dělíme poruchy na bodové, čárové, plošné a prostorové.

2.3.3.1 Bodové poruchy

Základními bodovými poruchami, tedy nepravidelnostmi v jednotlivých izolovaných bodech, jsou **vakance**, tzv. **Schottkyho poruchy** (v bodě mřížky chybí atom nebo skupina atomů) a **intersticiál**, Frenkelovy poruchy, atomy přemístěné z normální polohy do intersticiální mezimřížkové polohy, které se vyskytují většinou v mříži s malými kationy a velkými aniony, např. AgBr, NaCl, AgI. U iontových krystalů musí být zachována podmínka elektroneutality tudíž musí být stejný počet defektů v aniontové i kationové mříži a každé vakanci musí odpovídat i intersticiál. Dále se v mřížce mohou vyskytovat cizí atomy buď v normálních polohách, **substituční atomy**, nebo v mezimřížkových polohách, **intersticiál příměsi**, Obr. 2.9.



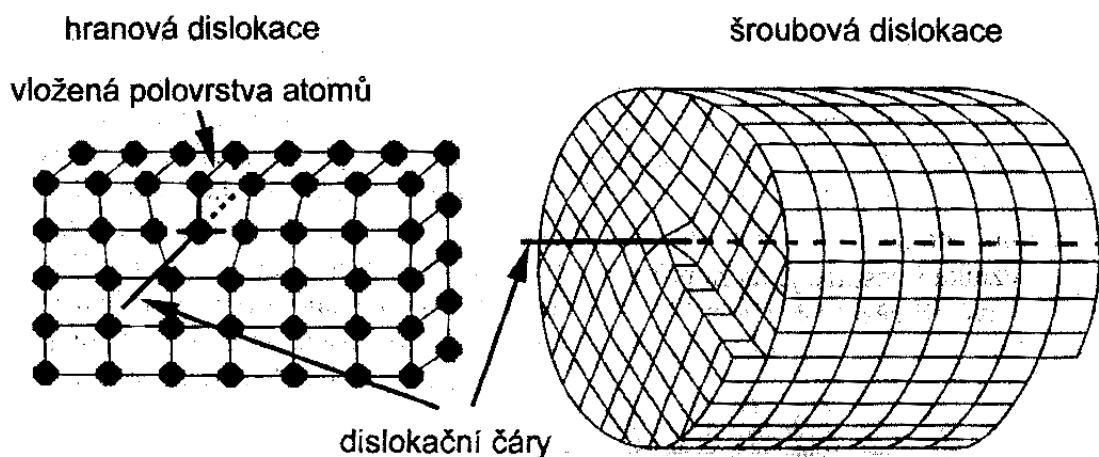
Obr. 2.9 Bodové poruchy krystalové struktury a) vakance, b) intersticiál, c) substituce, d) intersticiál příměsi.

Vakance bývají většinou zapříčiněny únikem atomu z rovnovážné polohy mřížky vlivem zvýšené tepelné vibrace atomu. Intersticiál vzniká vmezeřením atomu do polohy mezi mřížkové atomy. Koncentrace bodových poruch roste se stoupající teplotou, stejně jako v případě vakančních atomů. Tyto poruchy bývají někdy nazývány též rovnovážné poruchy, neboť při každé teplotě se ustaví jejich rovnovážná koncentrace. Vlivem bodových poruch dochází ke vzniku **elastických napětí v mřížce** a k výraznému **ovlivnění difúze v pevném stavu**.

Další bodové poruchy mohou vznikat v důsledku výskytu příměsových atomů v mřížce, jedná se buď o **nahrazení** původního atomu atomem jiným, nebo **vmezeřením jiného atomu** mezi mřížkové body původních atomů. Tyto poruchy jsou běžné v případě slitin kovů, kdy vznikají **intersticiální nebo substituční pevné roztoky** základního kovu a kovu příměsi, Obr. 2.9.

2.3.3.2 Čárové poruchy

Dalším typem poruch jsou poruchy čárové, tedy poruchy vyskytující se v krystalu podél myšlené čáry, tzv. **dislokační čáry**. Nejdůležitějšími čárovými poruchami jsou **dislokace**, které jsou v materiálu přítomny vždy a vznikají již při tuhnutí pevné látky. Rozlišujeme dva typy dislokací, **hranovou** (Tailor – Orowanovu), polovrstva atomů vložená do krystalu, a **šroubovou** (Burgetovu), kterou si představíme jako krystal ve tvaru válce nařiznutý rovnoběžně s osou až k jeho středu a obě části vzájemně posuneme o jednu meziatomovou vzdálenost, Obr. 2.10.

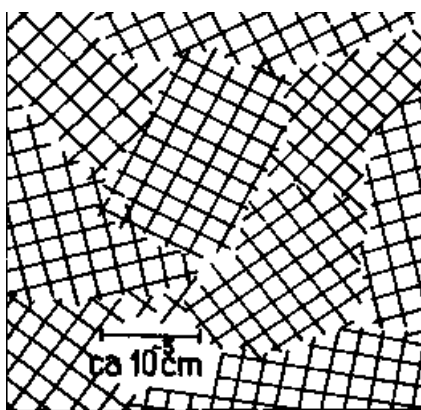


Obr. 2.10 Čárové poruchy.

V reálných krystalech najdeme většinou oba dva druhy dislokací současně. Tento typ poruch je spojen s plastickou (trvalou) deformací, protože dislokace se v krystalové struktuře pohybují za pokojové teploty skluzem, štěpením či dvojčatěním.

2.3.3.3 Plošné poruchy

Mezi plošné poruchy krystalové mříže patří **hranice zrn**, **mezifázové hranice** a **povrch krystalu**. **Hranice zrn** vznikají v důsledku krystalizace pevných látek z roztoků, kdy růst **monokrystalů** o velikosti řádově 10^{-4} až 10^{-6} cm probíhá současně na několika místech v roztoku a to do okamžiku, kdy se zrna spojí, nemohou již dále růst vlivem nedostatku prostoru a vznikne **polykrystal**. Vzniká **mozaiková struktura**, pokud jsou odlišnosti v orientaci zrn nepatrné, úhly řádu 10^{-1} radiánu, nebo struktura podobná struktuře taveniny, v případě větších úhlů mezi zrna, viz Obr. 2.11. Právě na hranicích spojení více zrn se vyskytují zřetelné poruchy viditelné díky různé orientaci zrn. **Hranice zrn** je také místem výskytu největší koncentrace bodových i čárových poruch a tudíž i nejméně odolným místem krystalu. Na tomto rozhraní začíná pevná látka tát, tavit se a zde probíhá nejsnadněji a nejrychleji difúze. Mezifázové hranice se vyskytují u tzv. **polyfázových materiálů** (např. beton). Posledním typem plošné poruchy je povrch krystalu, kde jsou atomy vázány slaběji, než odpovídá jeho vnitřku, tudíž na povrchu probíhá difúze rychleji než uvnitř. Povrch krystalu bývá také velice často znečištěn adsorbovanými molekulami plynů a narušen mechanickým působením. Vlastnosti povrchu materiálu jsou rozhodující pro průběh většiny procesů, o kterých se budeme zmiňovat v dalších kapitolách, např. koroze, únava materiálu, opotřebení i transport tepla, vlhkosti a solí.



Obr. 2.11 Mozaiková struktura reálných krystalů.

2.3.3.4 Prostorové poruchy

Prostorové (objemové) poruchy vznikají převážně ve fázi zpracování materiálu a výroby produktu, jedná se zejména o **dutiny**, **trhliny** či **vměstky cizorodých částic**. Dutiny mohou vznikat uzavřením plynů ve struktuře pevné látky, někdy je tento jev žádoucí (pórobeton) někdy naopak (sklo). Trhliny vznikají v důsledku vnitřního pnutí v materiálu, např. nestejnoměrné ochlazování (keramika, sklo). Nesprávně provedenou výrobní technologií může dojít ke znečištění materiálu cizorodými částicemi – vměstky velikosti nm až cm, které bývají velice často příčinou malé mechanické odolnosti materiálu (nezreagovaný CaO ve vápenné omítce).

2.3.4 Difúzní pochody v pevných látkách

V ideální mřížce jsou všechny mřížkové polohy obsazeny atomy či skupinami atomů. Jejich pohyb kolem rovnovážných poloh je ovlivněn teplotou, a pokud kmitání překročí určitou hranici, atom bude schopen svoji polohu opustit a přemístit se jinam. K tomu je však zapotřebí, aby se současně uvolnila některá ze sousedních poloh. V ideální mřížce toto není možné, takže můžeme difúzi v dokonalé bezporuchové mřížce považovat za vyloučenou. Výše jsme však uvedli, že žádná taková struktura neexistuje, v reálných krystalových látkách existují různé typy poruch ideální krystalové struktury. Obecně difúze v pevné látce závisí na koncentraci poruch v objemu krystalu, na teplotě a složení okolní atmosféry. Kromě difúze uvnitř látky dochází vlivem vysoké koncentrace poruch k difúzi na povrchu zrn a na rozhraní mezi zrnny. Difúze vakancí a intersticiálů se vyskytuje zejména u kovů, kdy můžeme např. ocel za vysokých teplot obohacovat atomy chromu (chromátování), pro zvýšení korozní odolnosti, či fosforečnanů (fosfátování), jako podkladu pro nátěry.

3 FÁZOVÉ SLOŽENÍ

3.1 ZÁKLADNÍ POJMY

3.2 KRITÉRIUM ROVNOVÁHY

3.3 JEDNOSLOŽKOVÉ FÁZOVÉ SYSTÉMY

3.4 DVOUSLOŽKOVÉ FÁZOVÉ SYSTÉMY

3.5 TŘÍSLOŽKOVÉ FÁZOVÉ SYSTÉMY

Všechny látky v přírodě, ať už se vyskytují v jakékoliv formě a podobě, se snaží dosáhnout stavu, kdy jsou v rovnováze a jejich vnitřní energie je co nejnižší. Proto samovolně vznikají například krystalové struktury typické pro dané typy látek, proto se samovolně z roztoků vylučují sraženiny atd. Pokud je nějaká soustava v rovnováze, musíme ji dodat energii, aby mohla svůj stav změnit a dosáhnout rovnováhy v jiné podobě.

3.1 Základní pojmy

Systémem nebo **soustavou** označujeme zvolenou část prostoru, která obsahuje v každém okamžiku definované množství hmoty. Zbývající část prostoru pak nazýváme **okolím systému**. Podle vztahu systému s okolím hovoříme o **izolovaném**, nedochází k výměně energie ani hmoty, např. obsah uzavřené termosky, **uzavřeném**, dochází pouze k výměně energie, např. chladicí médium v lednici, nebo **otevřeném** systému, dochází jak k výměně energie tak hmoty, např. kompresor, parní turbína.

Mezi systémy se energie může vyměňovat pomocí **tepla a práce**. Při teplotní výměně předává systém s vyšší teplotou energii systému s nižší teplotou. Při silovém působení mezi systémem a okolím dochází k předávání energie pomocí práce. Pokud systém koná práci, má energie záporné znaménko a děj označujeme jako **exotermní**, v opačném případě má energie kladnou hodnotu a děj je **endotermní**. Pokud systém nevyměňuje teplo s okolím, označujeme jej jako **adiabatický**.

Zkoumaná oblast systému, ve které jsou jeho vlastnosti konstantní nebo se spojitě mění, označujeme jako **fázi**. Podle vnitřního stavu můžeme rozdělit systémy na **homogenní**, vykazují konstantní vlastnosti v celém svém objemu, a **heterogenní**, složené z více fází. Například směs plynu je vždy homogenní, voda a ethanol tvoří homogenní směs, naproti tomu

voda a olej směs nehomogenní. V pevném stavu tvoří homogenní směs látky výjimečně, např. Ag+Au.

Pozn.: Je třeba rozlišovat pojem fáze, kdy v systému mohou existovat tři kapalně fáze – voda, rtuť, olej, avšak skupenský stav může být plynný, kapalný a pevný.

Při pozorování libovolného systému můžeme určit celou řadu jeho vlastností nebo též **veličin**. Typickými veličinami jsou teplota, tlak, objem atd. Právě tyto veličiny určují a zároveň definují **stav** daného systému. **Stavem rovnováhy** nazýváme stav, při kterém v systému neprobíhají žádné makroskopické změny, nemění se teplota, tlak a složení systému, a všechny veličiny mají časově stálé hodnoty. Dochází-li ke změně alespoň jedné veličiny, vlastnost systému se tedy mění s časem, říkáme, že v systému probíhá určitý **děj**, např. zahřívání, chemická reakce, krystalizace, tuhnutí atd. Průběh každého děje závisí na podmínkách, za kterých se sledovaný systém mění. Rozlišujeme děj **vratný (rovnovážný)**, podmínky umožní systému být téměř v rovnováze a jejich velmi malou změnou dojde k obrácení děje, např. vypařování vody za normálního tlaku při 100°C, a děj **nevratný (nerovnovážný)**, který je sledem nerovnovážných stavů, probíhá samovolně a nezměníme jej malou změnou vnějších podmínek, např. chemické reakce.

Nejvýhodnější je, když během probíhajících procesů v materiálu jedna veličina zůstává konstantní. Tyto děje pojmenováváme s předponou **izo** a označují se symbolem (Y), kde Y je označení příslušné veličiny. Nejčastěji se setkáme s dějem **izotermickým** (T), **izobarickým** (p) a **izochorickým** (V).

Člověku jsou blízké pojmy teplo a práce, které však nejsou stavovými veličinami. Proto volíme veličiny, se kterými můžeme počítat, ale představit si jejich fyzikální smysl je poněkud obtížnější. Například změnu energie systému za konstantní teploty a objemu označujeme jako **Helmholtzovu energii**, např. práce elektrická, práce potřebná k odsolení mořské vody, a změnu energie za konstantní teploty a tlaku jako **energii Gibbsovu**.

3.2 Kritérium rovnováhy

Ke studiu fázových rovnováh se nejlépe hodí **Gibbsova energie** G , protože jejími přirozenými proměnnými jsou teplota a tlak, jež jsou při fázových přechodech konstantní, navíc hodnota této energie v uzavřeném systému za konstantní teploty a tlaku nabývá minimální hodnoty:

$$dG = 0 \quad [T, p].$$

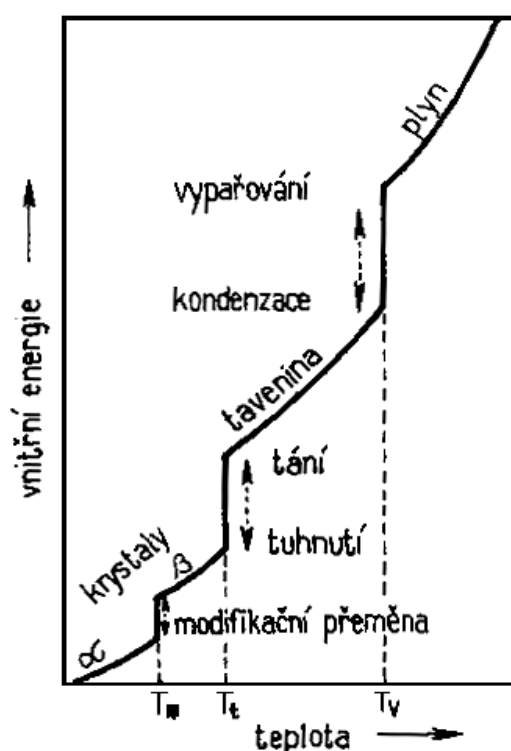
Jakékoliv vychýlení uzavřeného systému z rovnovážného stavu při konstantní teplotě a tlaku má za následek zvýšení hodnoty Gibbsovy energie systému. Pro praktické aplikace bylo odvozeno kritérium, které nazýváme **Gibbsovo fázové pravidlo**. Podle Gibbsova fázového pravidla existuje rovnováha mezi všemi fázemi v systému definovaná jako:

$$f + v = k + 2,$$

kde f je počet fází, v je počet stupňů volnosti a k počet složek.

Pojem počet stupňů volnosti představuje počet veličin, které můžeme volně zvolit tak, aniž by došlo ke změně fáze, tzn. tlak a teplota.

Pozn.: Při přechodu látky z jedné fáze do druhé, např. přeměna kapaliny v plyn, dochází ke změně vnitřní energie systému skokem, Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Změna energetického stavu látky vlivem stoupající teploty za konstantního tlaku. T_m je teplota modifikační změny, T_t je teplota tání a T_v je teplota varu.

Rovnovážné stavové (fázové) diagramy popisují druh, složení a množství fází, které jsou přítomné v systému v závislosti na jeho složení a vnějších podmínkách. Nejčastěji to bývá teplota, protože tlak ve většině případů považujeme za konstantní. Diagramy jednofázových systémů nejčastěji znázorňujeme tak, že na osu x vynášíme teplotu a na osu y tlak, u dvoufázových diagramů to bývá na ose x chemické složení a na ose y teplota. U vícefázových diagramů je grafické znázornění poněkud obtížnější, v závěru kapitoly si ukážeme příklad takovéto závislosti. Jednotlivé čáry v diagramu od sebe oddělují jednotlivé oblasti buď skupenských fází, nebo koncentrační oblasti existence jednotlivých fází.

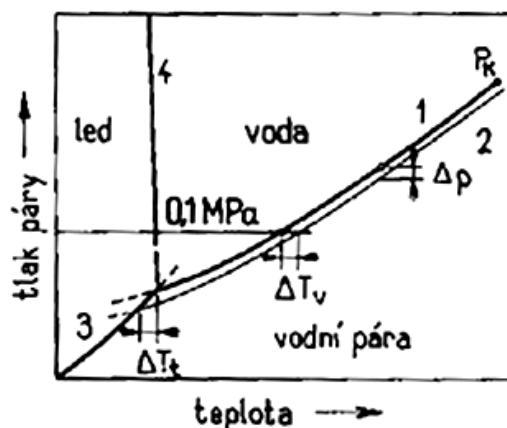
Nejprve si na klasickém fázovém diagramu vody vysvětlíme jednotlivé pojmy, a po té si ukážeme složitější případ vícefázového diagramu. Na základě fázových diagramů můžeme odhadnout, jaké fázové přeměny nastávají v daném materiálu například při ochlazování či zahřívání a jakým způsobem ovlivní celý systém i nepatrná změna v jeho složení.

3.3 Jednosložkové fázové systémy

Rovnováhy tohoto typu se týkají fázových přechodů chemického individua. V jednosložkovém rovnovážném systému mohou z hlediska počtu fází v systému nastat pouze tři případy:

- Systém se skládá z jediné fáze (plynné, kapalně, nebo tuhé), má tedy dva stupně volnosti a můžeme tedy měnit v určitém rozsahu teplotu a tlak nezávisle. Ve fázovém diagramu tvoří tato oblast plochy.
- V systému koexistují fáze dvě (plynná a kapalná, kapalná a tuhá, nebo tuhá a plynná), tudíž má systém jen jeden stupeň volnosti. Ve fázovém diagramu tento stav vyznačujeme křivkou.
- V systému jsou současně v rovnováze tři fáze a soustava nemá žádný stupeň volnosti. Tuto rovnováhu vyznačujeme ve fázovém diagramu bodem a nazýváme jej **trojný bod**.

Nejlépe výše popsanou situaci vystihuje fázový diagram vody, Obr. 3.2. V bodě T (trojný bod) koexistují všechny tři fáze – kapalná voda, led a vodní pára, všechny tři fáze mají stejný tlak par ($T_{tr} = 273.16 \text{ K}$, $p_{tr} = 610.5 \text{ Pa}$). Tento bod má fundamentální význam, protože se používá jako základní bod mezinárodní teplotní stupnice. Jeho teplota se od normální teploty tání vody liší o 0.01 K . V oblasti vyšších tlaků je fázový diagram vody složitější, protože led může existovat ve více **tuhých modifikacích**. Tomuto jevu říkáme **polymorfie**.



Obr. 3.2 Fázový diagram vody. 1 – křivka tlaku páry čisté vody, 2 – křivka tlaku páry roztoku, 3 – křivka tlaku páry nad ledem, 4 – křivka tání ledu v závislosti na tlaku, P_K – kritický bod, Δp – snížení tlaku páry, ΔT_t – snížení bodu tání, ΔT_v – zvýšení bodu varu.

3.3.1 Rovnováha mezi kapalnou a parní fází

Vztah mezi změnou teploty a změnou tlaku za podmínek rovnováhy mezi dvěma fázemi vyjadřuje Clausiova – Clapeyronova rovnice

$$\frac{d \ln p}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2},$$

kde H je entalpie, veličina představující výměnu tepla mezi fázemi při příslušné fázové přeměně, např. vypařování, tání, sublimace a změna krystalické modifikace.

Ze vztahu jasně vidíme, jakým způsobem se mění teplota, při které dochází k fázové změně, v závislosti na tlaku. Při zvýšení tlaku, se teplota, při níž dojde k fázové změně, zvýší pro látky, u kterých se objem při fázové změně zvětšuje. Pokud se objem látky při fázové změně zmenšuje, bude se při zvyšování okolního tlaku teplota fázové změny snižovat. Tato rovnice je obecná a je možno ji aplikovat na jakoukoliv dvojici fází. K řešení je nutné znát teplotní závislost objemu koexistujících fází (stavovou rovnici) a entalpie (tepla) fázové přeměny.

3.4 Dvousložkové fázové systémy

Dvousložkové, neboli **binární** soustavy, označujeme podle složení jako roztoky, slitiny nebo směsi. Látku, která je v nadbytku nebo za normálních podmínek kapalná nazýváme

rozpouštědlem a druhou látku **látkou rozpouštěnou**. Roztokem obecně rozumíme tuhý, kapalný nebo plyný binární systém, který obsahuje nejméně dvě složky.

Rozpouštíme-li látku, rozptylujeme v podstatě její stavební částice, např. molekuly, a smíšením s částicemi druhé látky vzniká **homogenní soustava**. Poměr mezi látkou rozpouštěnou a rozpouštědlem v nasyceném roztoku označujeme jako rozpustnost látky. O tom, jak se látky ochotně budou spolu mísit, nerozhoduje pouze jejich chemické složení, ale především soudržné síly obou látek. Aby mohla vzniknout homogenní směs, musí se obě látky něčím podobat. Tímto společným znakem je jejich polární charakter, např. dokonale se v sobě rozpouštějí uhlovodíky, mísí se voda a polární roztoky.

Ustaví-li se rovnováha mezi množstvím iontů uvolněných z krystalické mřížky rozpouštěné látky a iontů, které se do mřížky navrací, rozpouštění se zastaví a vzniká roztok, který nazýváme **nasyceným**.

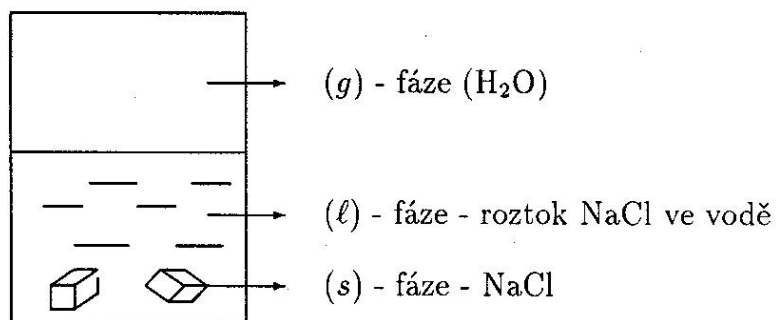
Rozpouštění, ale i další mezifázové pochody, se děje pomocí difúze. Jedná se o pomalý pochod, který závisí na velikosti částic a jejich volné dráze, jež je u kapalin menší než u plynů. Rozpouštění můžeme proto urychlit zvětšením plochy obou fází, např. rozdrčením pevné látky, také mícháním, tedy porušováním právě ustavených rovnováh v roztoku.

Počet složek v roztoku není nijak omezený a fáze mohou být ve všech skupenstvích, např. plyn – plyn (dusík – kyslík), plyn – kapalina (kyslík – voda), plyn – pevná látka (vodík – palladium), kapalina – kapalina (voda – ethanol), kapalina – pevná látka (chlorid sodný – voda), pevná látka – pevná látka (tuhé roztoky, slitiny). Míšení obou fází je spojeno se změnou polohy molekul, tudíž se mění vzájemné silové působení. Z tohoto důvodu dochází k uvolňování tepla, které podle typu míšení nazýváme teplem rozpouštěcím, zřed'ovacím či směšovacím.

Technicky důležitými binárními soustavami, jejichž obě složky mají bod tání nad normální teplotou, jsou kovové slitiny. V podstatě se jedná o kovové tuhé roztoky, směsi krystalů obou složek a jejich vzájemných sloučenin, např. cín a olovo, nikl a zlato atd.

Ustavení rovnováhy pevná látka – plyn se využívá k dosažení nízké nebo přesně definované vlhkosti v uzavřeném prostoru, např. exsikátor. Využíváme k tomu nasycených roztoků

s nadbytečnou tuhou fází, např. $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Obr. 3.3 názorně ukazuje složení homogenního dvousložkového systému.



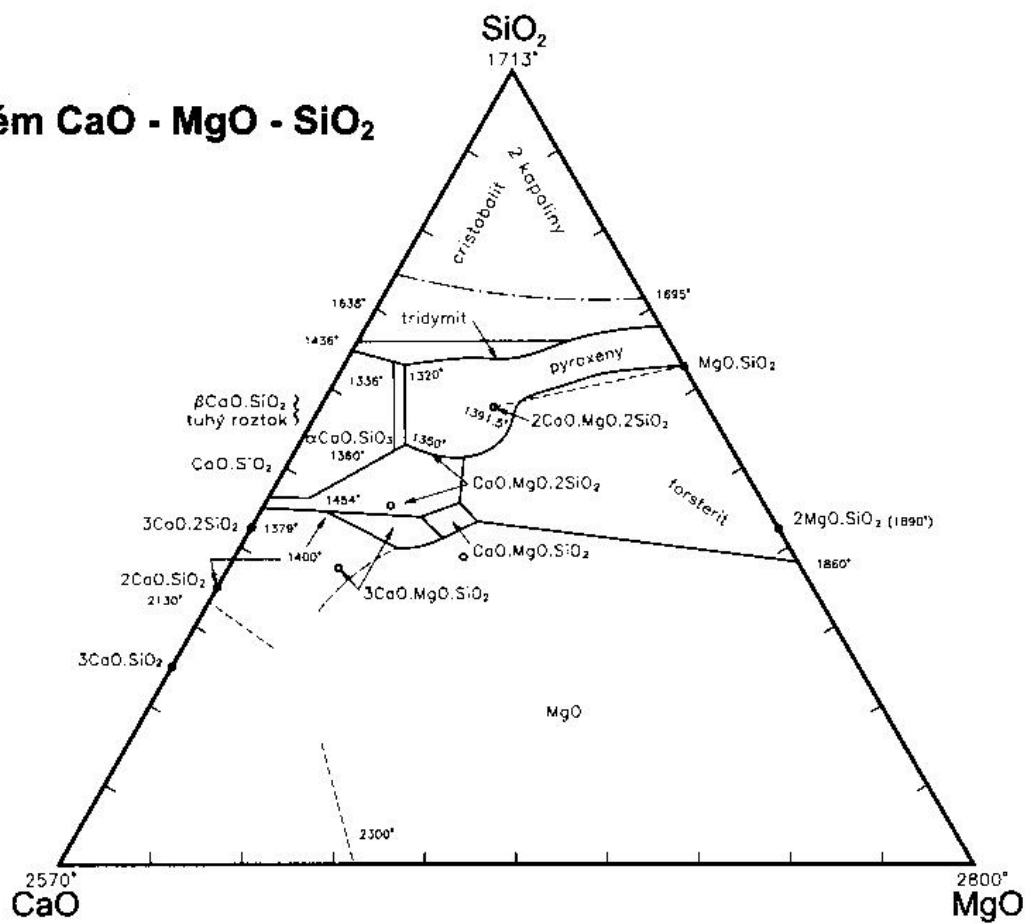
Obr. 3.3 Dvousložkový třífázový systém.

3.5 Třísložkové fázové systémy

Tyto rovnováhy jsou velice pestré, neboť tuhá fáze může obsahovat nejen směs obou látek (tuhý roztok), ale i jednu složku. Většinou existuje několik modifikací tuhé látky a navíc často probíhají chemické reakce. Při sestavování fázového diagramu vycházíme z experimentálních dat, která se získávají různými metodami. U vodných roztoků solí se používá odběr nasyceného roztoku při dané teplotě a jeho analýza. Další, velice efektivní metodou, je **termická analýza**, při které měříme teplotu systému v závislosti na čase. Postup je zcela automatizovaný a k dispozici máme celou řadu komerčně vyráběných přístrojů. V nejjednodušším provedení si navážíme řadu směsí, zhomogenizujeme je zahřáním na teplotu tuhnutí, pak necháme směs chladnout za kontrolovaných podmínek a v pravidelných intervalech odečítáme teplotu. Spojením těchto bodů získáme **křivky chladnutí**. Výsledkem jsou rovinná zobrazení třísložkových fázových diagramů.

Třísložkové (ternární) soustavy mají nejvýše čtyři stupně volnosti, tlak, teplotu a poměry koncentrací dvou párů složek, přičemž váhový poměr třetí složky je tím automaticky dán. U těchto soustav nepřehlídíme k tlaku, protože prakticky nemá na rovnováhu vliv. Rovnovážné soustavy můžeme proto znázornit prostorovým modelem, jehož základnu tvoří rovnostranný trojúhelník. Isotermní rovnováhy vykresluje do trojúhelníkových plošných diagramů, viz Obr. 3.4.

Systém CaO - MgO - SiO₂



Obr. 3.4 Tříložkový fázový diagram systému CaO – MgO – SiO₂.

Vrcholy trojúhelníka představují čisté složky (váhově 100%), na stranách vynášíme váhové zlomky dvou složek. Body uvnitř trojúhelníka značí všechny možné stavy, tedy složení, soustavy. Souřadnice bodu, která vyjadřuje konkrétní váhová procenta složek směsi, najdeme tak, že vedeme rovnoběžky se stranami trojúhelníka. Tyto rovnoběžky vytínají na obou stranách trojúhelníka příslušné úseky.

Poměry vzniklé míšením a rovnováhy tří složek jsou poměrně složité, ale neobejde se bez nich žádný technolog, který navrhuje nové materiály, např. keramiku a sklo (fázové diagramy oxidu křemičitého), kovové materiály (fázové diagramy železa) atd. Pro většinu známých systémů jsou fázové diagramy naměřeny a najdeme je opět v příslušných tabulkách nebo publikacích věnovaných danému typu materiálu.

4 VYBRANÉ VLASTNOSTI REÁLNÝCH STAVEBNÍCH HMOT A JEJICH VZTAH KE STRUKTUŘE LÁTEK

4.1 TEXTURA A STRUKTURA MATERIÁLŮ

4.2 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI STAVEBNÍCH HMOT

4.3 VLNKOSTNÍ VLASTNOSTI STAVEBNÍCH HMOT

4.3 TEPELNÉ VLASTNOSTI STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

4.5 AKUSTICKÉ VLASTNOSTI STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

4.6 MECHANICKÉ VLASTNOSTI STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

V předcházejících kapitolách byly dopodrobna popsány jednotlivé základní stavební jednotky látek, principy jejich vázání, slučování či jejich přeměny za účelem vzniku finálního produktu – **stavební hmoty**. Na základě předložených informací je zcela evidentní, že vlastnosti reálných stavebních hmot jsou určeny povahou a velikostí soudržných sil, které působí mezi jednotlivými atomy, ionty případně molekulami, stejně jako jejich chemickým složením. Znalost těchto vazebných principů a chemické a fyzikální podstaty stavebních hmot umožňuje cíleně a řízeně navrhovat materiály vyšších užitných vlastností, případně modifikovat stávající materiálovou databázi.

Pro stavebního inženýra představuje znalost materiálových vlastností nezbytnou vstupní informaci pro optimální návrh stavební konstrukce s ohledem na vhodnost jednotlivých materiálů pro určité typy konstrukcí a specifická prostředí, ve kterých bude materiál v konstrukci osazen, případně může být konstrukce vlastnostem materiálů přizpůsobena. Jde o otázku technickou a estetickou, to je zajištění řádné funkční schopnosti konstrukce, i otázku ekonomickou, kdy je nezbytné zajistit, aby stavební dílo bylo provedeno hospodárně s využitím vlastností aplikovaných materiálů.

Na základě poznatků získaných v předcházejícím textu můžeme stavební materiály rozdělit do následujících tří základních skupin:

1. Anorganické materiály – kovové,
 - nekovové (keramika, sklo, anorganická pojiva – cement, vápno, sádra, atd., povrchové povlaky, monokrystaly – NaCl, diamant),

2. Organické materiály – dřevo, ovčí vlna, materiály na bázi technického konopí, polymery, papír, sláma,
3. Kompozitní materiály – tvořeny matricí a výztuží (využití synergického působení nejméně dvou různých materiálů), například železobeton, sklokeramika, vláknité cementové kompozity – skleněná vlákna, uhlíková vlákna atd.

Při hodnocení vlastností materiálů, případně při jejich sofistikovaném odhadu, musíme dále zohlednit **látkové složení materiálů**, které má zásadní vliv na jejich parametry a chování. Téměř všechny stavební materiály je možné považovat za hmoty pevného skupenství (výjimku tvoří například izolační polyuretanové pěny, dilatační a utěšňující tmely, atd.), které jsou většinou porézní. To znamená, že ačkoli je stavební hmota pevného skupenství, obsahuje ve svých pórech fázi plynnou, v případě vlhkého materiálu i fázi kapalnou. Pokud bychom se touto problematikou zabývali podrobněji, můžeme rozlišit i fázi čtvrtou, kterou představuje **vázaná voda** na stěnách porézního prostoru. Tato voda má zcela odlišné vlastnosti v porovnání s vodou volnou (kapilární), které se do jisté míry blíží vlastnostem ledu.

Další významný faktor, který ovlivňuje vlastnosti materiálů, představuje **typ materiálu**. Tím je míněno, zda se jedná o materiály porézní, hutné, homogenní, nehomogenní, materiály isotropní, anizotropní, případně specifické druhy anizotropie (ortotropní materiály – např. vláknité kompozity). Dalším typem jsou materiály vrstvené, u kterých má zásadní vliv na jejich vlastnosti prostorové a plošné uspořádání vrstev. Typickým příkladem vrstvených materiálů jsou například minerální, skleněné či konopné vlny, kde prostorové uspořádání vláken vlny definuje možnosti aplikace těchto materiálů pro specifické konstrukce.

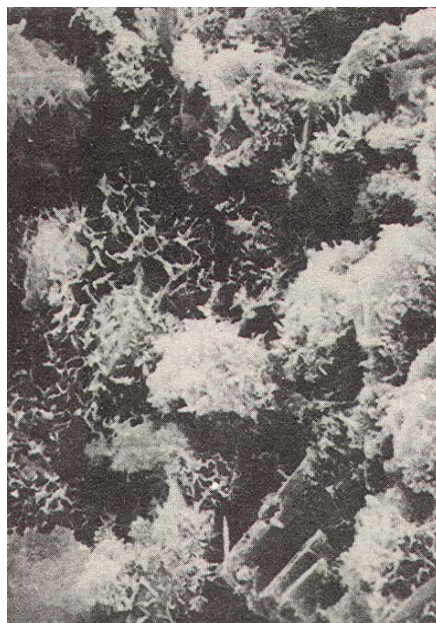
V neposlední řadě je nezbytné zmínit skutečnost, že **vlastnosti materiálů nejsou stálé**, ale v průběhu jejich životnosti či užívání se mohou zcela zásadně měnit v důsledku působení změn prostředí, jehož působení jsou vystaveny. Jsou tedy vystaveny změnám teploty, kapalně vlhkosti, relativní vlhkosti, mechanickému zatížení a dalším vlivům, které mohou vlastnosti materiálů zlepšit, v převážné většině však materiály degradují.

V souvislosti s vlastnostmi materiálů a jejich změny je nezbytné zmínit také vývoj tzv. **inteligentních materiálů**. Tyto materiály (v zásadě i stavební konstrukce) mohou některé ze svých vlastností vhodně měnit v reakci na změny podmínek okolního prostředí. Příkladem jsou paropropustné fólie s proměnným difúzním odporem pro transport vodní páry, vnitřní omítky schopné v teplých dnech akumulovat teplo, výplňová skla reagující na intenzitu slunečního záření změnou svého zabarvení atd. Další možností je využití polymerů reagujících na teplo. Z pohledu materiálového inženýrství je možné konstatovat, že

předpokladem pro rozvoj inteligentních materiálů je zvládnutí nanotechnologických operací, které umožní vytvořit promyšleně koncipované materiálové struktury na molekulové úrovni.

4.1 Textura a struktura materiálů

Při hodnocení vlastností a chování materiálů musíme rozlišit, na jaké úrovni jejich sledování pracujeme. Z tohoto pohledu rozlišujeme **vnitřní texturu materiálů**, která popisuje vzájemné prostorové uspořádání složek látky a pórů na makroskopické úrovni (úroveň pozorování od 0,1 mm). Dále rozlišujeme strukturu materiálů charakterizující druh a skladbu jednotlivých fází látek bez ohledu na jejich prostorové uspořádání na mikroskopické úrovni ($<1\mu\text{m}$). Typický příklad pohledu na strukturu (v tomto případě můžeme hovořit o **mikrostruktuře**) je uveden na Obr. 4.1.

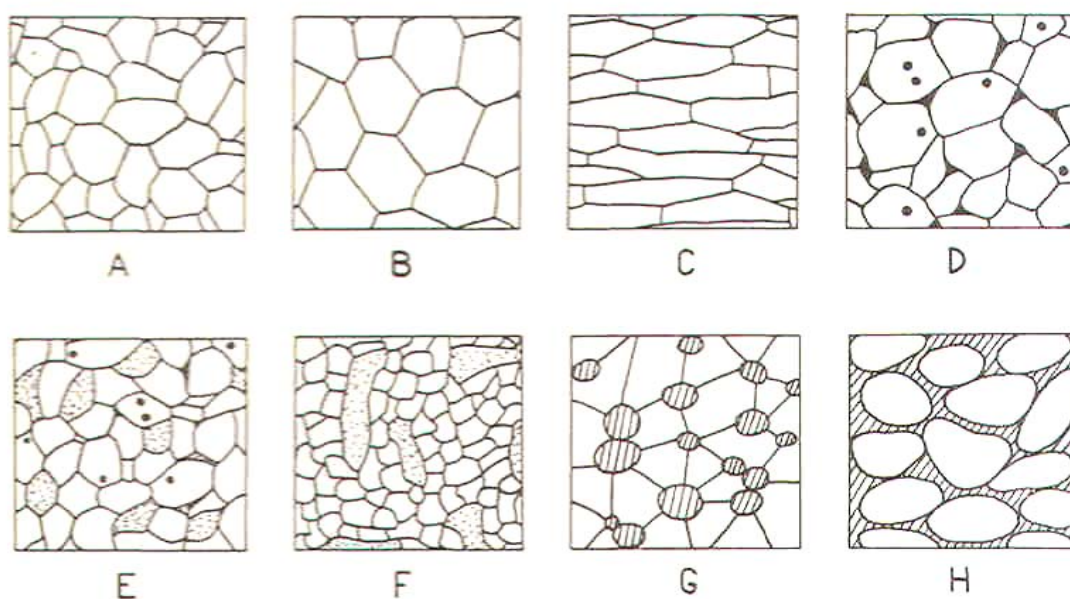


Obr. 4.1 *Struktura hydratovaného Portlandského cementu po 12 měsících, C-S-H II je přítomen ve formě jehliček na zrnech slínku, portlandit je ve formě velkých pseudohexagonálních destičkovitých krystalů (zvětšeno 2000krát) – převzato z Henning O., Lach V. 1983, Chemie ve stavebnictví, SNTL.*

Struktura, resp. mikrostruktura, je tedy struktura určité soustavy (systému) na rozdíl od vnitřní krystalové struktury čistých (homogenních) látek. U mikrostruktury je uspořádání nahodilé, i když v některých specifických případech může mikrostruktura jevit určité orientované uspořádání. V tomto případě poté hovoříme o mikrotextuře látek. Příklady idealizovaných mikrostruktur jsou uvedeny na Obr. 4.2.

Vznik struktury stavebních látek je možné vysvětlit skutečností, že v průběhu zpevňování disperzních soustav (vstupních surovin pro výrobu stavebního materiálu) vzniká kompaktní souvislá tuhá fáze, která je již charakteristická svou strukturou.

Mikrostruktura heterogenních látek je hlavním nositelem všech jejich technických vlastností. V mnoha případech zcela překrývá vlastní vnitřní strukturu jednotlivých složek matrice (např. zrn písku, cementu, kameniva atd.). Proto na uspořádání mikrostruktury, na poměru tuhé fáze a tzv. nulové fáze (pórů), na velikosti složek jednotlivých fází, geometrii apod., závisí například mechanické vlastnosti, které jsou u konstrukčních stavebních materiálů v podstatě rozhodující.



Obr. 4.2 Příklady idealizovaných mikrostruktur, A - polykrystalická s různě velkými zrny, B - polykrystalická s prakticky stejně velkými zrny, C - polykrystalická s orientovanými zrny (mikrotextura), D - mikrostruktura s malými póry, E - mikrostruktura s póry velikosti zrna, F - mikrostruktura s velkými póry, G - mikrostruktura o dvou fázích, krystalické a skelné (čárkovaná), H - mikrostruktura o dvou fázích, přičemž krystalická nemá přímou vazbu –
Henning O., Lach V. 1983, *Chemie ve stavebnictví*, SNTL.

Schematické vysvětlení vzniku mikrostruktury keramického střepu a cementové pasty je prezentováno v následujících obrázcích. V případě zatvrdlé maltoviny je nejdříve schematicky znázorněno formování struktury slínku, kterou je třeba rozrušit a hydratací poté vzniká mikrostruktura hydratovaného cementu.



Obr. 4.3 Schematické znázornění vzniku mikrostruktury keramického střepu.



Obr. 4.4 Schematické znázornění vzniku mikrostruktury cementové pasty.

4.2 Základní fyzikální vlastnosti stavebních hmot

Do skupiny základních fyzikálních vlastností zahrnujeme všechny materiálové vlastnosti, k jejichž určení postačí stanovení hmotnosti a rozměrů, resp. objemu vzorku materiálu. Jsou to vlastnosti, které do značné míry materiál charakterizují, a na základě jejich znalostí můžeme předpovědět, jaké budou ostatní vlastnosti materiálu ať už z pohledu mechanické odolnosti materiálu nebo například jeho tepelně-vlhkostní funkce. Je tedy evidentní, že všechny materiálové vlastnosti jsou v přímé vazbě se základními fyzikálními vlastnostmi a je možné prokázat jejich funkční závislost na změně těchto základních parametrů.

Mezi základní fyzikální vlastnosti řadíme **objemovou hmotnost, hustotu** (dříve označovaná jako měrná či specifická hmotnost), **hutnost, pórovitost, měrný (specifický) povrch a zrnitost**.

4.2.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost je definována jako hmotnost jednotkového objemu látky, přičemž objemem látky rozumíme celkový objem látky včetně pórů a dutin. Je definována následujícím vztahem

$$\rho_v = \frac{m}{V},$$

kde ρ_v (kg/m³) je objemová hmotnost, m (kg) hmotnost měřeného objemu materiálu a V (m³) celkový objem materiálu.

U pevných látek je objem tvořen vlastní maticí materiálu a póry či dutinami, u sypkých látek je do objemu třeba zahrnout ještě objem mezer mezi jednotlivými složkami (zrny) látky. V technické praxi pak tedy rozlišujeme objemovou hmotnost pevných látek a sypkých, tzv. **sypnou (objemovou) hmotnost**. Objemová hmotnost látek je tedy veličina závislá na hustotě složek daného materiálu, ale velmi silně i na jeho pórovitosti. V případě sypkých stavebních hmot (např. kamenivo, písek, perlit, keramzit apod.) či stlačitelných hmot (minerální vlna, skelná vlna, ovčí vlna, konopné izolace atd.) i na stlačitelnosti, resp. míře zhutnění. Míra zhutnění bude v tomto případě rozhodujícím faktorem pro hodnoty objemové hmotnosti, pórovitosti a dalších závislých materiálových parametrů.

Kromě výše uvedených faktorů, které zásadně ovlivňují objemovou hmotnost stavebních materiálů, je nezbytné zmínit také obsah vlhkosti, s jehož nárůstem dojde samozřejmě také k nárůstu objemové hmotnosti materiálu. Při praktickém experimentálním určení objemové

hmotnosti je tedy nezbytné stanovit objemovou vlhkost zkoumaného materiálu ve vysušeném stavu, případně stanovit také vlhkost, při které bylo měření objemové hmotnosti provedeno. Při určování objemové hmotnosti je nutné si uvědomit, že většina stavebních materiálů není homogenních, neboť kromě skutečnosti že jsou porézní, bývají také často tvořeny směsí několika komponent. Hovoříme-li tedy o objemové hmotnosti materiálů, předpokládáme vždy určitou objemovou stejnorodost, kterou do měřicího postupu zavedeme pomocí vzorků **reprezentativního objemu**. Velikost reprezentativní objemu je závislá na velikosti jednotlivých složek materiálu, na jejich uspořádání a homogenitě materiálu. Je také volena s ohledem na zvolenou metodu měření materiálových vlastností.

Objemová vlhkost je veličina důležitá pro charakteristiku stavebních materiálů nejenom z hlediska tíhových, ale i v souvislosti s řadou tepelně-technických veličin (tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita), vlhkostních veličin, mechanických a akustických veličin.

4.2.2 Hustota

Hustota je definována stejně jako objemová hmotnost, tzn. jako hmotnost jednotkového objemu látky, přičemž objemem rozumíme v tomto případě objem bez dutin a pórů. Popíšeme ji rovnicí

$$\rho = \frac{m}{V},$$

kde ρ (kg/m³) je hustota materiálu (resp. matrice materiálu), m (kg) je hmotnost vzorku, V (m³) objem vzorku vlastní hmoty.

V následujícím textu se budeme zabývat experimentálními metodami pro stanovení hustoty a uvedeme si základní definiční vztahy, které platí mezi hustotou, objemovou hmotností a celkovou otevřenou pórovitostí.

Hustotu je v podstatě možné stanovit dvěma základními metodami. První možnost představuje **pyknometrická metoda**, kde na základě několika vážení v pyknometru nepřímo stanovíme hustotu. Hustotu při stanovení pyknometrem můžeme stanovit například dle následujícího vztahu

$$\rho = \frac{m \cdot \rho_k}{m + m_1 - m_2},$$

kde m je hmotnost vzorku materiálu použitého ke zkoušce, m_1 hmotnost pyknometru naplněného měřicí kapalinou, m_2 hmotnost pyknometru se vzorkem a doplněného měřicí kapalinou, ρ_k hustota měřicí kapaliny při teplotě zkoušky. Při výše popsané pyknometrické metodě je nezbytné používat kapalinu do pyknometru takovou, která dobře lne k povrchu vzorku a přitom s ním nijak chemicky nereaguje (**inertní kapalina**). Takovou kapalinou je při zkouškách stavebních materiálů v naprosté většině destilovaná voda. V případě některých látek, např. pojiv, kde by docházelo k hydratační reakci s vodou, se užívají jiné kapaliny, jako petrolej, bezvodý alkohol, chlorid uhličitý atd. V současné době se v materiálovém výzkumu používá nejčastěji **plynové pyknometrie**. Ta je založena na měření objemu inertního plynu, který pronikne do struktury materiálů za specifického tlaku. Z rozdílu celkového objemu vzorku měřeného materiálu a objemu inertního plynu, který vyplňuje póry a dutiny materiálu, poté můžeme stanovit objem matrice materiálu. Druhou možností jak stanovit hustotu materiálu představuje metoda **vakuové nasákavosti**. Tato metoda vychází z vážení hmotnosti suchého vzorku materiálu m_s (kg), hmotnosti vodou nasyceného vzorku m_v (kg) a hmotnosti ve vodě ponořeného nasyceného vzorku, tzv. Archimédovy hmotnosti m_a (kg). Plného nasycení vzorku se docílí za pomoci vakua, která umožní plné zaplnění pórů materiálů vodou na úkor vzduchu původně obsaženého v pórech. Z výše uvedených měření jednotlivých hmotností se nejprve přesně stanoví objem měřeného vzorku materiálu V (m³)

$$V = \frac{m_v - m_a}{\rho_k},$$

kde ρ_k (kg/m³) je hustota kapaliny (v našem případě vody) při specifické teplotě experimentu.

Výpočet hustoty se poté provede dle následujících vztahů,

$$w_{sat} = \psi_0 \cdot \rho_V \frac{m_v - m_s}{V},$$

$$\rho = \frac{m_s}{V(1 - \psi_0)},$$

kde w_{sat} (kg/m³) je nasycený obsah vlhkosti a ψ_0 (-) celková otevřená pórovitost materiálu.

Pro stanovení objemové hmotnosti se nejčastěji využívá **metoda gravimetrická** (měření lineárních rozměrů vzorku materiálu a jeho vážení). Pro materiály s obtížně definovaným objemem je možné také využít **metody odměrného válce**.

Nyní již tedy známe veškeré pojmy pro popis objemové hmotnosti, sypané objemové hmotnosti a hustoty a můžeme si uvést několik praktických příkladů jejich hodnot a jejich

vzájemné závislosti. Například u pórovitého kameniva můžeme tedy rozlišit celkem čtyři různé veličiny:

- sypanou objemovou hmotnost ve stavu volně sypaném (např. 400 kg/m^3),
- sypanou objemovou hmotnost ve stavu setřeseném (např. 600 kg/m^3),
- objemovou hmotnost zrn (např. 850 kg/m^3) – nezapočítá se objem mezer mezi zrny,
- hustotu zrn (např. 2550 kg/m^3 , dle typu kameniva).

Z výše uvedených hodnot je tedy zcela evidentní, že při charakterizaci materiálu s ohledem na jeho objemovou hmotnost či hustotu, musíme vždy zohlednit jeho aktuální stav. V Tab. 4.1 jsou uvedeny hodnoty objemové hmotnosti, hustoty matrice a celkové otevřené pórovitosti pro běžně používané stavební materiály. Při pohledu na prezentované hodnoty je patrný vzájemný vztah mezi těmito základními fyzikálními vlastnostmi stavebních materiálů. Uvedené hodnoty je třeba brát pouze jako ilustrační, jednotlivé specifické stavební materiály se vždy liší svými vlastnostmi v závislosti na jejich složení a zvoleném výrobním postupu.

Tab. 4.1 Základní fyzikální vlastnosti běžných stavebních materiálů.

Materiál	Objemová hmotnost (kg/m^3)	Hustota matrice (kg/m^3)	Celková otevřená pórovitost (%)
Minerální vlna	86	2122	95
Kalcium silikát	235	2047	86
Pálená plná cihla	1776	2647	32
Pórobeton	463	1859	75
Beton	2130	2464	14
Opuka	2256	3032	26
Pískovec	1807	2627	31
Vápenná omítka	1745	2663	35

4.2.3 Hutnost

Hutnost je vlastnost materiálu, která popisuje, jak je celkový objem materiálu vyplněn pevnou fází. Matematicky je vyjádřena jako poměr objemu pevné fáze k celkovému objemu, nebo poměrem objemové hmotnosti k hustotě

$$h = \frac{V_h}{V} = \frac{\rho_v}{\rho},$$

kde h (-), (%) je hutnost a V_h (m³) objem pevné fáze.

U sypkých látek se pod pojmem hutnost předpokládá poměr objemu zrn látky (tj. vlastní látky a pórů) k celkovému objemu vzorku (včetně mezer). Získáváme tedy následující výraz

$$h = \frac{\rho_{vs}}{\rho_v},$$

kde ρ_{vs} je sypná objemová hmotnost a ρ_v objemová hmotnost zrn.

V praxi se u sypkých látek zavádí **stupeň** nebo také **míra zhutnění**. Tyto veličiny jsou definovány jako poměr sypné objemové hmotnosti v daném stavu k sypné objemové hmotnosti ve zvoleném základním stavu, za který je obvykle považován stav dokonalého zhutnění.

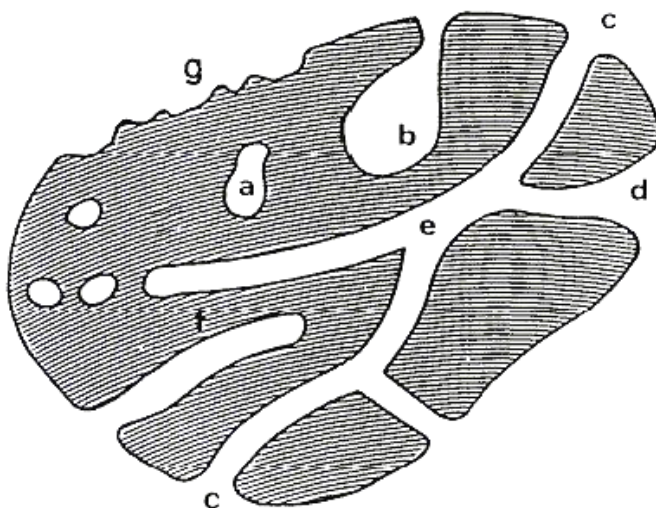
4.2.4 Pórovitost

Pórovitost je materiálový parametr, který je v přímé vazbě k hutnosti materiálů. Na základě známé hodnoty pórovitosti je možné předpovědět chování materiálu při přenosu hybnosti, tepla, vlhkosti, vzduchu a chemických látek obsažených v jednotlivých transportních médiích. Je definována u pevných, eventuálně u zrn sypkých látek, jako poměr objemu pórů k celkovému objemu vzorku. Stejně jako hutnost se nejčastěji vyčísluje v procentech objemu. Platí tedy

$$\psi = \frac{V_p}{V} \cdot 100\% = \frac{V - V_h}{V} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{V_h}{V}\right) \cdot 100\% = (1 - h) \cdot 100\%,$$

kde ψ (%) je celková pórovitost materiálu, V_p objem pórů, V_h objem pevné fáze a V celkový objem materiálu.

Pórovitost, jako doplněk hutnosti do 100 % objemu materiálu, v sobě zahrnuje všechny póry a dutiny v látce, tj. póry otevřené i uzavřené. **Otevřené póry** můžeme definovat jako póry, které jsou propojeny s povrchem materiálu. Tyto póry jsou zodpovědné například za pronikání vlhkosti do stavebních materiálů, případně také za přítomnost solí ve stavebních materiálech a konstrukcích. Na druhé straně umožňují vysychání vlhkosti i odsolování materiálů. Otevřené póry mohou vznikat např. **únikem plynů během výroby** (lehčené materiály), postupným **odpařováním** (vysušováním) vody z materiálů (beton, omítky, keramika, cementové kompozity), **záměrným provzdušněním** (lehké betony) a **napěněním materiálů** (perlit). **Uzavřené póry** nejsou propojeny s povrchem materiálů. Vznikají například slinutím keramického střepu, nebo jako gelové póry při hydrataci cementu. Tyto póry neumožňují přijímat do struktury materiálů vzdušnou vlhkost ani jiné molekuly plynů, nicméně z pohledu mechanických vlastností se podílí na celkové mechanické pevnosti materiálů. Schematicky je rozdělení pórů zobrazeno na Obr. 4.5. Vzhledem k tomu, že termín uzavřený pór může být termínem relativním, lze například definovat uzavřenost pórů jako prostor, který není přístupný pro molekuly Helia (průměr 0,2 nm). Jiná definice uzavřených pórů říká, že jde v podstatě o póry otevřené, jejichž šířka je menší nežli velikost molekuly média použitého pro měření pórovitosti (tzv. ultrapóry). Tato definice poté tyto účinně uzavřené a chemicky uzavřené póry označuje jako **póry latentní**.

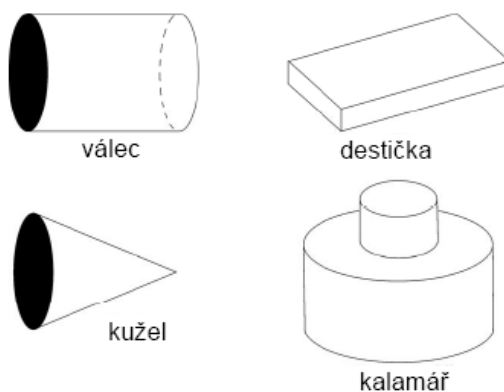


Obr. 4.5 Schematické roztrídění pórů vzhledem k jejich dostupnosti, a – uzavřený pór, b, f – póry uzavřené pouze na jednom konci, c, d, g – otevřené póry, e – póry otevřené na obou koncích, průběžné – převzato ze Zdravkov B. a kol., 2008, *Kategorizace pórů v porézních matricích*, *Chemické listy* 102, s. 434 – 438.

Otevřené póry díky spojení s vnějším prostředím, ve kterém se materiál nachází, přímo ovlivňují následující vlastnosti stavebních materiálů:

- navlhavost a vysychavost materiálů,
- schopnost difúze kapalin a plynů materiálu,
- zvukově izolační vlastnosti (schopnost pohlcovat zvuk),
- tepelně izolační vlastnosti (schopnost vést a akumulovat teplo),
- mechanické vlastnosti.

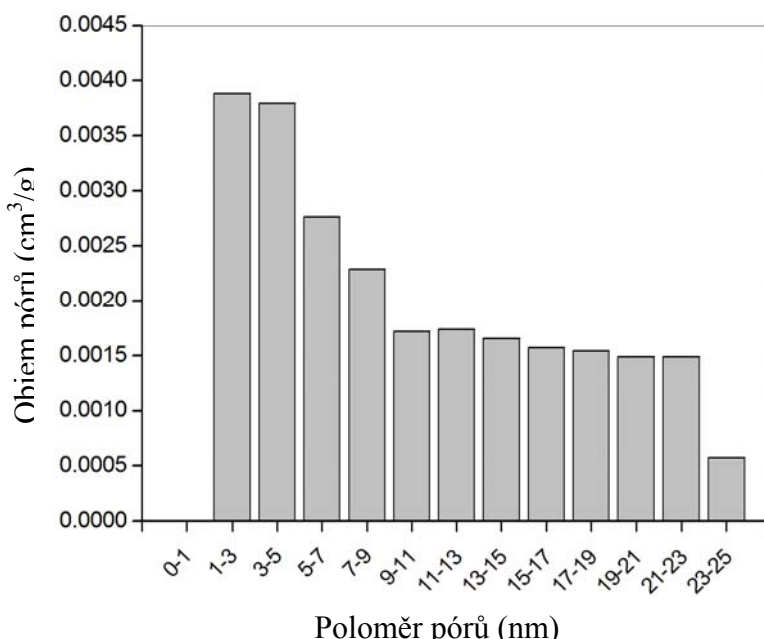
Póry nejsou jednoduché kapiláry, ale jejich tvar je složitý a proměnlivý. Z tohoto důvodu si nevystačíme pouze s hodnotou celkové otevřené pórovitosti, ale musíme znát také tvary pórů, jejich propojení a rozměr. Pro zjednodušení a hlavně pro jejich nepravidelnou geometrii jsou tvary pórů zařazovány dle **modelových systémů**. V závislosti na zdroji použité literatury můžeme póry třídit například pomocí následujících geometrických tvarů (viz Obr. 4.6, klasifikace dle Kaneka): válec, destička (štěrbina), kužel a inkoustová lahvička (dva válce různých průměrů na sobě). Jak je tedy zřejmé, jsou modelové systémy s výhodou popisovány v termínech různých geometrických tvarů. Pro popis tvaru pórů se také často využívá kombinace těchto geometrických forem, a to v závislosti na uspořádání strukturních elementů jednotlivých stavebních materiálů. Pro podrobný popis systému pórů je možné využít modelování porézní struktury na základě více kritérií, například geometrie, velikosti pórů, jejich orientace, umístění a propojení.



Obr. 4.6 Klasifikace geometrie pórů, klasifikace dle Kaneka – převzato ze Zdravkov B. a kol. 2008, Kategorizace pórů v porézních matricích, Chemické listy 102, s. 434 – 438.

Porézní materiály, vykazující stejnou hodnotu celkové otevřené pórovitosti a mající póry o různé velikosti a geometrii, reagují za stejných podmínek různým způsobem. Z tohoto

pohledu je nezbytné kategorizovat póry nejen podle jejich otevřenosti či uzavřenosti a geometrického tvaru, ale také podle jejich rozměrů. Velikost pórů je tedy velmi důležitý parametr při praktické aplikaci porézních stavebních materiálů v praxi. Proto se pórovitost materiálů popisuje pomocí **distribuční křivky pórů**, což je funkce stanovující velikost a objemové zastoupení pórů specifického rozměru. Pro její experimentální určení se používají vysoce sofistikované metody, například rtuťová či adsorpční plynová porozimetrie, elektronová či optická mikroskopie, případně metody založené na nasávání a vytěsňování kapalin. **Plynová adsorpční porozimetrie** je založena na adsorpci inertních plynů (nejčastěji se používá dusík a helium), které jsou za specifického tlaku vháněny do porézní struktury materiálů. Ze známého objemu plynu, který byl vpraven do materiálu, a tlaku, můžeme na základě vhodného modelu porézní struktury materiálu stanovit jeho rozměr a objemové zastoupení pórů tohoto specifického rozměru. Pro stavební hmoty se nejčastěji předpokládají póry kruhového průřezu. Poté tedy hovoříme o poloměru či průřezu pórů. Plynová adsorpční porozimetrie se používá pro stanovení objemu velmi jemných pórů, typicky o poloměru kapiláry < 25 nm (mikro a mezopóry). **Rtuťová porozimetrie** pracuje na stejném způsobu s tím rozdílem, že penetrujícím médiem je rtuť a detekovány jsou póry o poloměrech > 2 nm. Obě porozimetrické metody se tedy vhodně doplňují a jsou schopny poskytnout ucelený obraz o distribuci pórů v měřeném materiálu. V rámci měření distribuce pórů je také možné stanovit měrný povrch materiálů, jehož definicí se budeme zabývat v následujícím textu. Jako příklad je na Obr. 4.7 prezentováno objemové zastoupení pórů v metakaolinu, změřené pomocí plynové adsorpční porozimetrie.



Obr. 4.7 Objemové zastoupení póru v metakaolinu.

Pro stanovení tvaru, velikosti a distribuce pórů, lze také využít metod elektronové mikroskopie. V kombinaci s programy pro analýzu získaného obrazového záznamu lze poté provést stanovení zastoupení jednotlivých typu pórů a to s ohledem na jejich tvar i velikost. Na Obr. 4.8 je zobrazen snímek z elektronového mikroskopu, který byl pořízen pro pískovec. Z obrázku je patrné zastoupení zrn SiO_2 , muskovitu (destičkové útvary) i pórů (tmavé prostory mezi jednotlivými zrny).



Obr. 4.8 Porézní struktura pískovce, měřeno elektronovým mikroskopem.

Jak již bylo řečeno, znalost velikosti pórů představuje velmi cennou informaci pro praktickou aplikaci stavebních materiálů zejména s ohledem na jejich předpokládané použití. Na základě naměřených distribučních křivek můžeme póry z hlediska jejich rozměru (za předpokladu kruhového tvaru pórů) rozdělit do následujících kategorií:

- **submikroskopické (ultrakapilární) póry** – poloměr $< 10^{-9}$ m, rozměry těchto pórů jsou porovnatelné s rozměry molekul, mohou se zde vytvářet řetězce vody a voda se nemůže těmito póry pohybovat,
- **kapilární póry** – rozměr $10^{-9} - 10^{-3}$ m, voda a plyny se zde chovají jako v soustavě kapilár, pohyb vody je vyvoláván povrchovým napětím (kapilárními silami),
- **makropóry a vzdušné póry** – již se neuplatňují kapilární síly neboť dutiny (póry) jsou příliš rozsáhlé a převládá vliv gravitace.

Kapilární póry můžeme dále dělit následovně:

- kapilární mikropóry: $2 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-6}$ m,
- kapilární přechodové póry: $2 \cdot 10^{-6} - 60 \cdot 10^{-6}$ m,
- kapilární makropóry: $60 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-3}$ m.

4.2.5 Zrnitost

Řada procesů a technologických operací při výrobě stavebních hmot (především na bázi silikátů) probíhá se zrnitými soustavami. Vlastnosti těchto soustav určují nejen látkové charakteristiky zrn, ale i velikost, tvar, způsob uložení a jejich vzájemné silové působení. Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, tyto zrnité materiály je možné označit pojmem **disperzní soustavy**. Pro charakterizaci těchto disperzních soustav zavedeme pojem **zrnitost**.

Zrnitost (granulometrie), popisuje velikost, množství a tvar jednotlivých zrn v sypké látce. U sypkých látek, které vznikly mletím či drcením, hovoříme o **jemnosti mletí**. Zrnitost je jednou ze stěžejních vlastností, která přímo či nepřímo ovlivňuje celou řadu dalších materiálových vlastností. Konkrétně má přímý vztah k **mezerovitosti** (poměr objemu mezer mezi zrny k celkovému objemu určitého množství sypké látky), sypné hmotnosti, propustnosti pro plyny a kapalnou vlhkost, stlačitelnosti a dalším mechanickým parametrům, tepelným a akustickým vlastnostem.

Vyjadřuje se vzájemným poměrem zrn jednotlivých velikostí. Poměr zrn se udává většinou hmotnostně, jen výjimečně, kde jsou objemové hmotnosti zrn různých velikostí rozličné, objemově. Při určování zrnitosti rozdělujeme zrna směsi podle velikosti na skupiny zvané **frakce**, jejichž zastoupení popíšeme **křivkou zrnitosti**.

S ohledem na velikost zrn jsou pro stanovení křivky zrnitosti používány různé zkušební postupy. Velikosti nejmenších zrn (typicky < 0.05 mm) se určují fyzikálními metodami, které jsou většinou založeny na sedimentaci zrn v kapalinách (využití Stokesova zákona). Velikost větších zrn se určuje prosévací zkouškou, kdy směs proséváme sítí o různých definovaných velikostech (normová řada sítí má velikost ok v [mm] – 0.063; 0.125; 0.25; 0.5; 1; 2; 4; 8; 16; 32; 63; 125). Podíly m prošlé jednotlivými sítí x_i se vyjádří v % celkové hmotnosti materiálu M

$$p_i = \frac{m_i}{M} * 100\%,$$

$$M = \sum_{i=1}^k m_i(g),$$

kde p_i je hmotnostní procentický podíl frakce $/x_{i-1}-x_i/$, m_i je hmotnost frakce $/x_{i-1}-x_i/$ (g), M (g) je celková hmotnost všech frakcí, i je index síta. Číslování počíná sítím nejjemnějším, k je nejhrubší použité síto.

Postupným sčítáním podílů p_i počínajícím nejjemnější frakcí $/x_0-x_1/$ se získají propadové podíly D_n (%) pro síto n , sčítáním počínaje nejhrubší frakcí $/x_{k-1}-x_k/$ se dostanou zbytkové podíly R_n (%)

$$D_n = \sum_{i=1}^n p_i (\%),$$

$$R_n = \sum_{i=n+1}^k p_i (\%).$$

Protože celkový zbytek a propad pro totéž síto dávají 100%, počítají se zpravidla zbytky ze vztahu $R_n = 100 - D_n$ (%).

Vydělením podílů p_i příslušným intervalem $/x_{i-1}-x_i/$ se dostane podíl připadající na jednotkovou šíři frakce, čili hustota rozdělení zvaná četnost, která se přiřazuje zpravidla aritmetickému průměru nebo geometrickému průměru mezi frakce

$$\frac{p_i}{/x_{i-1}/} = \frac{p_i}{x_i} \left(\frac{\%}{mm} \right) \dots \bar{x}_i = \frac{x_{i-1} + x_i}{2}; x^* = \sqrt{x_{i-1} * x_i}.$$

Vynesení D_n proti velikostem x_n a spojením bodů plynulou čarou se dostane graf **propadové funkce** $y(x)$. Obdobně z R_n se dostane **zbytková funkce** $y_R(x)$. Tyto integrační funkce se nazývají **distribuční funkce**.

Vynesení četností proti frakčním intervalům se dostane **četnostní histogram**, jejich vynesení proti průměrům frakcí **četnostní polygon**. Spojením jeho bodů plynulou čarou se získá **četnostní křivka-graf frekvenční funkce**. Tento graf je možné získat také derivací distribuční funkce, jak plyne ze vztahu

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{p}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} = y'(x).$$

Zastoupení částic o určité velikosti v zrnitých soustavách popisují také rozdělovací funkce, přičemž velikost částice může být vyjádřena poloměrem, objemem, hmotností částic atd. Diferenciální rozdělovací funkce $F(r)$ udává podíl částic, které mají poloměr větší nebo rovný $r+dr$

$$\int_0^{\infty} F(r) dr = 1.$$

Integrovaná rozdělovací funkce $Q(r)$ udává podíl částic, které mají poloměr větší nebo rovný r

$$Q(r) = \int_r^{\infty} F(r) dr = 1 - \int_0^r F(r) dr,$$

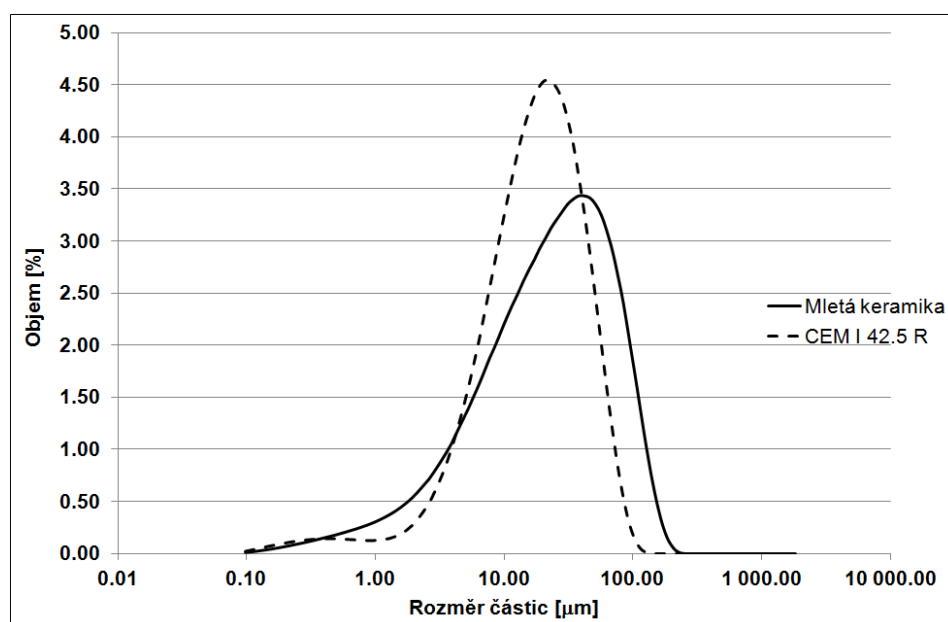
$$\frac{dQ(r)}{dr} = -F(r).$$

Střední rozměr částic zrnitého systému lze vyjádřit vztahem

$$\bar{r} = \int_0^{\infty} r \cdot F(r) dr.$$

Přestože reálné částice zrnitých soustav nejsou kulovité, charakterizuje je vysoký stupeň symetrie, a proto se aproximují tvarem koulí. Výše uvedené vztahy tedy pracují s touto aproximací a popisují zrnité materiály charakteristickým rozměrem, který se nazývá poloměr.

Pro stanovení křivky zrnitosti jemnozrných sypkých materiálů se v současnosti využívá také laserové difrakční analýzy, kdy zrna materiálu jsou vystavena působení dvou laserových paprsků (zelený a červený laser). Na Obr. 4.9 je uvedeno porovnání distribučních křivek velikosti částí pro Portlandský cement a jemně mletou keramiku, která se využívá jako pucolánově aktivní náhrada cementu.



Obr. 4.9 Distribuční křivka velikosti částic.

4.2.6 Měrný povrch

Střední velikost částic v sypké látce lze popsat také měrným (specifickým) povrchem. Měrným povrchem se rozumí celková povrchová plocha všech zrn jednotkového množství látky. Základní rozměr této veličiny je udáván v (m^2/kg). Znalost měrného povrchu je nezbytná například při posuzování jemnosti mletí anorganických pojiv. Běžné cementy mají hodnotu měrného povrchu v rozsahu 250 – 350 m^2/kg , přičemž právě tato vlastnost zásadně ovlivní míru a rychlost hydratace cementových zrn. Vysoký měrný povrch je také požadován u jemných minerálních příměsí do vysokohodnotných a vysokopevnostních betonů. Typickým příkladem může být například mikrosilika, která vhodně doplňuje zrnitostní křivku materiálů pro výše zmíněné typy betonů. Známe-li měrný povrch a určíme-li počet zrn v hmotnostní jednotce, můžeme za předpokladu kulovitosti zrn (nebo jiného známého tvaru) stanovit střední velikost zrna nebo obráceně, na základě znalosti velikosti zrna určit měrný povrch. Pro stanovení měrného povrchu používáme nejčastěji srovnávacích metod, kdy zkoušenou látku porovnáváme s látkou o známém měrném povrchu. Moderní metodu pro stanovení měrného povrchu představuje plynová porozimetrie s využitím modelů pro adsorpci molekul inertních plynů na povrchu materiálů (adsorbentech).

4.3 Vlhkostní vlastnosti stavebních hmot

Vlhkostní vlastnosti stavebních hmot představují velmi důležité parametry, které mohou být při nesprávném použití materiálů v konstrukcích zdrojem poruch, které ve svém důsledku sníží trvanlivost a životnost stavební konstrukce a negativně ovlivní její funkčnost. Typickým příkladem je negativní vliv vlhkosti na pevnost materiálů (např. na bázi pálených cihel, vliv na mrazuvzdornost či tepelně technické parametry materiálů a konstrukcí. Kromě technických problémů má vlhkost také negativní vliv na hygienické parametry obytných prostor (růst plísní, bakterií), na náklady na vytápění a na vnitřní pohodu uživatel budov.

Vlhkostní vlastnosti přímo ovlivňují další materiálové parametry, jako je například objemová hmotnost, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, pevnost, objemová a délková deformace materiálů atd.

Z výše uvedených informací je zřejmé, že vlhkostní parametry stavebních materiálů hrají důležitou roli při návrhu i samotné realizaci stavebních konstrukcí a je nutné je zohlednit například i při skladování jednotlivých stavebních materiálů na staveništi. Podrobná znalost těchto parametrů stejně jako pochopení transportních mechanismů kapalné a plynné vlhkosti představují nezbytný předpoklad pro optimální a efektivní návrh stavebních konstrukcí.

Hovoříme-li o vlhkostních vlastnostech stavebních materiálů, popíšeme si nejdříve formy, v jakých se voda ve stavebních porézních materiálech vyskytuje. **Formy vlhkosti** můžeme rozdělit například následovně:

- volná voda (vyplňuje velké póry a dutiny),
- fyzikálně vázaná voda (van der Waalsovy síly),
- kapilární voda (tvoří výplň malých pórů a kapilár),
- adsorbovaná voda (vyplňuje nejmenší póry a pokrývá stěny porézního prostoru),
- chemicky vázaná voda (tvoří součást základní mřížky materiálů, např. jako voda krystalová).

Toto dělení vlhkosti nám poskytuje základní informace o tom, jakým způsobem je voda v materiálu „vázaná“, či jestli se vyskytuje ve formě **volné vody**. Jak již bylo řečeno, každá z těchto forem vlhkosti vykazuje zcela odlišné vlastnosti, které jsou při hodnocení vlhkosti stavebních hmot velmi často opomíjeny. Za volnou vodu považujeme část celkové vlhkosti v materiálu, jejíž vlastnosti jsou shodné nebo podobné vlastnostem čisté vody. Oproti tomu vázaná voda je část celkové vlhkosti materiálu, která je vázána **sorpčními silami** v materiálu a její vlastnosti jsou významně odlišné od vlastností čisté vody. Pro odstranění vázané vody z materiálu je nezbytné dodat materiálu odpovídající množství latentního tepla vypařování stejně jako sorpční teplo. Do množství vázané vody můžeme také zahrnout **hydratační a krystalizační vodu**. Jak již bylo řečeno, vázání vody v materiálu může být způsobeno chemickými, fyzikálně-chemickými a fyzikálními vazbami. **Chemická vazba** je bezesporu nejstálější. Molekula vody vázaná chemickými silami přímo v molekule stavební látky může být odstraněna pouze destrukcí materiálu doprovázenou změnou jeho chemické struktury a dalších vlastností. Mezi chemicky vázanou vodu patří například hydratační a krystalizační voda. Fyzikálně-chemické vazby jsou charakteristické pro vodu vázanou na povrch materiálu. Pevnost těchto vazeb je silně ovlivněna strukturou povrchu pórů materiálů. Typickými příklady fyzikálně-chemických vazeb jsou **van der Waalsovy síly a vodíkové vazby**. Tyto vazby jsme podrobně probrali v kapitole 2. Fyzikální vazby představují nejslabší typ vazby a nejmenší interakci molekul vody a pevné fáze matrice materiálu. Důsledkem fyzikální vazby jsou například kapilární síly, vyvolané povrchovým napětím vody a matrice materiálu. Pro stanovení formy, v jaké se voda v materiálu vyskytuje, je rozhodující rozměr pórů materiálů. Tato charakteristika také ovlivňuje, jakým způsobem a jak rychle se bude voda v materiálu transportovat.

Vlhkost stavebních hmot je možné rozdělit také podle **zdroje vlhkosti**, což je důležité zejména při provádění stavebně technických průzkumů a při následné sanaci objektů, které mají problémy se zvýšeným obsahem vlhkosti. Rozdělení vlhkosti podle jejího zdroje může být následující:

- vlhkost **výrobní** (technologická, počáteční) - dána mokkými procesy při výrobě materiálu,
- vlhkost **zemní** – transportována do materiálu na principu kapilárního vztlínání (významná v objektech bez horizontální izolace nebo s nefunkční hydroizolací)
- **sorpční** vlhkost – přijímána materiály z okolního vlhkého vzduchu,
- **zkondenzovaná voda**, která se sráží jak na povrchu, tak uvnitř materiálu (konstrukcí) – vodní páry z exteriérového vzduchu, vodní páry prostupující konstrukcemi obvodových plášťů,
- **provozní vlhkost** – závislá na typu využití prostorů, vytápění a větrání (chladicí haly, toalety, mokré průmyslové provozy, atd.),
- **vlhkost z vadných sanitárních rozvodů** (havarijní stavy konstrukcí rozvodů vody).

Je nutné také zmínit skutečnost, že obsah vlhkosti se ve stavebních materiálech v průběhu jeho zabudování do konstrukce mění, například v závislosti na změně hydrogeologických vlastností podzákladí, ročním obdobím, užívání budov atd.

4.3.1 Vlhkost – základní veličiny a vztahy

V této kapitole si uvedeme základní veličiny, které jsou pro hodnocení vlhkosti stavebních hmot používány, a vysvětlíme jejich definiční vztahy.

Nejčastější veličinou, která se používá pro kvantifikaci obsahu vlhkosti je **hmotnostní vlhkost**, definovaná následujícím vztahem

$$u = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100\% = \frac{m_k}{m_s} \cdot 100\% ,$$

kde u (kg/kg), (%), je hmotnostní vlhkost nejčastěji vyjadřovaná v procentech, m_v (kg) hmotnost vlhkého vzorku materiálu, m_s (kg) hmotnost suchého vzorku materiálu, m_k (kg) hmotnost kapaliny (v našem případě vody).

Další možností jak vyjádřit obsah vlhkosti v materiálu je veličina označovaná objemová vlhkost. Je popsána následující rovnicí

$$w = \frac{V_v}{V_s} \cdot 100\% = \frac{(m_v - m_s)}{\rho_v \cdot V_s} \cdot 100\% = \frac{u \cdot \rho_s}{\rho_v} \cdot 100\%,$$

kde V_v (m³) je objem vody, V_s (m³) objem suchého materiálu, ρ_v (kg/m³) objemová hmotnost vody za dané teploty, ρ_s (kg/m³) objemová hmotnost suchého materiálu.

Vlhkost může být definována také jako **stupeň nasycení**. Tato hodnota může být vyjádřena absolutně, nebo relativně v procentech, přičemž nikdy nemůže přesáhnout hodnotu 100%. Stupeň nasycení je definován vztahem

$$\Theta = \frac{w}{w_{sat}},$$

kde Θ (%) je stupeň nasycení, w (m³/m³) objemová vlhkost vzorku materiálu, w_{sat} (m³/m³) maximální možná objemová vlhkost materiálu (**nasycený obsah vlhkosti**). Veličinu nasycený obsah vlhkosti označovanou také jako **maximální nasákavost** budeme definovat v následujícím textu.

4.3.1.1 Transport vlhkosti

Chceme-li popsat a definovat principy transportu vlhkosti v porézních stavebních materiálech, musíme nejprve rozlišit transport plynné vlhkosti (vodní páry) a kapalnou vlhkost. Základním kritériem pro posouzení zda se voda v jednotlivém póru vyskytuje ve formě vodní páry nebo samostatné izolované molekuly, je **Knudsenovo číslo** Kn (-) definované vztahem

$$Kn = \frac{\lambda}{d},$$

kde λ (m) je střední volná cesta molekul vodní páry a d (m) průměr póru. Pro střední volnou cestu molekul vodní páry můžeme zapsat následující rovnici

$$\lambda = \frac{k_B \cdot T}{2^{5/2} \pi R_m^2 p},$$

kde $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K je Boltzmannova konstanta, πR_m^2 kolizní průřez molekuly (pro vodní páru je $2R_m = 4,6 \cdot 10^{-10}$ m), p tlak. Pro vodní páru za normálních atmosferických podmínek při teplotě $T = 293$ K dostáváme

$$\lambda = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{2^{5/2} \pi (2,3 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 10^5} = 4,3 \cdot 10^{-8} \text{ m}.$$

Pro Knudsenovo číslo $Kn \gg 1$ nemůžeme s určitostí hovořit o jednotlivé fázi vody v pórech, ale transport vlhkosti je realizován ve formě izolovaných molekul vody. Tento typ transportu je nazýván jako **efúze** či **Knudsenova difúze**.

Nabývá-li Knudsenovo číslo hodnot $\ll 1$, způsob transportu vodní páry v pórech je podobný toku vodní páry v kruhových kapilárách a může být popsán **Hagen-Poiseuilleovým** zákonem

$$j = \frac{Q_v \cdot \rho}{S} = -\frac{R^2}{8\eta} \cdot \frac{pM}{R_g T} \cdot \frac{dp}{dx},$$

kde Q_v (m³/s) je objemový tok vodní páry, S (m²) průřezová plocha póru, R (m) poloměr póru, η (kg/m s), M ($M = 0.018$ kg/mol) molární hmotnost vodní páry a R ($R = 8.3145$ J/mol K). Na základě výše uvedených vztahů by bylo možné odvodit rovnice pro výpočet toku vodní páry pro specifické intervaly Knudsenova čísla. Pro naše účely, jako stavebních inženýrů zabývajících se problematikou transportu vlhkosti v porézních materiálech, postačí definice vlhkostního toku pomocí fenomenologických vztahů odvozených na základě zákonů lineární nevratné termodynamiky. Pro transport plynů bylo zjištěno, že jejich hmotnostní tok je při absenci gradientu tlaku úměrný gradientu koncentrace, nebo-li gradientu částečné hustoty vodní páry. Tento vztah je znám jako **Fickův zákon**,

$$\vec{j} = -D \text{grad} c_{vp},$$

kde $\vec{j}$ (kg/m² s) je vektor hustoty toku vodní páry, D (m²/s) součinitel difúze pro vodní páru, c_{vp} (kg/m³) koncentrace vodní páry.

Při praktickém stanovení transportních parametrů stavebních materiálů pro vodní páru využíváme nejčastěji měření **součinitele propustnosti pro vodní páru** δ (s), který vyjadřuje schopnost materiálu propouštět vodní páru na principu difúze. Je nutné zdůraznit, že tento parametr není konstantní, ale je závislý na teplotě (se vzrůstem teploty stoupá), na rozdílu relativních vlhkostí prostředí, které daný materiál či konstrukci obklopují a na vlhkosti materiálu (se vzrůstající vlhkostí klesá). Součinitel propustnosti pro vodní páru, stejně jako další parametry používané pro hodnocení transportu vodní páry, je v přímé vazbě se množstvím, velikostí a propojeností pórů jednotlivých stavebních materiálů. Nejčastěji se stanovuje tzv. **miskou metodou** bez teplotního spádu. Ve stavebnictví se pro popis difúzních vlastností dále používá součinitel difúze pro vodní páru D (m²/s) definovaný vztahem

$$D = \frac{\delta \cdot R \cdot T}{M},$$

kde R (J/mol K) je univerzální plynová konstanta, T teplota (K) a M (kg/mol) molární hmotnost vody. Zejména pro hodnocení těsnosti stavebních materiálů z pohledu difúze vodní páry se používá také stanovení **faktoru difúzního odporu** μ (-), který v podstatě stanovuje, kolikrát je transport vodní páry materiálem pomalejší v porovnání s transportem vodní páry ve vzduchu

$$\mu = \frac{D_{vzduch}}{D},$$

kde D_{vzduch} (m²/s) je součinitel difúze vodní páry ve vzduchu. Pro vyjádření difúzních vlastností povrchových úprav, například sanačních omítek, nátěrových systémů apod., se často zavádí také veličina **ekvivalentní difúzní tloušťka materiálu** r_d (m)

$$r_d = \mu \cdot d,$$

kteřá je závislá na geometrii (tloušťce d materiálu). Číselně tato veličina popisuje, jakou tloušťku by musela mít vrstva vzduchu, aby měla stejný difúzní odpor jako definovaný stavební materiál.

Jak již bylo uvedeno v předcházejícím textu, voda se ve stavebním materiálu může vyskytovat také v kapalném skupenství. V tomto případě můžeme transport vlhkosti popsat například pomocí **sorptivity**. Experimentální stanovení sorptivity na základě absorpčního experimentu představuje pravděpodobně nejjednodušší způsob jak charakterizovat schopnost porézních materiálů absorbovat kapalnou vodu a transportovat ji pomocí kapilárních sil. Během posledních dvaceti let je možné v odborné literatuře zabývajících se problematikou transportu kapalné vlhkosti vysledovat celou řadu aplikací tohoto jednoduchého konceptu sorptivity. Na jejich základě je možné prohlásit princip měření sorptivity a absorpčního koeficientu pro kapalnou vodu za obecně uznávanou a metodicky dostatečně zvládnutou metodu pro charakterizaci transportu kapalné vody porézní strukturou materiálů.

Sorptivita S ($\text{m/s}^{1/2}$) je definována pomocí vztahu

$$I = S \cdot t^{1/2},$$

kde I (m) je kumulativní absorpce vody a t (s) čas odpovídající této absorpci. Výše uvedená rovnice představuje zjednodušení obecného vztahu pro kumulativní hmotnost vody vyjádřenou pomocí principu odmocniny času, který se běžně používá v teorii difúze. Získáme ji vydělením následujícího vztahu objemovou hmotností vody při specifické teplotě měření $\rho_w(T)$

$$i = A \cdot t^{1/2}.$$

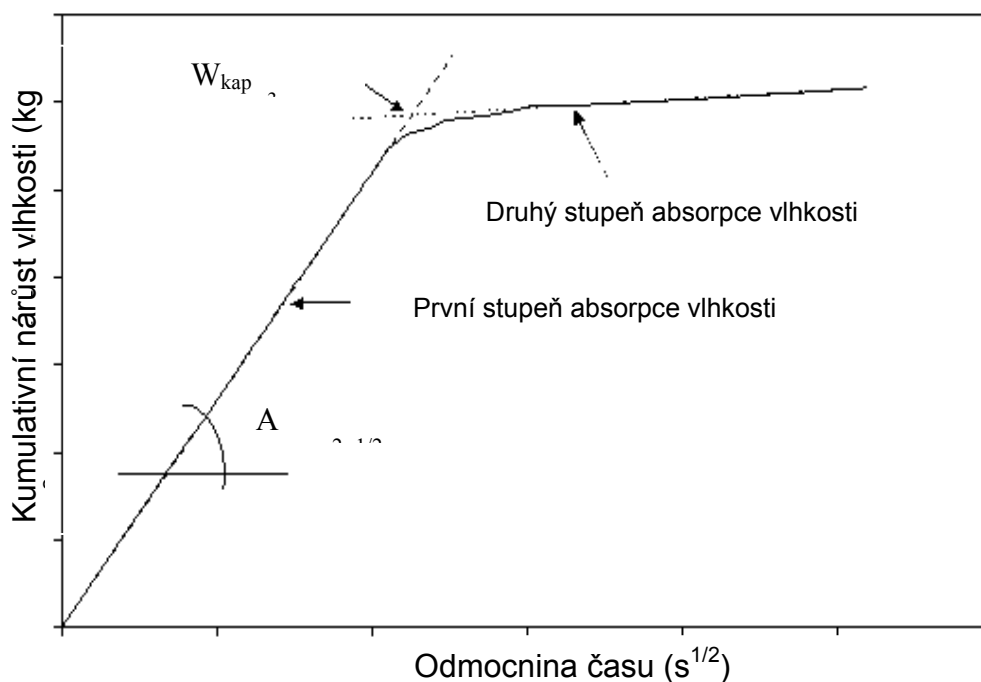
Zde i (kg/m^2) je **kumulativní hmotnost vody** a A ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$) **absorpční koeficient pro kapalnou vodu**. Vztah mezi sorptivitou a absorpčním koeficientem pro kapalnou vodu pak popíšeme rovnicí

$$A = S \cdot \rho_w(T).$$

Během vývoje metodiky měření byla vyvinuta celá řada experimentálních uspořádání. V současné době se používají v zásadě dva principy měření, manuální a automatický. Měřené vzorky jsou ve formě krychlí či trámečků a na obvodových stranách se vodotěsně a parotěsně

izolují z důvodu zajištění jednorozměrného transportu vlhkosti. Vzorky se poté dají do kontaktu s vodou, přičemž je nezbytné zajistit udržení stálé vodní hladiny. Za tímto účelem se nejčastěji používá Mariottova láhev. Hladina vody by neměla být více než 5 mm nad kontaktem vzorku s vodou. V případě manuálního měření je ve zvolených časových intervalech provedeno vážení vzorků, díky čemuž se stanoví přírůstek vlhkosti v materiálu jako funkce času. Každé manuální vážení by mělo být dokončeno přibližně do 30s. Autoři uvádějí, že minimální počet vážení při manuálním měření je pět, přičemž doporučují provést více měření. Při automatickém měření je základní uspořádání stejné s tím rozdílem, že je měřený vzorek zavěšen na automatické digitální váhy a nárůst jeho hmotnosti vlivem absorpce vody je zaznamenáván automaticky.

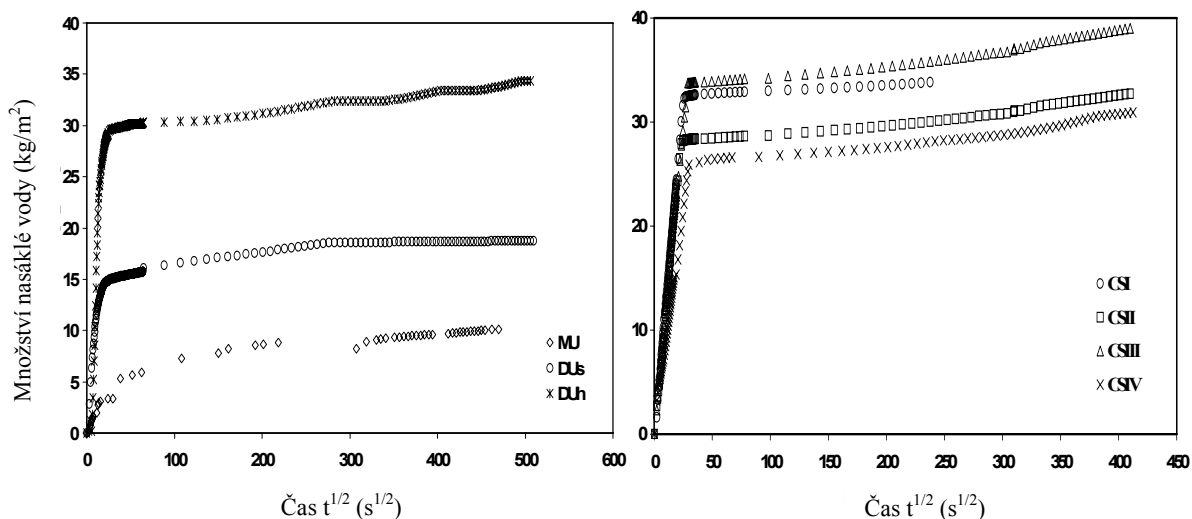
Manuální měření může v některých případech, především u materiálů s vyšší a rychlejší nasákavostí, vést k hodnotám sorptivity či absorpčního koeficientu podstatně menším než v případě měření automatického. Příčinou je přerušení kontaktu vzorku s vodou během vážení či příliš dlouhá doba vážení. Vyhodnocení experimentu se provádí následujícím způsobem. Na horizontální osu vyneseme odmocninu z času příslušného měření hmotnosti a na osu vertikální kumulativní obsah vlhkosti vztažený na plochu průřezu vzorku v kontaktu s vodní hladinou (viz. Obr. 4.10).



Obr. 4.10 Vyhodnocení absorpčního experimentu.

Z Obr. 4.10 je patrný průběh absorpce vlhkosti, při kterém můžeme rozlišit dva základní stupně. Během první fáze absorpce dochází k posunu vlhkosti po výšce vzorku k jeho opačnému konci vlivem kapilární sil. Z výsledků této části experimentu můžeme stanovit hodnotu absorpčního koeficientu pro kapalnou vlhkost A jako směrnicí vynesené závislosti a následně dopočítat hodnotu sorptivity S dle rovnice. Během druhé fáze dosáhla úroveň vlhkosti druhého konce vzorku a jakýkoli nárůst vlhkosti může být připsán pouze rozpuštění či difúzi uzavřeného vzduchu ve vodě. Na základě dosažení druhé fáze absorpce definujeme poté kapilární obsah vlhkosti w_{kap} (kg/m^3), který je roven obsahu vlhkosti při přechodu z první do druhé fáze absorpce.

Na Obr. 4.11a, b jsou jako příklad prezentovány typické křivky nasákavosti stanovené pro materiály na bázi minerální vlny a kalcium silikátu. Jedná se o materiály, které byly cíleně navrženy jako tepelná izolace pro vnitřní tepelně izolační systémy. Z obrázků je zcela patrné, v jaké míře jednotlivé materiály transportují kapalnou vlhkost. Minerální vlna MU byla vyrobena bez hydrofilní úpravy. Z tohoto důvodu transport kapalně vlhkosti byl podstatně pomalejší, než v případě vln DUs a DUh. U materiálu na bázi kalcium silikátu můžeme pozorovat vliv objemové hmotnosti (tím i pórovitosti) na transport vlhkosti. Typicky nejvyšší hodnoty transportu vlhkosti byly naměřeny pro materiály s nižší objemovou hmotností.



Obr. 4.11a, b Křivky nasákavosti pro minerální vlnu a kalcium silikát.

Stanovení absorpčního koeficientu pro kapalnou vodu a z něj odvozené sorptivity nám dává informace pouze o míře vlhkostního toku, ale nepodává žádné informace o distribuci vlhkosti

v materiálu. Z tohoto důvodu, za předpokladu že předpokládáme transport kapalně vlhkosti na principu difúze, popíšeme vlhkostní tok kapalně fáze vody opět pomocí **Fickovy difúzní rovnice**

$$\vec{j} = -\rho \cdot \kappa \cdot \text{grad}(u),$$

kde $\vec{j}$ ($\text{kg/m}^2 \text{ s}^{-1}$) je vlhkostní tok, ρ (kg/m^3) hustota materiálu, κ (m^2/s) součinitel vlhkostní vodivosti a u (kg/kg) hmotnostní vlhkost. Přímou aplikací této rovnice můžeme poté odvodit vztah pro výpočet součinitele vlhkostní vodivosti, který odvodil Kumaran

$$\kappa \approx \left(\frac{A}{w_{kap}} \right)^2,$$

kde w_{kap} (kg/m^3) je hodnota kapilární nasákavosti. Tento vztah je však možné použít pouze pro hrubý odhad součinitele vlhkostní vodivosti, například pro porovnání různých typů materiálů či efektivnosti jejich povrchových úprav navržených jako bariéra transportu vlhkosti. Ve skutečnosti je součinitel vlhkostní vodivosti funkcí obsahu vlhkosti. Kombinací Fickovy difúzní rovnice a rovnice kontinuity

$$\rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \text{grad}(\vec{j}) = 0,$$

získáme nelineární difúzní rovnici pro transport vlhkosti

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(\kappa(u) \text{grad}(u)),$$

kde je již součinitel vlhkostní vodivosti definován jako funkce obsahu vlhkosti. Tuto funkční závislost je nezbytné uvažovat například při počítačových simulacích transportu tepla a vlhkosti, neboť výrazně ovlivní celkovou bilanci vlhkosti v konstrukci. Pro stanovení součinitele vlhkostní vodivosti na vlhkosti je možné využít inverzní analýzu experimentálně stanovených křivek navlhání, které popisují distribuci vlhkosti v čase a ve specifické poloze při jednorozměrném uspořádání experimentu nasákavosti.

Transport kapalné vlhkosti v porézních stavebních materiálech neprobíhá pouze na principu difúze, ale důležitou roli zde hrají také **kapilární síly** vyvolané **povrchovým napětím kapaliny**. Typickým příkladem působení kapilárních sil je **vzlínavost**, resp. kapilární vedení vlhkosti. Kapilární síly působí mezi molekulami kapaliny a povrchem pevné látky, přičemž povrchové napětí kapaliny způsobuje pohyb sloupce kapaliny ve směru výslednice sil. Vzlinavost je projevuje při částečném ponoření porézních materiálu do kapaliny a je charakteristická pouze pro **vodou smáčivé materiály**, což převážná většina stavebních látek je. V předcházejících kapitolách jsme již pojem úhel smáčení definovali a nyní již víme, že vodou smáčivé materiály mají úhel smáčení $< 90^\circ$.

Maximální výška vzlinání je definována následující rovnicí

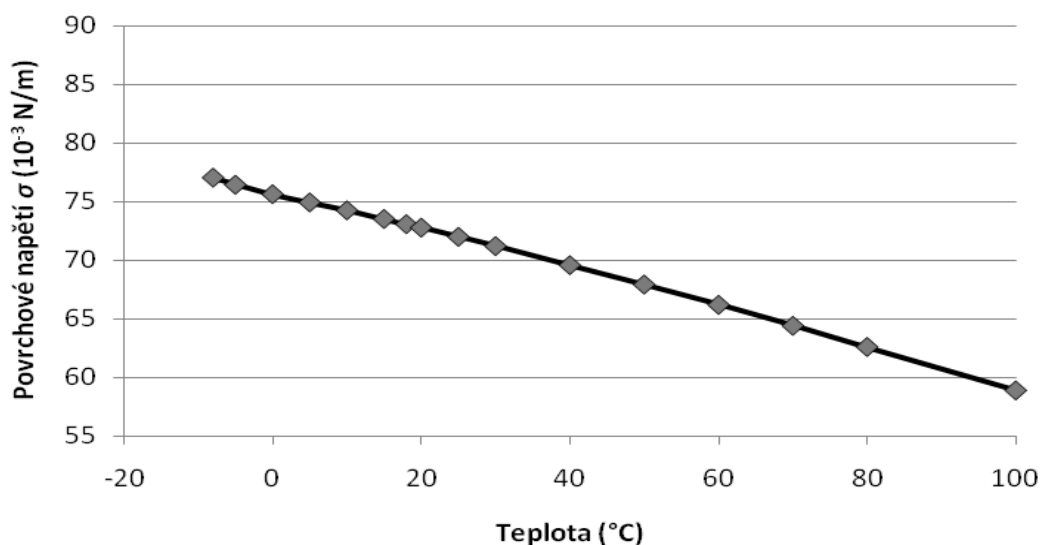
$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho_k \cdot g},$$

kde σ (N/m) je povrchové napětí kapaliny, θ ($^\circ$) úhel smáčení mezi kapalinou a stěnou kapiláry, r poloměr kapiláry (pro zjednodušení předpokládáme kruhový tvar pórů), ρ_k (kg/m³) objemová hmotnost kapaliny a g (m/s²) gravitační zrychlení. Materiály s většími póry nasákávají rychleji, ale výška vzlinutí je díky gravitaci nízká. Oproti tomu materiály jemně pórovité sají vodu pomaleji, avšak postupuje podstatně výše. Pro smáčivé kapaliny se $\cos \theta$ blíží 1, přičemž voda má povrchové napětí cca 0.073 N/m. Vztah pro výpočet maximální výšky vzlinání pro vodu můžeme tedy zjednodušit na formu

$$h = \frac{0,149}{r}.$$

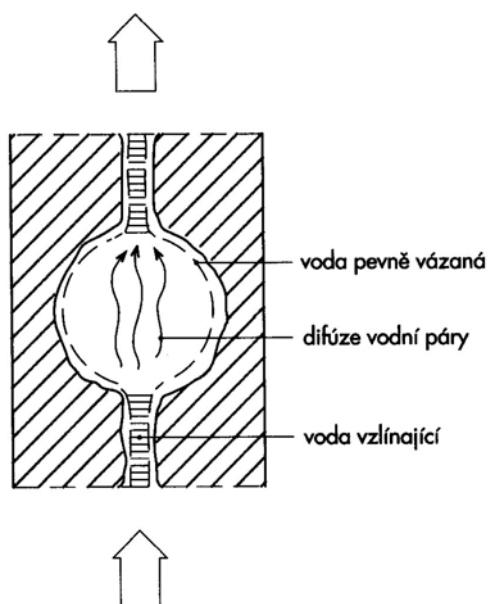
Uvedeme-li si jako praktický příklad běžné cihelné zdivo, kde se střední průměr rozměru pórů pohybuje kolem hodnoty 10^{-5} m, získáme maximální výšku vzlinání cca 1.49 m. Tuto hodnotu potvrzuje i praxe, neboť velká část starších cihelných objektů vykazuje výskyt zvýšené vlhkosti do výšky 1.5 m. V souvislosti s výškou transportu vlhkosti na principu výše popsané kapilární elevace souvisí také závislost povrchové napětí kapaliny na teplotě. Na Obr. 4.12 je zobrazena závislost povrchového napětí vody na teplotě. S nárůstem teploty povrchové napětí klesá a v důsledku toho klesne také hodnota výšky vzlinání. Na rychlost vzlinání má kromě velikosti pórů vliv také viskozita transportované kapaliny, která je opět

závislá na teplotě. V důsledku nárůstu viskozity dojde samozřejmě ke snížení rychlosti vztlínání.



Obr. 4.12 Závislost povrchového napětí vody na teplotě.

Dalším faktorem, který ovlivňuje rychlost a výšku vztlínání je tvar a propojení pórů. Tento problém vysvětluje Obr. 4.13.



Obr. 4.13 Schematické znázornění transportu vlhkosti v porézním systému – převzato z Balík M. a kolektiv 2005, *Odvhlčování staveb*, Grada Publishing a.s.

Voda hnaná kapilárními silami stoupá kapilárou, až dorazí k pórům většího průměru, které už vlivem gravitace není schopna překonat (kapilární zdvih je menší než výška kapiláry). Transport vlhkosti se však nezastaví, neboť dojde k částečnému odpaření vody na konci kapiláry a ta následně difunduje k protější stěně, kde vodní pára zkondenzuje a v kapalném stavu je vlhkost transportována dál do porézního systému materiálu. Mimo volné vody vzlíná po stěnách kapilár také vrstva pevně vázané vody v tloušťce několika molekul, která na povrchu pórů tvoří film o jiných vlastnostech než má volná voda (viz předcházející text).

S problematikou transportu vlhkosti a nasákavosti materiálu souvisí pojmy **nasákavost** a **maximální nasákavost**, které jsme použili již v předchozích definičních vztazích. Maximální nasákavost představuje maximální množství vlhkosti (ať již kapalné nebo plynné), které může materiál za specifických podmínek přijmout. Můžeme tedy definovat nasákavost po specifické době ponoření vzorku materiálu do kapaliny (v našem případě nejčastěji vody), například po 1 hodině, 24 hodinách atd. nebo svou maximální hodnotou, kdy všechny otevřené póry materiálu jsou již vyplněny vodou. Tyto hodnoty závisí na principu měření. Nejčastěji proto používáme pojem **kapilární nasákavost**, které je dosaženo při ponoření vzorku do vody na delší časový interval a množství vlhkosti v materiálu se stanoví po ustálení jeho hmotnosti. Dalším často používaným pojmem je **vakuová nasákavost**, kdy je všechen vzduch ze vzorku vytlačen pomocí vakua a uvolněné místo zaplní molekuly vody. Tato hodnota je obvykle vyšší než hodnota kapilární nasákavosti, na druhé straně představuje jistou idealizaci reálného působení materiálu. Hodnoty nasákavosti se vyjadřují buď v objemovém či hmotnostním tvaru (viz definice obsahu vlhkosti), případně jako podíl maximálního obsahu vody k objemu materiálu.

4.3.1.2 Akumulace vlhkosti

Kromě znalosti vlhkostních transportních parametrů je pro správný návrh konstrukcí a posouzení vhodnosti jednotlivých materiálových řešení nezbytná také znalost akumulčních parametrů vlhkosti.

Akumulace vody v plynném skupenství je označována jako **sorpce vlhkosti** a je možné ji definovat jako pohlcování vodní páry ze vzduchu porézní strukturou materiálu. Na základě principů, jakými je sorpce vodní páry realizována, můžeme rozlišit tři následující způsoby akumulace plynné vlhkosti:

- **adsorpce** – způsobena mezimolekulárními van der Waalsovými silami, kterými se navzájem přitahují molekuly pevných látek a vodní páry (adsorpce vede ke vzniku molekulárních vrstev vodní páry na stěnách pórů),
- **absorpce** – kapalná nebo plynná fáze se vstřebává difúzí a vedením vlhkosti dovnitř tuhé fáze,
- **chemisorpce** – uplatnění chemických vazeb vody a tuhé fáze materiálu.

Stejně jako při transportu vodní páry, ani v případě její akumulace není její hodnota stálá. Z tohoto důvodu zavedeme pojem **rovnovážná sorpční vlhkost**, při které materiál nevykazuje v čase přírůstek ani úbytek vlhkosti. Dalším, ve stavebním výzkumu a praxi, velmi často používaným pojmem je **hygroskopická vlhkost**, které vzniká v materiálu tehdy, je-li okolní vzduch plně nasycen vodními parami. Můžeme ji také nazvat pojmem maximální rovnovážná sorpční vlhkost. Obě tyto veličiny bývají vyjadřovány nejčastěji v hmotnostní formě, i když se můžeme setkat i formou objemovou.

Pro popis sorpční schopnosti materiálu se experimentálně stanovují **sorpční** (resp. desorpční) **izotermy**, které vyjadřují závislost mezi obsahem vlhkosti v materiálu a relativní vlhkostí prostředí, jemuž je materiál vystaven. Při popisu sorpce vlhkosti můžeme rozlišit dvě základní fáze sorpčního procesu, konkrétně povrchovou adsorpci při nižších hodnotách relativní vlhkosti a tzv. **kapilární kondenzaci**, ke které dochází u pórů o rozměrech 2 – 50 nm při relativní vlhkosti vyšší než 40%.

Princip sorpce vodní páry je podrobně vysvětlen na Obr. 4.14, kde jsou prezentovány běžné tvary sorpčních a desorpčních křivek. Jak již bylo řečeno, při nižších hodnotách relativní vlhkosti dochází k molekulární adsorpci molekul vody na stěny porézního prostoru, následuje multi-molekulární adsorpce a v poslední fázi v důsledku nárůstu relativní vlhkosti dojde až ke vzniku kapilární kondenzace.

Multi-molekulární adsorpci můžeme popsat pomocí BET izotermy

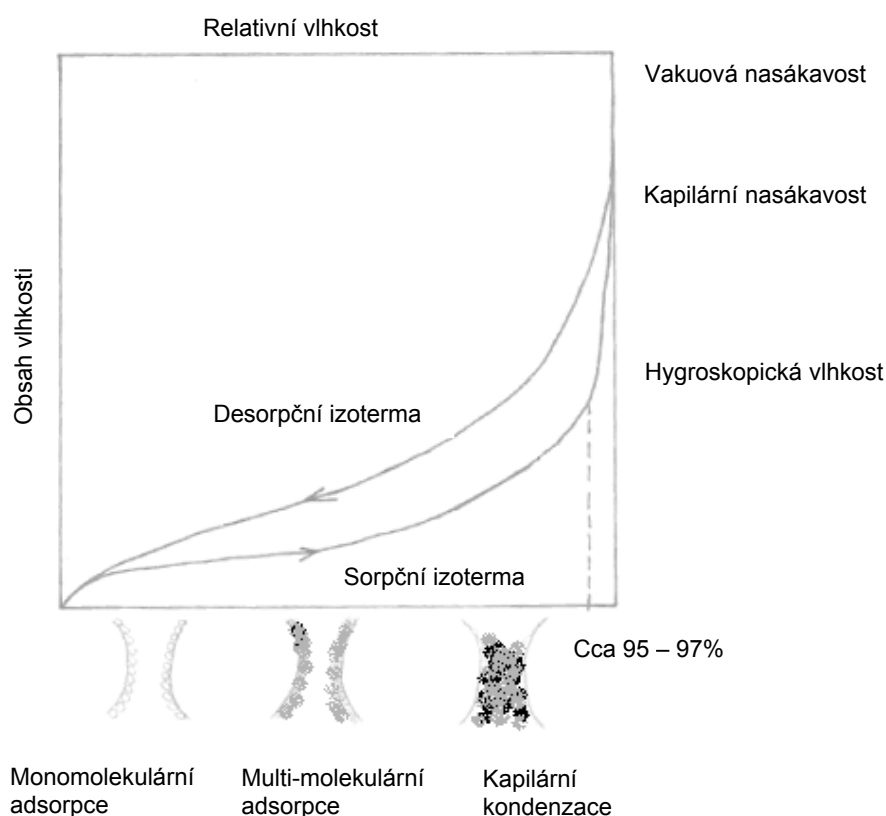
$$mv = \frac{m_{vl} \cdot K \cdot \varphi}{1 - \varphi} \left(\frac{1 - (n+1) \cdot \varphi^n + n \cdot \varphi^{n+1}}{1 + (C-1) \cdot \varphi - C \cdot \varphi^{n+1}} \right),$$

kde φ (-) je relativní vlhkost, m_v a m_{vl} (kg) jsou hmotnosti adsorbované vlhkosti při monomolekulární a multi-molekulární adsorpci, n je počet vrstev adsorbovaných molekul a K je konstanta. Parametr C může být určen z následující rovnice

$$C = K \exp\left(\frac{Q_{vv} - l}{RT}\right),$$

kde Q_{vv} (J/mol) je vazebné teplo monomolekulární vrstvy, l (J/mol) je latentní teplo kondenzace, R (J/mol K) univerzální plynová konstanta a T (K) teplota.

Na obrázku je zobrazena také hodnota hygroskopické vlhkosti, do které charakterizujeme akumulaci vlhkosti v materiálu pomocí sorpčních izoterm. Po překročení této hodnoty (pro oblast nadhygroskopické vlhkosti) se k popisu akumulace vlhkosti používají **retenční křivky vlhkosti**.



Obr. 4.14 *Princip sorpce vodní páry.*

V nadhygroskopické oblasti je tedy dominantní transport kapalně vlhkosti, přičemž retenční křivky vyjadřují závislost obsahu vlhkosti a kapilárního tlaku v pórech indukovaného přítomností vlhkosti. Pomocí Kelvinovy rovnice můžeme sjednotit sorpční izotermu a

retenční křivku do jednotné akumulční funkce vlhkosti specifického stavebního materiálu. Kelvinova rovnice je definována vztahem

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{vs}} = \exp\left(-\frac{p_k}{\rho_k RT}\right),$$

kde φ (%) relativní vlhkost, p_k (Pa) kapilární tlak, p_v a p_{vs} (Pa) tlak vodní páry a nasycené vodní páry, ρ_k hustota kapaliny (vody), R (J/mol K) univerzální plynová konstanta, T (K) teplota. Hodnotu p_{vs} můžeme získat z **Clausius-Clapeyronovy rovnice**, která definuje změnu tlaku při změně teploty při fázovém přechodu mezi dvěma stavy hmoty.

Přehled závislosti kapilárního tlaku, relativní vlhkosti a rozměru pórů je uveden v Tab. 4.2. Z tabulky je evidentní, do jakého rozsahu kapilárních tlaků a relativních vlhkostí popisujeme akumulaci vlhkosti buď sorpčními izotermami, nebo retenčními křivkami.

Tab. 4.2 *Vztah kapilárního tlaku, relativní vlhkosti a rozměru pórů (uvažujeme póry kruhového průřezu).*

Mikropóry			Makropóry				
10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³
Průměr pórů [m]							
10 ⁺⁴	10 ⁺³	10 ⁺²	10 ⁺¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	
Kapilární tlak [bar]							
0.05	0.60	0.93	0.99				
Relativní vlhkost [-]							
Sorpční izoterma			Retenční křivka				

Pro měření sorpčních izoterm je nejčastěji využíváno exsikátorů s nasycenými roztoky solí (například LiCl, K₂CO₃, K₂SO₄), které slouží pro simulaci specifických hodnot relativní vlhkosti. Vysušené vzorky měřeného materiálu jsou umístěny do exsikátorů, kde jsou ponechány až do ustálení jejich hmotnosti. Pro dosažení požadované hodnoty je možné využít také klimatických komor s možností regulace teploty a relativní vlhkosti.

Pro měření retenčních křivek je používána speciální přetlaková aparatura, do které jsou umístěny plně nasycené vzorky materiálu. Aplikovaným přetlakem (v podstatě kapilární tlak) vytlačujeme následně vodu ze vzorků až do ustálení hmotnosti, čímž pro specifický aplikovaný tlak získáme jeden bod retenční křivky.

Obě tato měření jsou vysoce časově náročná a je nezbytné udržet po dobu měření v laboratoři konstantní laboratorní podmínky, neboť jak sorpční izotermy, tak retenční křivky jsou závislé na teplotě. Sorpční vlastnosti mohou být dále ovlivněny přítomností **hygroskopických solí** v porézní struktuře materiálu, díky čemuž dojde k nárůstu hodnot obsahu vlhkosti na sorpční křivce pro stejné hodnoty relativní vlhkosti. Této problematice se budeme podrobně věnovat v kapitole 10.

4.4 Tepelné vlastnosti materiálů

Parametry popisující transport a akumulaci tepla ve stavebních materiálech představují nezbytnou informaci pro návrh stavební konstrukce z pohledu její tepelně-technické funkce. Zejména v současné době, která je charakteristická stále se zvyšujícími náklady na vytápění, představuje znalost těchto parametrů základní předpoklad pro návrh energeticky úsporného řešení budov.

Než se pustíme do konkrétního popisu jednotlivých tepelných parametrů, je nezbytné si připomenout, jak se teplo v materiálech šíří. V závislosti na fyzikální podstatě jevů, kterými je teplo transportováno, můžeme rozlišit tři základní principy jeho přenosu:

- vedením (kondukcí) v látkách,
- prouděním (konvekci) látek,
- zářením (radiací).

Přenos tepla vedením probíhá ve spojitém látkovém prostředí. Stavební částice látky si předávají svou kinetickou energii neuspořádaných tepelných pohybů, která se tímto způsobem přenáší z míst o vyšší teplotě do míst o nižší teplotě látky. Vedení tepla probíhá v látkách pevných, kapalných i plynných.

Transport tepla prouděním látky je vázán také na spojitě látkové prostředí s tím rozdílem, že je omezen pouze na tekutiny, tj. kapaliny a plyny. Samovolné proudění je vyvoláno tím, že se ohříváním v důsledku roztažnosti zmenšuje hustota látek. Pokud vznikne mezi místem ohřevu

a místem ochlazení v tekutině teplotní rozdíl, ohřívána část tekutiny stoupá při vytlačování ochlazené těžší části. V kapalinách a zvláště v plynech přenos tepla prouděním převažuje nad přenosem tepla vedením.

Dochází-li k přenosu tepla zářením, nevyžaduje látkové prostředí. Teplo je transportováno elektromagnetickým zářením, přičemž dochází k energetické výměně mezi plochami o různé teplotě. V případě, že je přenos tepla zprostředkováván převážně infračerveným zářením (vlnová délka 760 nm – 1 mm), nazývá se tento přenos sálání.

Jelikož jsou stavební materiály převážně porézní nebo mezerovité, je nutné vzít v úvahu, že kromě přenosu tepla vedením, dochází v jejich porézní struktuře také k přenosu tepla prouděním a zářením. Proudění plynů či par je nutné brát v úvahu zejména u větších pórů. Na protilehlých stranách pórů pak dochází také k sálání.

Způsob šíření tepla materiálu je závislý především na následujících faktorech:

- pórovitosti (velikosti a distribuci pórů) a objemové hmotnosti,
- struktuře (uspořádání vnitřní struktury materiálů),
- teplotě,
- typu materiálu (kov, nekov),
- vlhkosti obsažené v porézním systému materiálu.

Kromě skutečnosti, že ve stavebních materiálech dochází k transportu tepla a jeho akumulaci, tepelná energie přidaná materiálu způsobuje změnu jeho teploty, která je doprovázena změnami jeho rozměrů (objemu), změnou pevnosti, tažnosti a dalších parametrů. Objemové změny vyvolané změnou teploty mohou vést, v závislosti na mechanických pevnostních charakteristikách materiálu, ke vzniku trhlin. Tento problém je markantní především u souvrství materiálů o různé teplotní roztažnosti. Tepelná energie může v materiálu vyvolat i další změny, například chemické, které mohou vést až k tepelné dekompozici materiálu. Typickým příkladem je ztráta krystalové vody sádry, která se vlivem zvýšené teploty nejprve mění na hemihydrát síranu vápenatého (při teplotě 73°C) a při dalším nárůstu teploty na dihydrát síranu vápenatého, který již postrádá mechanickou pevnost. Tepelná dekompozice materiálů však není závislá pouze na teplotě, ale také na době, po kterou je materiál zvýšené teplotě vystaven.

Dle českých tepelně technických norem dělíme tepelné materiálové parametry na tepelně-fyzikální veličiny a tepelně-technické veličiny. Tepelně-fyzikální veličiny charakterizují přímo specifický stavební materiál a jsou odvozeny na základě fyzikálních jevů, ke kterým dochází při transportu, akumulaci a nárůstu teploty. Na druhé straně tepelně-technické veličiny popisují vlastnosti stavební konstrukce a jsou vypočteny na základě znalosti tepelně fyzikálních veličin.

Tepelné materiálové parametry dále můžeme dělit na akumulační (popisují akumulaci tepla), transportní (definují rychlost a míru transportu tepla) a mechanické (charakterizují teplotní změny látek).

4.4.1 Součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná vodivost

Měrná tepelná vodivost je jeden ze základních tepelně-fyzikálních parametrů stavebních materiálů. Vyjadřuje schopnost příslušného materiálu vést teplo za podmínek, že v materiálu jsou místa s teplotním gradientem. Je definována jako tepelný výkon (W) procházející plochou 1 m^2 do vzdálenosti 1 m při jednotkovém teplotním gradientu (K). Transport tepla můžeme jednoduše popsat například **Fourierovým vztahem**

$$q = -\lambda \text{grad}(t),$$

kde $q \text{ (W/m}^2\text{)}$ je vektor hustoty tepelného toku, $\lambda \text{ (W/m K)}$ součinitel tepelné vodivosti a $t \text{ (K)}$ teplota. Rychlost přenosu tepla se vyjadřuje veličinou zvanou tepelný výkon, který je definován následujícím vztahem

$$I_q = \frac{dQ}{d\tau},$$

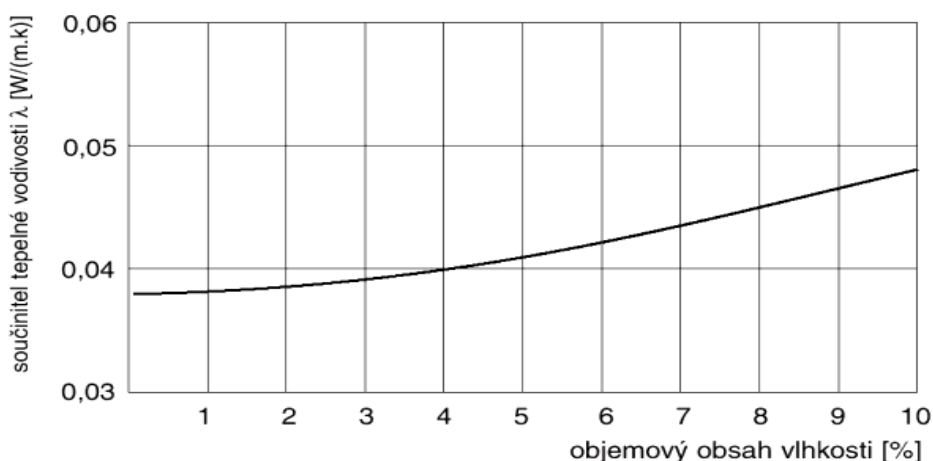
kde $Q \text{ (J)}$ je množství přenášeného tepla za příslušný čas t (nejčastěji h), $I_q \text{ (W)}$ je tepelný výkon.

Součinitel tepelné vodivosti není pro žádný materiál konstantní, ale vykazuje závislost na struktuře látky, pórovitosti, teplotě, tlaku, vlhkosti, stlačení měkkých látek, sytné hmotnosti atd. Výrazný vliv vlhkosti na součinitel tepelné vodivosti je způsoben skutečností, že kapalná voda, která může z určitých podmínek vyplňovat póry materiálů, má součinitel tepelné vodivosti při 20°C roven hodnotě 0.58 W/m K . Tato hodnota je cca 25x vyšší než hodnota

tepelné vodivosti vzduchu (0.025 W/m K), který je v podstatě nositelem tepelně izolačních vlastností stavebních materiálů. Při vyšší přítomnosti kapalné vody v pórech materiálu může také dojít k nárůstu transportu tepla prouděním. Další negativní vliv vlhkosti na tepelnou vodivost se projeví při zmrznutí kapalné vody, neboť součinitele tepelné vodivosti ledu je roven hodnotě 2.2 W/m K při teplotě 0°C. Podstatný nárůst součinitele vlhkostní vodivosti vlivem zvýšeného obsahu vlhkosti má významné důsledky při praktickém provádění konstrukcí, zejména tepelných izolací. Je třeba počítat s tím, že návrhové hodnoty použité ve výpočtech vycházejí z hodnot součinitele tepelné vodivosti naměřeného na zcela vysušených vzorcích, přičemž v závislosti na způsobu skladování materiálu vždy obsahují určitou sorpční vlhkost, která má také vliv na nárůst tepelné vodivosti. Při návrhu konstrukcí a konstrukčních detailů je tedy nutné počítat se součinitelem tepelné vodivosti, který odpovídá praktické vlhkosti materiálu. V českých technických normách je vyjádřena změna součinitele tepelné vodivosti v závislosti na nárůstu vlhkosti pomocí **vlhkostního součinitele materiálu** Z_u (-)

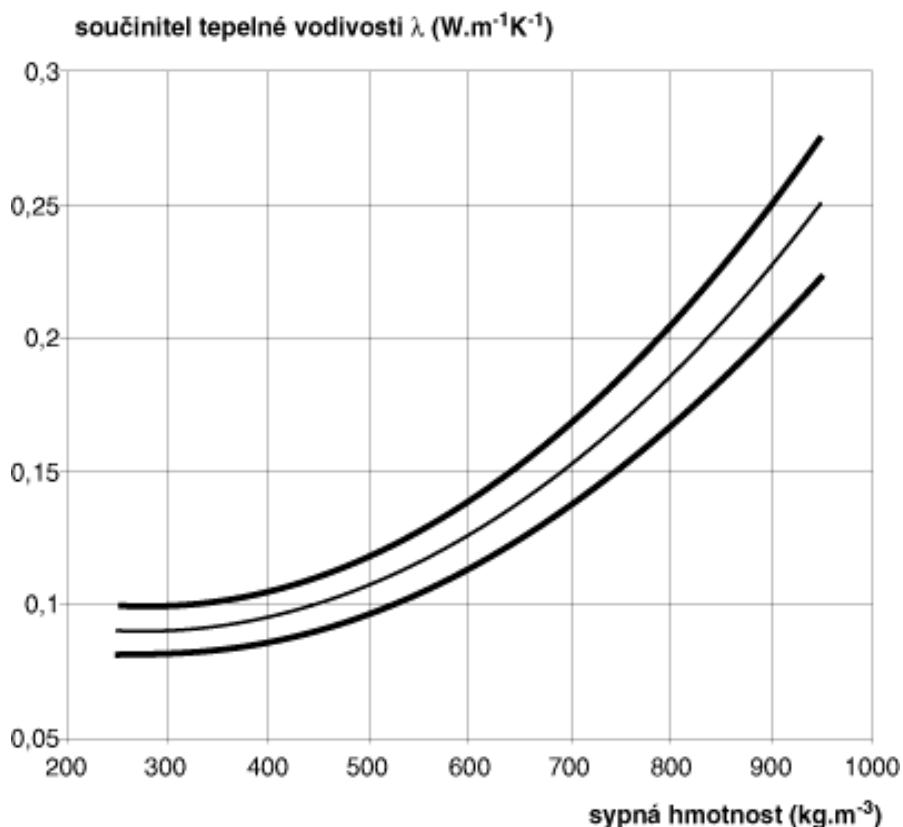
$$Z_u = \frac{a}{\lambda_k},$$

kde a je součinitel regresní lineární závislosti součinitele teplotní vodivosti na hmotnostní vlhkosti (směrnice závislosti) λ_k charakteristická hodnota součinitele tepelné vodivosti stanovená normovým postupem. Typická závislost součinitele tepelné vodivosti na objemové vlhkosti je pro materiál na bázi expandovaného polystyrenu prezentována na Obr. 4.14. Data byla naměřena na vzorcích EPS o objemové hmotnosti 16 kg/m³. Přestože se jedná o velmi málo nasákový materiál, je z grafu patrná exponenciální závislost vlhkostní vodivosti na vlhkosti.



Obr. 4.15 Závislost součinitele tepelné vodivosti na obsahu vlhkosti desek EPS.

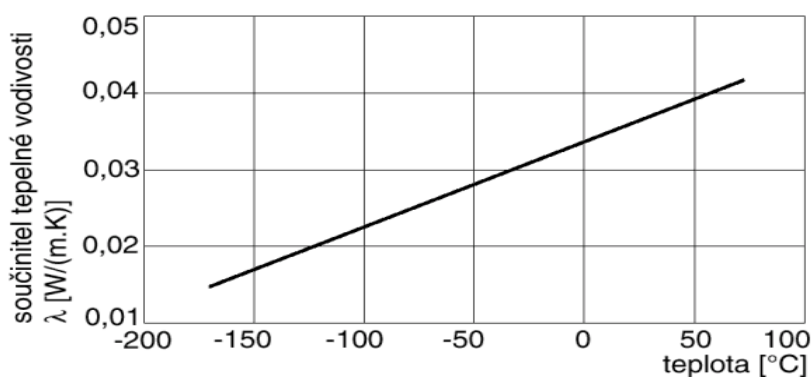
Jak jsme již uvedli výše, měrná tepelná vodivost materiálů je závislá také na objemové hmotnosti, stejně jako na sypné hmotnosti zrnitých a sypkých materiálů. Pro tepelně izolační vrstvy podlah či stropů se velmi často používají zásypu z Liaporu, který je následně, ve vazbě na mechanické vlastnosti, hutněn na požadovanou sypnou hmotnost. Proto na Obr. 4.15 uvádíme závislost jeho tepelné vodivosti na sypné hmotnosti pro různé druhy Liaporu.



Obr. 4.16 Závislost součinitele tepelné vodivosti Liaporu na sypné hmotnosti.

U materiálů, které mají pravidelně uspořádanou vnitřní strukturu, závisí součinitel tepelné vodivosti na směru, v jakém je teplo materiálem transportováno. Typickým příkladem jsou například materiály na bázi minerální vlny, skelné vlny, lamináty s výztuží ze skelných vláken, či samotné dřevo. Například tepelná vodivost dubu je ve směru kolmo na vlákna tvořící jeho strukturu rovna hodnotě 0.23 W/m K , přičemž ve směru transportu tepla rovnoběžně s vlákny nabývá hodnoty 0.41 W/m K . Z tohoto důvodu je třeba vždy při návrhu materiálů určených především pro tepelně izolační účely zohlednit také jejich následné umístění ve stavební konstrukci.

Kromě výše popsaných parametrů, které významnou měrou ovlivňují tepelnou vodivost materiálů, hraje důležitou roli při praktické aplikaci stavebních materiálů také teplota, které mohou být během své životnosti vystaveny. Jelikož u porézních materiálů dochází se zvyšováním teploty k intenzivnějšímu sálení v pórech, je zcela evidentní, že dojde také k nárůstu součinitele tepelné vodivosti. Tato funkční závislost je důležitá zejména u materiálů, které mají plnit funkci tepelné izolace za vyšších teplot, případně u materiálů pro vysokoteplotní aplikace (vláknové cementové kompozity, žárobeton atd.). Oproti tomu při poklesu teploty dochází k poklesu tepelné vodivosti, což je výhodné zejména pro materiály vnějších tepelně izolačních systémů budov, izolací střech apod. Na Obr. 4.16 je zobrazena teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě pro expandovaný polystyren. Vidíme, že při vystavení teplotám pod bod mrazu dochází k poklesu tepelné vodivosti, v porovnání s měřeními prováděnými v běžných laboratorních podmínkách. Je tedy možné očekávat, že oproti návrhovým vlastnostem se za optimálních podmínek reálné stavební konstrukce bude chovat materiál lépe, než jsme předpokládali na základě laboratorních měření.



Obr. 4.17 Závislost součinitele tepelné vodivosti EPS desky na teplotě, měřeno na zkušebních tělesech o objemové hmotnosti 20 kg/m^3 .

Pro měření součinitele tepelné vodivosti je možné použít celou řadu metod, které je možné rozdělit podle způsobu, jakým se v měřeném vzorku materiálu vytváří teplotní pole na metody:

- stacionární (měření probíhá za stálého tepelného výkonu),
- nestacionární (tepelný výkon se během měření mění).

Metody založené na ustáleném stavu jsou z hlediska měření exaktnější, jednodušší a spolehlivější než metody měřící v neustáleném stavu. Na druhé straně je dosažení ustáleného teplotního stavu časově náročné a to i při měření relativně malých vzorků. Při měření vlhkých

vzorků může navíc v čase dojít k redistribuci vlhkosti a tím k ovlivnění tepelné vodivosti zkoušeného vzorku. Ze stacionárních metod uvedeme výběrem pouze metodu **Dr. Bocka**, **Poensgenovu metodu** a **Poensgen-Eriksonovu metodu**. Z nestacionárních metod je nezbytné zmínit **metodu horkého drátu** a **transientní impulsní metodu**.

4.4.2 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita materiálu může být vztažena na kg látky, poté se nazývá měrná, nebo na m³ látky, a poté je označována jako objemová. Měrná tepelná kapacita je fyzikální veličina, kterou je možné definovat jako množství tepla, které je nutné dodat 1 kg látky, aby se ohřál o 1 K. Je popsána následujícím vztahem

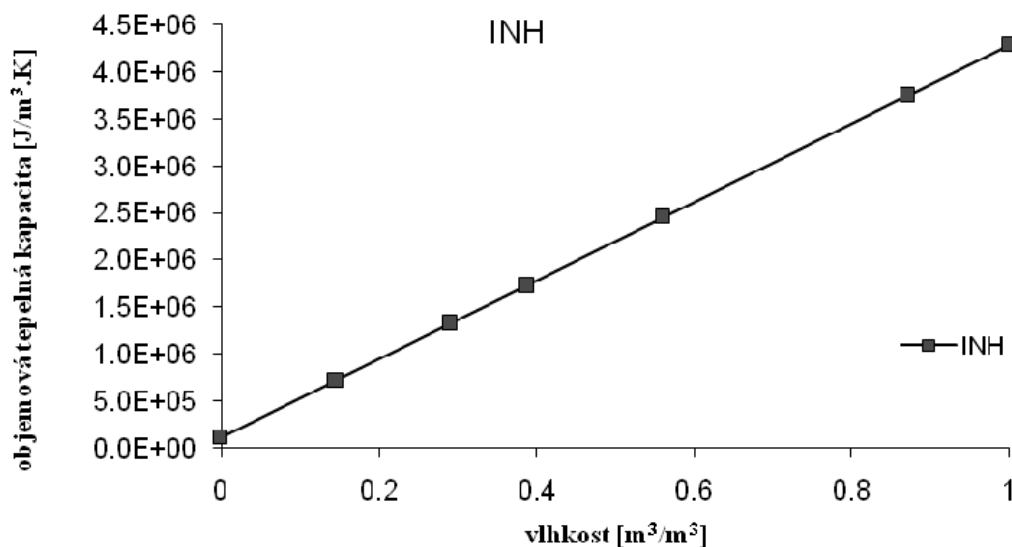
$$c_x = \frac{1}{m} \left(\frac{dQ}{dT} \right)_x,$$

kde c_x (J/kg K) je měrná tepelná kapacita, m (kg) hmotnost látky, Q (J) množství tepla, T (K) teplota. Index x značí druh termodynamické změny stavu, při níž je tělesu přiváděno teplo (konstantní tlak c_p , objem c_v). Nemění-li se při dodávání tepla látce její objem, dodané teplo pouze zvyšuje vnitřní energii látky a její teplota roste. Může-li se při ohřívání látky objem látky zvyšovat, koná látka při rozpínání práci a tuto práci je nutné krýt dalším dodáním tepla. Jelikož je u pevných látek a u kapalin rozpínavost nepatrná a energie, nutná k vykonání práce rozpínajícího se tělesa proti okolí, je vzhledem k teplotě potřebnému k ohřátí tělese neporovnatelná, nerozlišujeme u stavebních materiálů c_p a c_v a mluvíme pouze o měrné tepelné kapacitě. Tento předpoklad je možné zavést pro atmosférické teploty, při vysokých teplotách se c_p a c_v liší až o několik procent.

Měrná tepelná kapacita je veličina, která je vysoce závislá na změně vlhkosti a teploty. S nárůstem vlhkosti roste také měrná tepelná kapacita. Jelikož se jedná o aditivní veličinu, můžeme pro vyjádření její funkční závislosti na vlhkosti použít jednoduché směšovací pravidlo,

$$c = (c_0 + c_w \cdot u) / (1 + u),$$

kde c (J/kg K) je měrná tepelná kapacita vlhkého materiálu, c_w měrná tepelná kapacita vody (cca 4182 J/kg K při 20°C), u (kg/kg) hmotnostní vlhkost a c_o (J/kg K) měrná tepelná kapacita suchého materiálu. Na Obr. 4.18 je pro názornost ukázána závislost měrné tepelné kapacity materiálu na bázi hydrofilní minerální vlny na vlhkosti.



Obr. 4.18 Vliv vlhkosti na měrnou tepelnou kapacitu materiálů na bázi minerální vlny.

Závislost měrné tepelné kapacity pevných látek na teplotě při konstantním objemu je popsána Debyeovou funkcí, která od teploty absolutní nuly vzrůstá jako T^3 (cca do teploty 50 K). Nad touto teplotou je průběh měrné tepelné kapacity při stálém objemu popsán Debyeovou funkcí odvozenou z kvantové mechaniky. V oblasti nad tzv. Debyeovou teplotou (u běžných kovů nad 200°C) se Debyeova funkce blíží hodnotě 24.9 J/K mol.

Měření tepelné kapacity je založeno na **zákonu zachování tepla**: v uzavřené tepelně izolované soustavě se tepla přijatá studenějšími tělesy rovnají teplům odňatým teplejším tělesům za předpokladu, že tělesa nemění svá skupenství, nepůsobí na sebe chemicky a nevykonávají při tomto procesu žádnou vnější mechanickou práci. Podle tohoto zákona musí platit tzv. **kalorimetrická rovnice**

$$\sum m_i \cdot c_i \cdot t_i = t \sum m_i \cdot c_i,$$

kde m_i jsou hmotnosti jednotlivých systémů, c_i jejich příslušné měrné kapacity, t_i jejich teploty a t jejich teplota po vyrovnání teplot. Výše uvedená rovnice je výchozím vztahem pro

kalorimetr, což je zařízení opatřené teploměrným zařízením pro stanovení tepelné kapacity. Podle tepelné vodivosti stěn můžeme kalorimetry dělit na **izotermické** a **adiabatické**. Izotermické kalorimetry mají mezi vnitřní a vnější částí dokonale tepelně vodivé stěny, takže měřené teplo z prostoru odchází a je následně nějakým způsobem indikováno. Klasickým příkladem izotermického kalorimetru je **kalorimetr ledový**, kde dodávané teplo vyvolá tání ledu ve vnější části kalorimetru. Množství roztátého ledu je poté úměrné měřenému teplu. Adiabatické kalorimetry mají stěny dokonale tepelně izolovány od okolí, takže dodané teplo způsobí nárůst teploty uvnitř kalorimetru. V praxi existuje mnoho různých úprav adiabatických kalorimetrů, přičemž velmi často se používá **směšovacího kalorimetru**. Použijeme-li pro stanovení měrné tepelné kapacity materiálu směšovacího kalorimetru, vyjdeme z následujícího vztahu

$$c = \frac{m_v \cdot c_v + v_k}{m} \cdot \frac{T - T_1}{T_2 - T},$$

kde c (J/kg K) je hledaná měrná tepelná kapacita měřené látky, m_v (kg) hmotnost kapaliny (nejčastěji vody) v kalorimetru, c_v (J/kg K) měrná tepelná kapacita vody, v_k (J/kg K) vodní hodnota kalorimetru, m (kg) hmotnost vzorku měřené látky, T (K) konečná teplota lázně kalorimetru, T_1 (K) počáteční hodnota lázně kalorimetru, T_2 (K) teplota vzorku před vhozením do kalorimetru. Vodní hodnota kalorimetru se stanoví při kalibračním měření dle rovnice

$$v_k = \frac{1}{4,1868} (M_2 - M_1) \cdot \frac{T_2 - T_1 - T}{\Delta T} - (M_1 - M_k),$$

kde M_k (kg) je hmotnost suchého kalorimetru, M_l (kg) je hmotnost kalorimetru naplněného vodou do $\frac{1}{2}$ objemu, M_2 (kg) hmotnost kalorimetru zcela naplněného vodou, T_l teplota kalorimetru na počátku měření, T_2 teplota ohřáté vody.

4.4.3 Teplotní délková a objemová roztažnost

Mezi nejdůležitější tepelné vlastnosti stavebních materiálů patří kromě měrné tepelné vodivosti a tepelné kapacity také teplotní délková a objemová roztažnost. Tyto vlastnosti v mnoha případech rozhodují o specifické aplikaci stavebních materiálů.

Dle představ o molekulové stavbě látek, souvisí teplota se střední kinetickou energií neuspořádaného pohybu molekul. Zvyšuje-li se tato energie, zaujímá zpravidla soubor těchto

částic větší prostor. Tento fakt se projeví makroskopicky tím, že látka s rostoucí teplotou zvětšuje objem a její povrch plochu. Pokud je materiálu ve zvětšování objemu bráněno, dochází v něm k růstu napětí, které v závislosti na mechanické pevnosti může způsobit jeho destrukci. Při hledání závislosti objemu látek na teplotě je tedy třeba dbát na to, aby se látka nacházela v konstantním vnějším tlaku.

Teplotní objemové změny materiálů se popisují obvykle součinitelem objemové teplotní roztažnosti γ (K^{-1})

$$\gamma = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p,$$

kde V (m^3) je objem tělesa, $\frac{\partial V}{\partial T}$ teplotní změna objemu a index p znamená, že ke změně objemu došlo za nezměněného tlaku. Je nutné poznamenat, že hodnota γ je funkcí teploty, i když je tato závislost v rozsahu běžných atmosférických podmínek často zanedbávána. Protože ve stavebních konstrukcích převažuje většinou jeden prostorový rozměr, používá se k posouzení vlivu teploty na rozměry materiálu součinitel délkové teplotní roztažnosti α (K^{-1}) určený vztahem

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_p,$$

kde l (m) je délkový rozměr tělesa a $\frac{\partial l}{\partial T}$ jeho teplotní změna. Také tato veličina je závislá na teplotě, což je důležité zejména pro materiály určené pro vysokoteplotní aplikace. Pro **izotropní materiály**, které mají ve všech směrech stejnou roztažnost, lze vzhledem k tomu, že $V = B \cdot l^3$ (B je příslušná konstanta, pro kouli např. $\frac{4}{3} \pi$) psát pro koeficient γ vztah

$$\gamma = \frac{1}{B \cdot l^3} \left(\frac{\partial B \cdot l^3}{\partial T} \right)_p = - \frac{3B \cdot l^2}{B \cdot l^3} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_p = 3 \cdot \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_p.$$

Porovnáme-li tento vztah s rovnicí pro výpočet součinitele délkové teplotní roztažnosti, dostaneme $\gamma \approx \alpha$. Je nutné zdůraznit, že pro anizotropní materiály, například dřevo, různé sendvičové materiály apod., tento vztah neplatí.

4.4.4 Tepelně technické vlastnosti

Tepelně technické veličiny jsou důležité parametry, které se objevují v tepelně technických výpočtech tepelného chování stavebních konstrukcí. Odvozujeme je na základě tepelně fyzikálních veličin, které jsme popsali v předcházejícím textu. Často bývají vztaženy přímo ke konkrétní stavební konstrukci specifických rozměrů. Těmito odvozenými parametry konstrukcí, jako je tepelný odpor vrstvy materiálu či její součinitel prostupu, se v těchto skriptech zabývat nebudeme, neboť patří spíše do problematiky navrhování stavebních konstrukcí, než do oboru materiálového inženýrství.

4.4.4.1 Tepelná jímavost

Vyjadřuje schopnost materiálu přijímat nebo uvolňovat teplo. Čím větší je hodnota tepelné jímavosti, tím materiál méně přijímá, ale i uvolňuje teplo. Je popsána následujícím vztahem

$$b = \lambda \cdot c \cdot \rho_v,$$

kde b ($\text{W}^2 \text{s/m}^4 \text{K}^2$) je tepelná jímavost, λ (W/m K) součinitel tepelné vodivosti, c (J/kg K) měrná tepelná kapacita a ρ_v (kg/m^3) objemová hmotnost.

4.4.4.2 Součinitel teplotní vodivosti

Popisuje schopnost materiálu o definované vlhkosti vyrovnávat teplotní rozdíly při neustáleném vedení tepla (důležitý parametr například při přerušovaném vytápění). Je definován rovnicí

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_v},$$

kde a (m^2/s) je součinitel teplotní vodivosti. Čím je jeho teplota vyšší, tím probíhá vyrovnání teplot rychleji.

4.5 Akustické vlastnosti stavebních materiálů

Chceme-li definovat a popsat akustické vlastnosti materiálů, je nezbytné uvést nejdříve základní informace o zvuku a jeho šíření. Zvuk je mechanické kmitání a jím buzené mechanické vlnění, které je lidský sluchový orgán schopen přijímat a mozek zpracovat ve smyslový vjem. Pro člověka je nejdůležitější frekvenční pásmo 0.5 – 5 kHz, neboť lidské sluchové ústrojí má v tomto pásmu rezonanci, tedy i největší amplitudy výchylek buzeného kmitání a největší citlivost. Pro frekvence nižší a vyšší klesá schopnost slyšení až pod 20 Hz a

nad 16 KHz mizí. Dlouhodobý hluk je škodlivý lidskému organismu a podle své intenzity a doby trvání může nepříznivě působit na pracovní schopnost a zdraví člověka. Z pohledu optimálního návrhu stavebních konstrukcí je tedy nezbytné snižování hluku v obytném prostoru člověka. To je možné v principu dvěma způsoby, a to jednak snižováním akustického výkonu nebo odstraňování zdrojů hluku, jednak omezováním šíření hluku a jeho tlumením v místech pohybu člověka. Právě na druhý způsob snižování hluku mají výrazný vliv akustické vlastnosti materiálů, které jsou definovány jejich porézní strukturou ve vztahu k objemové hmotnosti. Hygienické normy předepisují nejvyšší přípustné ekvivalentní hladiny hluku L_{eq} (dB), které jsou definovány dle vztahu

$$L_{eq} = 10 \cdot \log \frac{I_s}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{1}{I_0 \cdot T} \int_0^T I \cdot dt ,$$

kde I_s je hladina časové střední intenzity hluku, I_0 ($I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$) referenční prahová intenzita v časovém intervalu T . Dle normových požadavků je třeba navrhovat konstrukce pro potlačení odrazu zvukových vln (**konstrukce pohlcující zvuk**) a pro snížení přenosu zvukových vln, tzn. **konstrukce zvukově izolační**. Měřítkem vhodnosti jednotlivých stavebních materiálů je jejich **vlnový odpor** Z (N s/m^3)

$$Z = \rho_v \cdot c ,$$

kde ρ_v (kg/m^3) je objemová hmotnost materiálu a c (m/s) rychlost šíření podélných vln v materiálu. Vlnový odpor definuje akustickou tvrdost materiálů, dle které můžeme materiály dělit na **akusticky měkké** (hodnoty vlnového odporu blízké odporu vzduchu $Z_0 = 401,2 \text{ N s/m}^3$) a **akusticky tvrdé** (hodnoty vlnového jsou výrazně vyšší než pro vzduch). Šíří-li se zvuk ve vzduchu, používáme pro pohlcování vzduchu materiály akusticky měkké a pro izolaci šíření zvuku (pro neprůzvučné konstrukce) materiály akusticky tvrdé. V případě, že se zvuk šíří ve hmotě pevného skupenství (například vibrací podlahových konstrukcí apod.) používáme materiály zcela opačně. To znamená, že pro pohlcení zvuku použijeme materiály akusticky tvrdé a pro jeho izolaci materiály akusticky měkké.

4.5.1 Zvuková pohltivost a průzvučnost

V uzavřených prostorech obytných budov se zvuk šíří vzduchem dokud nedopadne na stěnu nebo jinou překážku. Dopadající zvuk se z části odráží do místnosti, část je pohlcena

konstrukcí (přičemž část své energie mění v teplo) a zbytek prochází konstrukcí do okolního prostoru. Akustické vlastnosti konstrukce vyjadřují činitelé **zvukové odrazivosti** ρ (-), **zvukové pohltivosti** α (-) a **průzvučnosti** τ (-), definované následujícími rovnicemi

$$\rho = \frac{I_r}{I_i}, \alpha = \frac{I_a}{I_i}, \tau = \frac{I_t}{I_i}.$$

Akustický výkon pohlcovaný nebo procházející stěnou nezávisí jen na činitelích α nebo τ , ale i na plošném obsahu S (m^2) konstrukce, která odděluje dva prostory o různé hladině akustického výkonu. Účinky konstrukce tedy vyjadřujeme jednak její pohltivostí $A = \alpha \cdot S$ (m^2), jednak průzvučností $B = \tau \cdot S$ (m^2). Pohltivost či průzvučnost konstrukce nejsou tedy čistě materiálovými parametry, ale jsou ovlivněny také vlastnostmi konstrukce, ve které budou specifické stavební materiály aplikovány. Zvuková pohltivost je dána hlavně vlastnostmi povrchové vrstvy pohlcující konstrukce. Pomocí tabulek činitelů pohltivosti pro různé povrchy v normalizovaných frekvenčních pásmech lze vypočítat pohltivosti jednotlivých ploch stavebních konstrukcí a tím například celkovou pohltivost místnosti. Experimentálně se činitel pohltivosti určuje z měření doby dozvuku. Nejprve se změří doba dozvuku T_1 v dozvukové komoře (místnost s minimální pohltivostí A_n), pak se do ní vloží těleso s neznámou pohltivostí $A_m = \alpha \cdot S$ o definované ploše S . Podle Sabinova vzorce pro dobu dozvuku můžeme napsat

$$A_n = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot T_1}, \quad A_n + A_m = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot T_2}.$$

Následně spočteme měřený činitel pohltivosti ze vztahu

$$A_m = 55,3 \frac{V}{c} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \Rightarrow \alpha = \frac{A_m}{S},$$

kde V (m^3) je objem dozvukové komory.

Lze tedy konstatovat, že zvuková pohltivost stavebních konstrukcí je z materiálového hlediska dána objemovou hmotností materiálů a rychlosti šíření zvukových vln v jejich porézní struktuře.

Průzvučnost závisí složitějším způsobem nejen na materiálu stěny a frekvenci zvuku, ale značnou měrou i na tloušťce, plošné hmotnosti a konstrukci stěny. Z tohoto důvodu obvykle nestanovujeme činitel neprůzvučnosti, ale měříme veličinu **stupeň vzduchové neprůzvučnosti** R (dB).

4.5.2 Materiály pro neprůzvučné konstrukce

Pro zvukovou izolaci hlukově chráněných prostor je zpravidla nejdůležitější vzduchová neprůzvučnost, to je míra zábrany přenosu zvuku ze vzduchu v okolních prostorech stavebními konstrukcemi do vzduchu chráněných prostor. U vodorovných stavebních konstrukcí se hodnotí též ochrana proti šíření **kročejového hluku**, který vzniká například chůzí po podlaze a přenáší se dále materiály stropní konstrukce do chráněných prostor. Z pohledu neprůzvučnosti konstrukcí je jejich významnou akustickou charakteristikou **plošná hmotnost** m' (kg/m^2), která definuje neprůzvučnost konstrukcí v závislosti na materiálovém složení konstrukcí. Čím vyšší je plošná hmotnost konstrukcí, tím lépe zvukově izolují z pohledu transportu zvuku vzduchem. Hovoříme-li o izolaci proti kročejovému hluku, je tato závislost zcela opačná. V látkách pevného skupenství rychlost šíření podílných vln úzce souvisí s tuhostí těchto látek, neboť platí, že $c \approx (E / \rho)^{1/2}$, kde E (MPa) je dynamický modul pružnosti. Neprůzvučnost jednoduchých stavebních konstrukcí tedy závisí na následujících parametrech stavebních materiálů:

- objemové hmotnosti (s jejím nárůstem se zvyšuje také neprůzvučnost),
- rychlosti šíření podílných vln v materiálu (resp. na dynamickém modulu pružnosti materiálu E – s poklesem neprůzvučnosti stoupá),
- a na ztrátovém činiteli η (-), který je uveden v normách řešících problematiku zvukové neprůzvučnosti materiálů (resp. konstrukcí) a je vyjadřován jako míra schopnosti materiálu pohlcovat šířící se zvuk a měnit energii zvukem vytvořených vibrací na energii tepelnou.

4.6 Mechanické vlastnosti materiálů

Mechanické vlastnosti představují základní informaci pro aplikaci stavebních materiálů jako součásti konstrukčních prvků přenášejících mechanické zatížení. Udávají v podstatě vztah mezi mechanickým namáháním a odporem, kterým materiál účinkům toho namáhání vzdoruje. V případě namáhání představovaným pouze mechanickým napětím, rozlišujeme mezi mechanickými parametry materiálů **vlastnosti přetvárné** a **vlastnosti pevnostní**. V případě přetvárných vlastností popisujeme chování materiálů, které si při mechanickém zatížení zachovávají svou celistvost. Na druhé straně vlastnosti pevnostní charakterizují vlastnosti materiálů již ve fázi porušování. Problematika mechanických vlastností je řešena v celé řadě publikací, proto zde uvedeme definice a popis pouze základních mechanických parametrů, které budeme používat v následujících kapitolách.

4.6.1 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu představuje největší tahové napětí, při němž dojde k porušení (přerušení) zkušebního vzorku. Vypočte se dle následujícího vztahu

$$f_t = \frac{F}{A},$$

kde f_t (MPa) je pevnost v tahu, F (N) maximální dosažená síla při tahovém zatěžování vzorku materiálu, A (mm²) původní průřezová plocha zkušebního vzorku. Při experimentálním zjišťování pevnosti v tahu se nejprve změří průřezová plocha vzorků v místě předpokládaného přetržení. Poté se vzorek upne do čelistí trhačího stroje a tahově se zatěžuje při postupném zvyšování síly. Rychlost nárůstu tahové díly je předepsána pro jednotlivé typy materiálů v technických normách pro provádění zkoušky pevnosti v tahu. V rámci měření pevnosti v tahu můžeme zároveň provést stanovení tažnosti materiálu, δ (%), která udává poměrný procentní přírůstek základní délky zkušebního vzorku během tahové zkoušky. Vypočte se ze vztahu

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \cdot 100\%,$$

kde l (m), (mm) je počáteční měřená délka vzorku a l_1 konečná měřená délka zjištěná přiložením obou částí vzorku po přetržení.

4.6.2 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku popisuje mezní napětí, při němž dojde k rozrušení zkušebního vzorku.

Výpočet pevnosti v tlaku je stejný jako u namáhání tahem, $f_c = \frac{F}{A}$, kde f_c (MPa) je pevnost v tlaku, F (N) maximální síla dosažená při zatěžovací zkoušce a A (mm²) tlačná plocha zkušebního tělesa. Pro zkoušení se používají nejčastěji vzorky ve tvaru válce či krychle, přičemž tvar zkušebních těles výrazně ovlivňuje naměřené hodnoty pevnosti. Například typicky vyšší hodnoty jsou získávány na vzorcích tvaru krychle v porovnání s měřeními provedenými na válcích. Tato skutečnost je způsobena tím, že tlakové porušení vzorku materiálu nezávisí pouze na mezním napětí v tahu, ale na celkové napjatosti tělesa během zkoušky. Ta je ovlivněna například třením mezi tlačnými deskami a vzorkem, vzájemným poměrem všech rozměrů zkušebních těles apod. Při provádění zkoušek pevnosti v tlaku na vzorcích anorganických pojiv, malt a betonů, je nezbytné umístit zkoušené vzorky do zkušebního stroje tak, aby aplikovaná tlaková síla působila kolmo na směr hutnění při výrobě

vzorku. Pevnost v tlaku se stanovuje pouze u materiálů, u nichž dojde vlivem tlakového zatěžování k rozdrčení. Pokud jde o materiály houževnaté a tvárné, nelze pevnost v tlaku experimentálně stanovit. Chceme-li zjistit chování těchto materiálů při tlakovém namáhání, definujeme pevnost za specifických podmínek, například jako tlakové napětí, při němž dojde k definované deformaci.

4.6.3 Pevnost v ohybu, pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu se počítá z obecného napětí za ohybu jako jeho mezní hodnota podle vztahu

$$f_f = \max \sigma_f = \frac{\max M}{W},$$

kde f_f (MPa) je pevnost v ohybu (resp. v tahu za ohybu), σ_f (MPa) napětí v ohybu, M (N mm) maximální ohybový moment spočtený na základě statického uspořádání zkoušky a W (mm³) průřezový modul v místě porušení měřeného vzorku. V technické praxi se používá zatěžování měřeného vzorku jedním nebo dvěma břemeny. Při ohybových zkouškách se porušení materiálu šíří převážně od tažené části průřezu, celkem výjimečně u přírodní anizotropních materiálů může porušení nastat rozdrčením tlačené části průřezu. V prvním případě porušení hovoříme o **pevnosti v tahu za ohybu**, v druhém případě o **pevnosti v tlaku za ohybu**.

4.6.4 Modul pružnosti

Modul pružnosti je vyjádřen vztahem mezi působícím napětím a jím vyvolanou pružnou deformací. Počítá se na základě **Hookova zákona**

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

kde σ (MPa) je působící napětí v tahu (resp. tlaku), E (MPa) modul pružnosti v tahu (resp. tlaku) a ε (-) poměrná pružná deformace. Pro experimentální stanovení modulu pružnosti můžeme jednak využít **metody statické**, které k jeho určení využívají Hookova zákona. V tomto případě hovoříme o **statickém modulu pružnosti**. Modul pružnosti je však možné vyjádřit také pomocí rychlosti šíření podélných zvukových vln ve hmotě dle vztahu

$$E = c^2 \cdot \rho_v$$

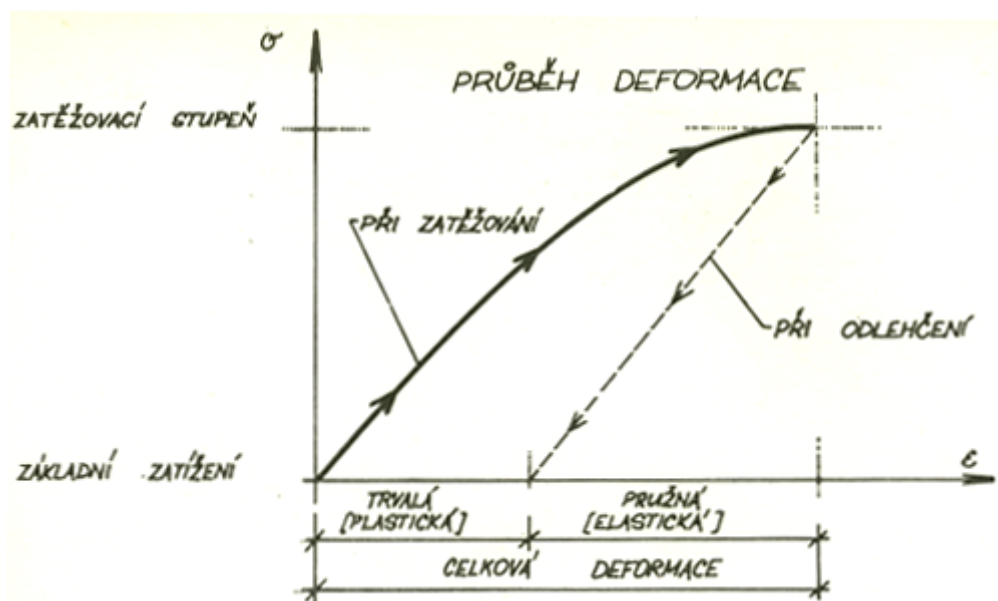
kde E (MPa) je **dynamický modul pružnosti**, c (m/s) rychlost šíření podélných vln v materiálu, ρ_v (kg/m³) objemová hmotnost materiálu, pro který stanovujeme modul

pružnosti. Při měření smykové deformace γ (-) od účinků smykového napětí τ (MPa) dostaneme obdobně modul pružnosti ve smyku G (MPa), u kroucení torzní modul G_{tor} (MPa).

K určení modulu pružnosti statickou metodou musíme vyvodit změnu napětí a pro tuto změnu určit příslušnou hodnotu poměrné pružné deformace. Znázorníme-li si závislost zatížení a deformace vidíme, že při růstu zatížení doprovázeného nárůstem napětí dochází k přetvoření. Zmenšíme-li zatížení až na hodnotu základního zatížení, pak obecně nezmizí celá deformace, nýbrž pouze její **pružná část**, tzv. **elastická deformace**. Část celkové deformace, která se projeví i po odlehčení, poté nazýváme trvalou, resp. plastickou deformací. Průběh deformací při zatěžování a odlehčování je pro názornost zobrazen na Obr. 5.18.

U různých materiálů bude vzájemný poměr pružných a trvalých deformací různý. Obecně ale platí, že při nízkých hodnotách napětí převládá u většiny materiálů chování pružné, při vyšších napětích chování plastické.

Metody stanovení modulu pružnosti byly podrobně popsány například v laboratorních cvičeních z fyziky a stavebních hmot, takže se jimi podrobněji zabývat nebudeme.



Obr. 4.19 Průběh deformace při zatěžování a odtěžování materiálu.

5 STAVEBNÍ KÁMEN

5.1 VÝZNAM STAVEBNÍHO KAMENE Z POHLEDU HISTORIE STAVITELSTVÍ A SOUČASNÝCH MOŽNOSTÍ UPLATNĚNÍ

5.2 VZTAH MEZI STRUKTUROU KAMENŮ A JEJICH FYZIKÁLNÍMI VLASTNOSTMI

5.3 FAKTORY DEGRADACE STAVEBNÍCH KAMENŮ

5.4 KONZERVACE A KONSOLIDACE NARUŠENÝCH KAMENŮ

Kámen se uplatňoval od počátku historie jako hlavní konstrukční hmota, ke zdění zdí i kleneb, k výrobě architektonických detailů a soch a různých prvků a byl výhradním materiálem dlažeb. Je třeba připomenout, že kámen se užíval pro své technické, nikoli estetické hodnoty. Platí, že konstrukční prvky (žebra a svorníky kleneb, portály, ostění, římsy, konzoly, nároží (viz Obr. 5.3) se pohledově neuplatňoval, byly zpravidla omítány tak, aby k degradaci nejcitlivější povrchová vrstva mohla být periodicky obnovována.

Kamenné zdivo památkově chráněných objektů je klíčovým svědkem podoby historické architektury. Proto je třeba zmínit tento materiál, který jistě z dnešního pohledu není považován za hlavní konstrukční hmotu, ale znalost vlastností a chování nejrozšířenějších druhů kamenů je nezbytná při provádění oprav a rekonstrukcí historických staveb. Význam stavebních kamenů nelze také pomíjet proto, že stoupá jejich obliba při projektování architektonicky významných objektů současného stavebnictví.

Téměř každá rekonstrukce nebo oprava památek nebo objektů v historických sídlech se neobejde bez sanace nebo celkové náhrady dožilých stavebních kamenných prvků. Z tohoto pohledu se zaměříme na nejdůležitější druhy uplatňované při budování a rekonstrukcích staveb v Čechách. Podrobně budou pojednány především opuka, pískovec, žula a travertin. Krátce zmíněn bude i další ušlechtilý kámen používaný v různém období od renesance a baroka až po dvacátá léta minulého století jakým je mramor.

5.1 Význam stavebního kamene z pohledu historie a současných možností uplatnění

Definice skla

České země mají své specifikum v používání **opuky**, která umožňovala dokonalé opracování tehdejšími primitivními nástroji a byla při tom výtvarně výrazná. Názvem opuka, který vznikl pravděpodobně od charakteristického opadávání povrchových vrstev - opukávání - jsou označovány **písčité slínovce** obsahující křemitá zrna, jílové minerály, slídu, laukonit, limonit i zbytky mořských živočichů. Podle jejich poměru lze rozlišit různé typy opuk. Pojivou složkou je karbonát vápenatý. Rozmanité mineralogické složení a vrstevnatost je dána **sedimentárním původem**, a tento fakt je hlavní příčinou její nízké odolnosti vůči povětrnostním vlivům.

Opuka byla hlavním středověkým stavebním kamenem. Byla lámána na okrajových místech Prahy a jejího okolí i na řadě míst v Čechách. Největší význam měly lomy na severovýchod od Prahy (Přední Kopanina), kde se lámala tzv. zlatá opuka. Další významné lomy byly v oblasti Džbánu u Rakovníka, Břvan u Loun a šedobílé velmi kvalitní opuky u Příbylova u Skutče.

Až do 13. století se na stavby a sochařské práce používala výhradně opuka. Z opuky je vystavena řada románských kostelů v Praze a ve středních Čechách. Jmenujme rotundu sv. Kříže, sv. Longina a sv. Martina na Vyšehradě (Obr. 5.1), baziliku sv. Jiří na Pražském hradě, rotundu s. Jiří na Řípu, a téměř výhradní použití opuky při stavbách pražských románských domů - díky tomu, že se terén Starého Města během staletí zvýšil až o několik metrů, zachovalo se původně přízemních částí domů v podobě sklepů (Husova ulice). Nejstarší románské stavby byly neomítnuté, řádkové zdivo bylo vyspárováno. V období gotiky byly již stavby omítány a zdivo bylo z lomového opukového kamene a nikoli z kvádrů. Ze sochařských děl této doby je nutno připomenout reliéf sv. Jiří na Hradě.

Možnosti opuky jako stavebního materiálu nejlépe demonstruje nedávno rekonstruovaný soubor staveb kláštera sv. Anežky na Františku ze 13. století. Ze staveb pozdějšího období je možno uvést budovu Invalidovny v Karlíně z první poloviny 18. století postavenou důsledně z opuky, a hlavní oltář v katedrále sv. Víta z let 1870-1872. V pozdějším období byla opuka používána prakticky nejen jako běžný stavební kámen městské a venkovské architektury, ale i při stavbách železničních mostů.



Obr. 5.1 Rotunda sv. Martina z opukového zdiva na Vyšehradě.

V současné době je možno uvažovat při rekonstrukčních pracích, opravách a obnov historických staveb nejstaršího období s použitím opuky z pěti přírodních lokalit, kde se dosud těží: Přední Kopaniny, Džbánu, Břvan a Zeměch u Loun a Příbylova (Tab. 5.1).

Tabulka 5.1 Charakteristické vlastnosti opuk ze v současné době těžených lokalit.

Těžená lokalita		Objemová hmotnost (g/cm ³)	Pórovitost (%)	Nasákavost (% hm.)	Pevnost v tlaku (MPa)
Přední Kopanina	min	2,05	24,5	8,61	27
	max	2,13	31,2	10,45	51
Džbán	Ø	1,04	25,4	37,1	8,5
Břvany	min	1,61	31,2	12,4	20
	max	1,86	40,1	19,1	45
Zeměchy	min	1,75	24,8	11,1	34
	max	1,98	29,2	16,7	82
Příbylov	min	2,10	14,9	6,35	94
	max	2,24		9,17	155

Z posledních význačnějších aplikací opuky je třeba připomenout např. dekorativní reliéf na stanici metra Hradčanská v Praze Dejvicích a pamětní jehlan v zahradě Na valech Pražského hradu z let 1990-1991.

Od 14. století byla opuka postupně nahrazována **pískovcem** nejprve v konstrukčně náročnějších místech, např. na hranách opěrných pilířů, jak je třeba vidět na Týnském chrámu v Praze (Obr. 5.2). Při stavbě katedrály sv. Víta a dalších církevních staveb se již téměř výhradně uplatňoval pískovec.

Souhrnné označení **stavební pískovce** zahrnuje řadu typů hornin z petrografického hlediska nestejného chemického složení, jejichž struktura je tvořena zrny různých velikostí, tvarů, stupně opracování a uvést je třeba i přítomnost organogenních složek (např. kalů). Vzhledem k nesourodosti složek je nesnadné shrnout všechny odlišné pískovce do jednotného klasifikačního schéma. Můžeme je však rozdělit nejlépe podle kvalitativních znaků složek a jejich vzájemného uspořádání. Zásadní důležitost z pohledu vlastností pískovců má tmel spojující jednotlivá písková zrna. Rozeznáváme tmel křemičitý, jílovitý, vápnitý, slinitý, železitý apod. Především druh tmelu rozhoduje o mechanicko-fyzikálních vlastnostech pískovce. Kvalitní křemenné pískovce mají převážně tmel tvořený oxidem křemíku ve své prvotní formě jako opál. Méně trvanlivé pískovce mají především tmel kalciový nebo tmely z různě hydratovaných oxidů železa.



Obr. 5.2 Detail náhrady opuky pískovcem na ostěni Týnského chrámu.

Jako reprezentativní uveďme tři druhy pískovců z lokalit, kde se v současné době tento kámen láme. Dnes nejvýznamnější jsou pískovce souhrnně uváděné jako hořické pískovce. Těží se v oblasti Podhorního Újezdu v Podkrkonoší. Jedná se o křemenný (až 90 % křemene) jemnozrný pískovec s průměrnou velikostí zrna 0,1 - 0,2 mm se zvýšeným obsahem kaolinitového tmelu s limonitickým pigmentem a božanovský pískovec považovaný za nej kvalitnější z dostupných pískovců. Je středně až hrubě zrnitý, okrového zabarvení a těží se v nejjižnější části Broumovských stěn na hranici s Polskem. Tento druh pískovce je vzhledem k tvrdosti obtížně zpracovatelný a hodí se většinou pouze k výrobě obkladových desek a pro restaurátorské účely (Národní divadlo, Smíchovské nádraží). Křídový glaukonitický, jemnozrný, žlutohnědý pískovec se láme v oblasti lázní Mšené. Srovnání vlastností ukazuje Tab. 5.2.

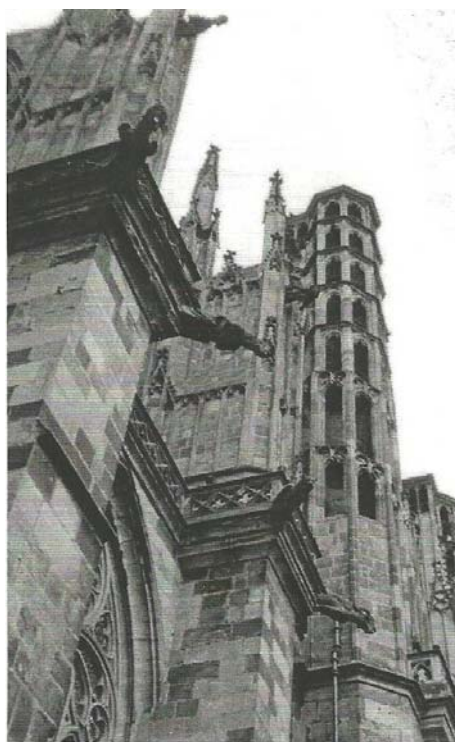
Nejznámější žehrovický pískovec (žehrovák), ze kterého je postavena většina historických staveb v Praze, lámaný u obce Kamenné Žebrovice v kladenské oblasti, se bohužel již netěží. Rozdílná textura, barva, zrnitost a v neposlední řadě i trvanlivost pískovců, uplatňovaných v současné době při rekonstrukčních pracích, nedávají často uspokojivé výsledky především z architektonického pohledu. Jako příklad je možno uvést různorodost pískovcových kvádrů při náhradě původních na Karlově mostu.

Tab. 5.2 Srovnání vlastností hlavních druhů pískovců.

Těžená lokalita		Objemová hmotnost (g/cm ³)	Pórovitost (%)	Nasákavost (% hm.)	Pevnost v tlaku (MPa)
Podhorní Újezd	min	1,89	29,5	5,45	17
	max	2,13		10,45	45
Božanov	min	2,21	15,5	5,5	58
	max	1,86		19,1	72
Mšené	min	1,85	26,2	10,8	23
	max	1,93	29,7	13,3	33

Hlavního rozmachu dosáhlo používání pískovce od poloviny 14. století v gotickém období. Bylo to zásluhou stavby chrámu sv. Víta na Pražském hradě (obr. 5.3), kde se používal prakticky jen pískovec. Po určité stagnaci v období renesance našel pískovec opět oblibu v baroku. Především baroko dokumentuje, že pískovec byl výhradním kamenem stavebním i sochařským. Uplatňoval se jako konstrukční hmota staveb ale i v detailech např. portálech, schodištích a ostění. Velký rozmach spadá do poslední třetiny 19. století, do období tzv. historizujících slohů. Jmenujme stavbu novorenesanční budovy Národního divadla, Národního muzea a obnovu chrámu sv. Barbory v Kutné Hoře s náročnými stavebními detaily.

Používání pískovce přerušila až secese, kdy nastupuje jako hlavní stavební hmota beton.



Obr. 5.3. *Chrám sv. Víta v Praze vystavěný z pravidelných pískovcových čtyřstěnů jemně kamenicky opracovaných.*

Použití žuly na našem území je doloženo již od středověku (např. architektonické detaily v bazilice sv. Jiří na Pražském hradě, hrad Zvíkov). Obtížná těžba a zpracovatelnost byly zřejmě důvodem, proč se tento kámen ve větším měřítku objevuje na stavbách až od poloviny 19. století. Teprve s rozvojem trhacích prací se začaly zakládat četné lomy a žula se

uplatňovala jako hlavní stavební kámen především na dlažby, schody a jiné stavební prvky. Z Tab. 5.3 lze vyčíst, že žulu lze využít všade tam, kde jsou kladeny nejvyšší požadavky na mechanicko-fyzikální vlastnosti a především trvanlivost. Různými druhy žul jsou obloženy budovy ministerstev, Živnostenská banka, budova parlamentu a řada dalších významných staveb. Praha se během století změnila z města teplých běložlutých staveb z opuky a pískovců na šedivé město žul.

Tab. 5.3 *Vlastnosti některých těžených druhů žul.*

Těžená lokalita	Objemová hmotnost (g/cm³)	Pórovitost (%)	Nasákavost (% hm.)	Pevnost v tlaku (MPa)
Požáry	2.68	1.07	0.20	183
Hudčice	2.69	1.00	0.32	200
Mrákotín	2.62		0.38	141
Liberec	2.63	0.57	0.33	161

V minulosti byly žulové lomy zakládány na četných místech Českého masívu a dnes má většina z nich význam spíše historický. Omezíme se proto na nejznámější v současné době těžené druhy žul. Nejvýznamnější je **žula požárská** lámaná v oblasti Krhanic v Dolním Posázaví, ze které jsou vyrobeny obklady řady významných budov (Národní památník), dlažby (III.nádvoří Pražského hradu) i umělecká díla (pomník F. Palackého).

Tmavě šedá **žula hudčická** se využívá pro řezané a broušené dlažby ve stanicích pražského metra. **Mrákotínská žula** pojmenovaná podle Mrákotína u Telče, místa kde se láme, je namodrale bělošedá. Byla používána v minulosti na příklad při stavbě telčského zámku a byla uplatněna na reprezentativním obelisku na Pražském hradu.

Pro kamenickou praxi má zásadní význam porfyrický typ šedorůžového zbarvení označovaný jako **liberecká žula** vylamovaná ve velkých blocích v oblasti Ruprechtic a v poslední době uplatněná v podobě obkladů při stavbě Nové scény Národního divadla.



Obr. 5.4 Žulový lom Prosečnice u Kamenného Přívozu.

Velmi dekoračním kamenem používaným v první polovině 20. století k obkladům řady staveb, především v Praze, je **travertin**. Jedná se o specifický typ hrubě pórovitého kavernózního biodetrického vápence, který vznikl vysrážením kalcitu při vývěrech teplých minerálních pramenů. Z architektonického pohledu zajímavá výrazná textura se však ukázala být problematická zvláště v městském prostředí, kde se v dutinách usazuje prach a znehodnocuje tento kámen jak výtvarně, tak i z hlediska koroze.

Do Prahy se dovážel travertin z Rakouska jako **Kirchheimský mušlový vápenec**, ale také ze Slovenska. Známy je např. zlatý travertin těžený v oblasti Ružomberka, bělavý **spišský travertin** a ještě donedávna těžený **tučinský travertin** z lokality v oblasti Přerova, kterým je obložen například obchodní palác U Hájků v Praze na Poříčí. Významnou stavbou, kde je travertin uplatněn jako obklad, je Petschkův palác v Praze (Obr. 5.5.)



Obr. 5.5 *Petschkův palác v Praze.*

Z pohledu uplatnění travertinu jako stavebního materiálu lze tento kámen hodnotit velmi příznivě, což dosvědčují mechanicko fyzikální parametry získané při průzkumu fasády Petschkova paláce (Tab. 5.4). Z tabulky je zřejmá variabilita vlastností travertinu. Vhodný je především pro svislé obklady venkovních fasád. Kamenné prvky z travertinu jsou dobře opracovatelné i lešitelné a vzhledem k zajímavému vzhledu uplatnitelné v kategorii dekoračních stavebních kamenů.

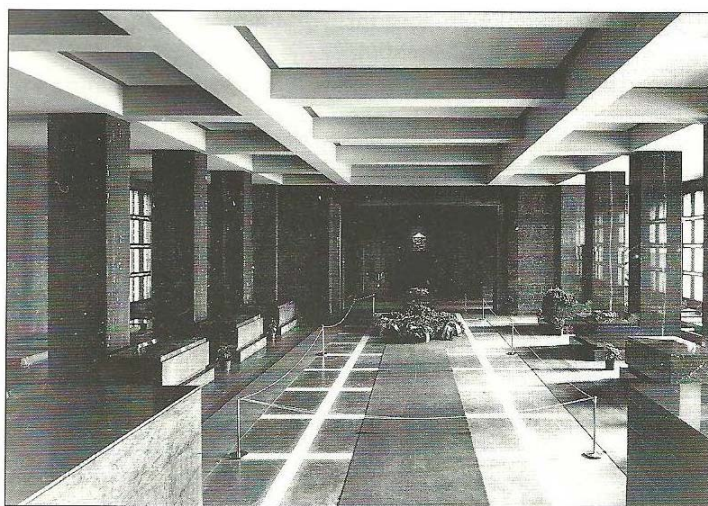
Tab. 5.4 *Fyzikálně mechanické parametry travertinu.*

Objemová hmotnost (g/cm^3)	2.64 – 2.69
Pórovitost (%)	0.90 - 2,93
Nasákavost (% hm.)	0.30 - 0,76
Pevnost v tlaku (MPa)	113
Pevnost v tahu za ohybu (MPa)	8-12

Na rozdíl od opuky a pískovců nelze **mramory** řadit mezi běžné stavební kameny. Tyto karbonátové horniny s kolísavým poměrným obsahem uhličitanu vápníku a hořčíku mají nízkou odolnost vůči působení vnějšího prostředí, především vodě obsahující rozpuštěné

oxidy uhlíku a síry, což vede k jejich povrchové korozi a tím výtvarnému znehodnocování. Hlavním a zásadním důvodem používání mramorů na stavbách je jejich barevnost a snadná leštitelnost. Různé odstíny červené působené obsahem hematitu, hnědé ovlivněné přítomností limonitu nebo černé dané obsahem bitumenu v kompozitní struktuře mramoru jsou z pohledů architektů rozhodující často i na úkor technické oprávněnosti jejich využití.

Rozvoj těžby a zpracování mramorů je spojen s příchodem vlašských stavitelů v polovině 16. století. Tehdy byly vytvořeny předpoklady k používání mramoru při stavbě kostelů a klášterů, později v baroku i honosných paláců. V období historizujících slohů ke konci 19. století nachází mramor uplatnění při stavbě Národního divadla, Národního muzea a řady bank. Jedná se především o červený **slivenecký mramor**. Z období secese je třeba jmenovat použití tohoto mramoru např. při stavbě Obecního domu v Praze. Hlavní éra obliby mramoru nastává však až v první polovině 20. století, kdy se mramor uplatňuje ve veřejné i soukromé výstavbě jako obkladový materiál řady nových budov a především pak v pražském metru. Využívá se mramor těžený na slezské straně Jeseníku, kde se dobývá bílý a šedý mramor v oblasti Lipové. Příkladem může být pietní místnost Národního památníku, která má nejbohatší výzdobu co do počtu tuzemských mramorů i způsobů jejich použití (Obr. 5.6).



Obr. 5.6 Ústřední síň Národního památníku na Žižkově s obklady ze sliveneckého a lipovského mramoru a dlažbou z jaroškovského, krkonošského mramoru a sarkofágů z karlštejského mramoru.

5.2 Vztah mezi strukturou kamenů a jejich fyzikálními vlastnostmi

Při hodnocení kamenů z pohledu jejich možností uplatnění ve stavebnictví se jasně ukazuje přímá souvislost struktury a mechanicko-fyzikálních vlastností. Nelze však zanedbávat ani další faktory, které určují vhodnost a výhodnost uplatnění ve stavební konstrukci. Jde především o funkci, kterou mají plnit, dále způsob těžby kamenných bloků a jejich opracování.

Způsob těžby kamene má významný a je možno říci zásadní vliv na užité vlastnosti kamene jako základního stavebního prvku. Tradiční postup oddělování bloků pomocí dřevěných klínů bylo nesporně, ve srovnání se současnou metodou založenou na použití různých druhů trhavin, vhodnější. Těžba s pomocí trhavin fakticky omezuje uplatnění některých druhů kamene, u nichž mikrotrhliny takto vzniklé narušují strukturu a tím snižují pevnost a trvanlivost. Proto současné metody těžby jako je řezání lanem a rozrušování krystalizačními tlaky jsou dnes jednoznačně preferovány při těžbě mramoru i travertinu.

Podstatný vliv na trvanlivost má **postup opracování kamene**. Zvolená technologie úpravy kamenných bloků má rozhodující vliv na životnost povrchové zóny vystavené působení povětrnosti. Tento fakt jasně prokazují v současné době restaurované stavby, u kterých se ukazuje, že nestejně degradované bloky především z opuky, pískovce a travertinu byly zřejmě nešetrně pojednány již při samém vzniku staveb.

Funkce v konstrukci, kterou má kámen dlouhodobě plnit, může mít rozhodující vliv na životnost kamenných prvků. Je v zásadě dvojí: kamenný prvek je součástí stavební konstrukce a plní statickou funkci nebo jeho uplatnění má charakter architektonického dotvoření stavby. Zvláštní důraz je při tom třeba klást u druhů kamenů se zjevně vrstevnatou strukturou, kdy uložení kolmo či vodorovně ke směru namáhání v konstrukci může mít i zcela zásadní vliv na nebezpečné poruchy částí staveb (Obr. 5.7).

Podstatný vliv na trvanlivost kamenů má i přímé, dlouhodobé působení vody na nevhodně umístěné kamenné prvky (týká se to všech kamenů s výjimkou žuly) kdy může docházet ke změnám ve struktuře vlivem změn chemické podstaty hmoty kamenů. Nezanedbatelné je i působení tmelů a materiálů povrchových finálních úprav staveb.



Obr. 5.7 Porušení opukového kamene nesprávně uloženého ve směru působení zatížení na sedimentární vrstvy.

Z pohledu využívání přírodních kamenů ve stavebnictví jsou však **zásadním kritériem určujícím trvanlivost staveb jejich mechanicko-fyzikální vlastnosti**. O které vlastnosti jde, udává ČSN 72 1800-87: Přírodní stavební kámen pro kamenické výrobky. Z této normy vyplývá, že se jedná především o pevnost v tlaku a tahu, objemovou hmotnost, nasákavost a mrazuvzdornost. Za rozhodující kritérium se však považuje pevnost v tlaku. Lze jistě diskutovat, zda ostatní zmíněné vlastnosti můžeme považovat pouze za informativní.

Souvislost mezi fyzikálními vlastnostmi a strukturou kamenů je klíčem k hodnocení kvality a tedy využitelnosti daných druhů přírodních kamenů v konstrukcích nebo pouze jako architektonických prvků staveb. Různorodost struktury kamenů, které byly vybrány jako zásadní z hlediska jejich významu pro stavební výrobu, tedy opuky, pískovců, žuly, mramoru a travertinu je zřejmá. Prokazuje to následující porovnání jejich struktur a chemického složení.

Opuky jsou pevné masivní horniny bez zřetelných textur, zrnitostně mají charakter písčitého slínovce. Jsou látkově homogenní, jejich barva je světle žlutavá s jemně bílým šmouhováním. Charakteristická je deskovitá odlučnost. V rámci jednotlivých vrstev zjišťujeme, že i mineralogické složení může být odlišné, což vede k dosti podstatným rozdílům fyzikálních parametrů. Ve svrchních polohách opuk navíc dochází k částečnému rozpouštění kalcitu, růstu pórovitosti, s tím spojené vysoké nasákavosti a k poklesu pevnosti.

Chemické složení opuk z různých oblastí a různých poloh v jednotlivých lomech se značně liší. Udává se většinou formou přepočtu chemických analýz na obsah tzv. normativních minerálů, kde oxid křemičitý zahrnuje krystalický křemen i jeho amorfní formy (jako je opál, chalcedon aj), kalcit, živce, jílové minerály a v souhrnu i oxidy kovů (především oxidu hlinitého a železitého) a pyritu. Pro informaci uvádíme složení zlaté opuky analyzované v rámci opravy vnějšího pláště Týnského chrámu v Praze (Tab. 5.5).

Pevnost opuky se výrazně zvyšuje s rostoucím obsahem oxidu křemíku a klesá s rostoucím obsahem kalcitu. Dokumentuje to přímou souvislost strukturních změn a mechanicko-fyzikálních vlastností opuky.

Tab. 5.5 *Chemické složení vzorku zlaté opuky odebraného při opravě Týnského chrámu v Praze.*

Minerál	Hmot. %
Modif. oxid křemičitý	58.2
Kalcit	21.7
Živce	12.9
Jílové minerály	5.9
Ostatní složky	1.1
Celkem	99.8

Souhrnné označení **stavební pískovce** zahrnuje řadu typů hornin sedimentárního původu. Definovat je lze jako pevné úlomkovité (klastické) sedimenty tvořené pískovými zrny a základní hmotou, kterou je jíl, prachová zrna a úlomky slíd. Z petrografického hlediska jsou to horniny nestejného chemického složení, různého stáří a stupně zpevnění. Hlavními klasifikačními principy jsou poměrná zastoupení: a) křemene spolu s úlomky hornin typu křemence, bulžníku a rohovce, b) živců s nestabilními úlomky hornin, c) jílovitého podílu. Podle jejich nerostného složení je rozdělujeme na křemenné pískovce, arkózy a droby.

Křemenné pískovce obsahují až 90% křemene s pravidelnou příměsí těžkých minerálů především zirkonu, hermalinu a rutilu. Tmelem je převážně SiO₂ podle stupně rekrystalizace ve své prvotní formě jako opál, ale většinou ve své nejstarší modifikaci jakou je křemen.

Setkáváme se však i s tmelem jiného druhu především kalciovým nebo z různě modifikovaných oxidů železa. Pokud je přítomna základní hmota je jí většinou jílovitá frakce (pod 20%).

Arkózy a arkózové pískovce jsou hrubozrnné pískovce s nedostatečně opracovanými klastickými částicemi. Mineralogické složení je do určité míry rozdílné od křemenného pískovce: vedle křemene jsou přítomny v hojné míře úlomky živců (většinou draselných), jílu a tmelem je nejčastěji kalcit a oxidy železa, které udílejí arkózám charakteristické červenavé zabarvení.

Světlý, většinou došeda zabarvený **jílovitý pískovec** je v podstatě také křemenný pískovec s větším obsahem jílovité základní hmotě. Hojněji bývá zastoupen druhotný kalciový tmel a pak mluvíme o vápnitých pískovcích.

Makrostruktura pískovců se většinou charakterizuje pojmy: velikost zrn, tvar a stupeň opracování zrn, usměrnění částic a typu příměsí organogenních složek. Důležitou nerostnou součástí pískovců je tmel spojující písková zrna a do značné míry ovlivňující vlastnosti daného druhu kamene. Podle složení tmele rozeznáváme tmel křemičitý, jílovitý, vápnitý, slinitý, železitý apod. Podle přítomnosti některého typického minerálu ve struktuře kamene lze tyto materiály rozlišovat i barevně - přítomnost hematitu udílí pískovcům červené zabarvení, s limonitem jsou žluté až hnědé, s glaukonitem zelené a bílé pískovce obsahují podíl kaolinitu.

Jako příklad byl vybrán v současné době těžený a asi nejznámější stavební pískovec z lomu v Podhorním Újezdě. Základní průměrné vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 5.6.

Chemické složení pískovců odpovídá jejich mineralogickému složení, obsah základní složky tj. SiO_2 se pohybuje většinou nad 90%. To potvrzuje analýza nejběžnějšího pískovce z lokality Podhorní Újezd (Tab. 5.7). Zvláštní pozornost při analýze byla věnována obsahu kalciového a železitého tmele jako složkám zvláštní důležitosti z hlediska trvanlivosti.

Většina pískovců pochází z druhohorní české křídové tabule, ke stavebním účelům se však používaly i permokarbonské arkózy. V důsledku petrografické variability mají pískovce velmi rozdílné vlastnosti. Typická je především proměnlivá pórovitost a z toho vyplývající i velmi

rozdílné mechanicko-fyzikální parametry, které jsou, jak bylo řečeno rozhodující pro trvanlivost kamene.

Tab. 5.6 Základní průměrné mechanicko-fyzikální vlastnosti pískovce z lokality Podhorní Újezd.

Vlastnost	Jednotka	Průměrná hodnota
Měrná hmotnost	kg/m ³	2656
Objemová hmotnost	kg/m ³	1911
Pórovitost	obj. %	28.1
Nasákavost	obj. %	19.1
Pevnost v tlaku	MPa	26.0
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	3.3

Tab. 5.7 Chemické složení pískovce z lokality Podhorní Újezd.

Složka	Obsah v % hmotnosti	
	min.	max.
SiO ₂	93.48	98.22
Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃	0.36	2.20
CaO + MgO	0.62	2.44
SO ₄ ²⁻	0.00	1.29
Ztráta žiháním	0.66	4.49

O použití pískovců pro stavební účely **nerozhoduje ani tak vlastní složení klastických částic, jako spíše druh a vlastnosti tmelu, který určuje stupeň soudržnosti zrn skládajících horninu**. Podstatné jsou však i zkušenosti získané v průběhu dlouhodobého využívání pískovců jako hlavních stavebních kamenů minulého historického období a téměř výhradních kamenů uplatňovaných při architektonickém dotváření staveb a v sochařství.

Společnými znaky **žul** jsou krystalická struktura, vynikající mechanicko-fyzikální vlastnosti a nejvyšší odolnost vůči působení povětrnostních vlivů ze všech kamenů používaných ve stavebnictví. Z petrografického hlediska je třeba k žulám (granitům) přiřadit i další příbuzné

vyvřeliny především granodiorit a křemenný diorit lišící se především obsahem křemene. Hlavními minerály žul jsou křemen a draselné živce. Jejich struktura je nejčastěji všesměrně zrnitá, méně často usměrněná. Barva je podmíněná minerálním složením zrn, nejčastěji se jedná o světle šedý křemen, bílé živce a doplňující složkou jsou tmavé minerály (především biotit).

Travertiny, ve starší literatuře někdy uváděné pod názvem vápenné tufy, jsou čtvrtohorní sladkovodní vápence vzniklé vysrážením z toků vod bohatých na vápník. Z makrostrukturního pohledu obsahují četné póry a tvarované dutinky vytvářející typickou travertinovou strukturu (Obr. 5.8). Příměs limonitu zbarvuje travertin béžově až nahnědle. Přes výraznou strukturní inhomogenitu mají pro využití ve stavebnictví příznivé fyzikální vlastnosti - pevnost v tlaku a mrazuvzdornost (viz Tab. 5.4).



Obr. 5.8 *Detail poškození travertinu se silně zanesenou povrchovou zónou na římse
Petschkova paláce Praze.*

Mramory jsou karbonátové horniny sedimentárního původu. Podle nerostného složení se v zásadě jedná o vápence nebo dolomity se vzájemnými přechody - dolomitické vápence nebo vápnité dolomity. Vedle obsahu karbonátů má pro mramory zásadní význam i přítomnost nekarbonátových minerálů, které ovlivňují texturu a barvu a zvyšují tvrdost. Je třeba ale zmínit, že některé minerály, jako na příklad pyrit, znehodnocují mramory vzhledově.

Nepříznivou chemickou vlastností mramorů je jejich náchylnost k rozpouštění působením vody s oxidem uhličitým, který reaguje jako kyselina uhličitá a mění nerozpustný karbonát na rozpustný kyselý uhličitán vápenatý podle vratné reakce:



V důsledku toho dochází ke korozi kamene a ztrátě lesku a proto se mramor považuje v naší oblasti za kámen vhodný jen pro interiéry a pouze výjimečně i pro exteriéry.

Textura sedimentárních mramorů je nejčastěji vrstevnatá s rovnými nebo zvlněnými vrstevními plochami. Z výtvarného pohledu je důležitý výskyt nepravidelných skvrn světlého kalcitu a různě barevných žilek.

Svémi vlastnostmi jsou odlišné tzv. **metamorfogenní mramory** vzniklé přeměnou (metamorfózou) původně sedimentárních vápenců na minerály s typicky krystalovou strukturou. Technické vlastnosti významné pro stavební využití, zejména pevnost, ohrusnost a odolnost vůči vnějším vlivům, jsou příznivější, než jaké zjišťujeme u mramorů sedimentárních.

5.3 Faktory degradace stavebních kamenů a sanace poruch na stavbách

Stavební objekty, jejichž hlavním stavebním materiálem je přírodní kámen, byly dlouhodobě vystaveny působení vnějších vlivů prostředí i změnám, které byly výsledkem zásahů člověka. Faktorů, které přímo ovlivňují degradaci kamenů ve stavbách je celá řada: nedostatečná údržba, necitlivá přestavba, přetížení konstrukce, dynamické vlivy, ale především působení vnějšího prostředí tedy změn klimatu.

Degradace vedoucí v konečném stádiu až k rozpadu kamenů je obvykle ztotožňována s působením vnějších vlivů, agresivních látek obsažených v atmosféře vyvolávajících nežádoucí reakce vedoucí ke změnám chemického složení a objemovým změnám vyvolávajícím vnitřní napětí a v důsledku toho až k rozpadu mikro- případně i makro-struktury stavebních kamenů. Ve skutečnosti degradace kamenů je způsobována:

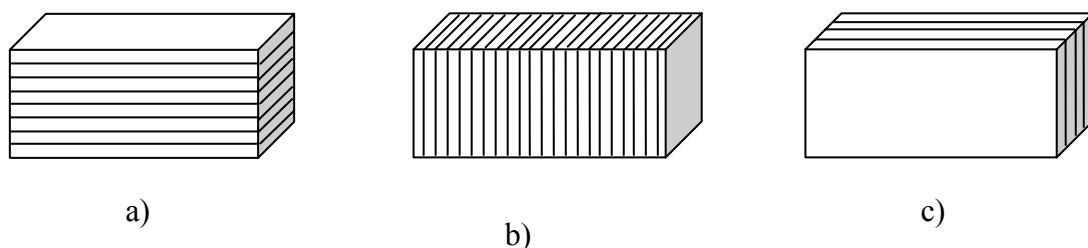
- a) změnami chemické podstaty, které probíhají samovolně v závislosti na čase, nebo jsou iniciovány změnou vnějších podmínek případně i nevhodnými zásahy;

- b) postupnou změnou povrchové vnější zóny kamene vlivem přímého styku s látkami reagujícími s některou ze složek hmoty kamene přičemž změny chemické podstaty postupují od povrchu dovnitř mikrostruktury.

Degradaci kamenů je tedy třeba chápat jako proces složený z **erozních kroků**, které mají čistě fyzikální povahu (zatěžování mechanické povahy, dilatační expanzní pochody vlivem zmrazovacích cyklů vody a krystalizací solí v pórovém systému) a **korozních pochodů** (přeměny chemické povahy vedoucí ke vzniku nových látek rozdílného mineralogického složení).

Při určitém zjednodušení výkladu pojmu degradace je možno prohlásit, že změny ve struktuře má kámen zakódované od samého počátku při svém vzniku na podmínkách, které je možno charakterizovat jako konečné podmínky utváření (teplota, tlak, chemické vlivy)., Změnou podmínek, přenesením z přírodního prostředí do průmyslového, může docházet k iniciaci procesů ve struktuře kamene - rekrytalizaci, vzniku nových chemicky odlišných hmot, ztrátě strukturotvorných látek, vzniku mikrotrhlinek, spár a dutin, které mají rozhodující vliv při **mechanickém zatěžování** kamene.

Například u typicky vrstevnaté opuky má uložení v konstrukci zásadní význam na vznik poruch: kamenný prvek uložený v poloze c) se porušuje laminárním odpadáváním celých sedimentárních ploch, zatímco v situaci a) a d) mají poruchy spíše důlkový charakter a k destrukci dochází v oblastech s lokálními změnami struktury opuky (Obr. 5.9).

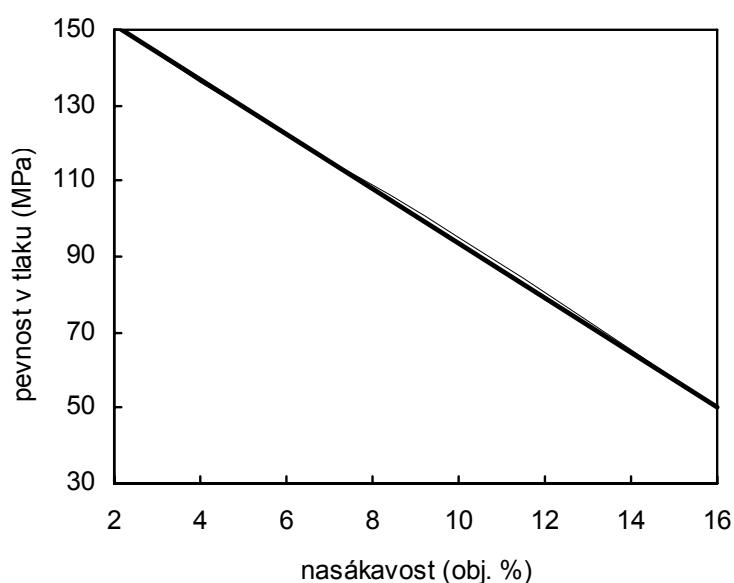


Obr. 5.9 Vliv původního uložení kamene na vznik poruch v konstrukci při mechanickém zatěžování.

U stavebních kamenů sedimentárního původu je rozhodujícím faktorem korozních a erozních procesů voda ve spojení s agresivními složkami ovzduší. Zásadní je vliv oxidů síry, dusíku a uhlíku spolu s prašností ovzduší. Celková porozita kamene je pak ukazatelem odolnosti proti

vzniku poruch při **vymrzání vody v pórech**, kdy vznikají expanzní tlaky narušující stavbu pórů a vůči **krystalizačním tlakům** při vzniku krystalů z roztoků obsahujících minerální složky původní struktury kamene narušeného vodou.

Přímou závislost pevnosti na nasákavosti, kdy při ataku opuky vodou dochází k odplavování kalciového tmelu a následkem toho k růstu její pórovitosti ukazuje Obr. 5.10. Pórovitost kolísá u v současné době těžených opuk přibližně mezi 20 až 40%.



Obr. 5.10 Závislost pevnosti opuky na nasákavosti - převzato z Kotlík P., Šrámek J., Kaše J. 2009, *Opuka*, Nakl. STOP, Praha, 109 s.

Při přeměně vody v led v pórech dochází ke změně jejího objemu a následné expanzi, kdy expanzní síly mohou převýšit pevnost kamene - dochází ke vzniku mikrotrhlin a prasklin. Velikost expanzních sil je závislá na průměru a tvaru pórů. Vymrazovací testy prokázaly, že nejnebezpečnější jsou póry o průměru 7.5 m. Čím více takovýchto pórů kámen obsahuje, tím méně je odolný vůči účinkům mrazu. Žula vydrží více než 2000 zmrazovacích cyklů (střídavé zatěžování změnami teplot mezi -20°C až +24°C), zatímco pískovec i méně než 200 těchto cyklů. Tento test se považuje za vyjádření trvanlivosti kamenů vůči vymrzání vody.

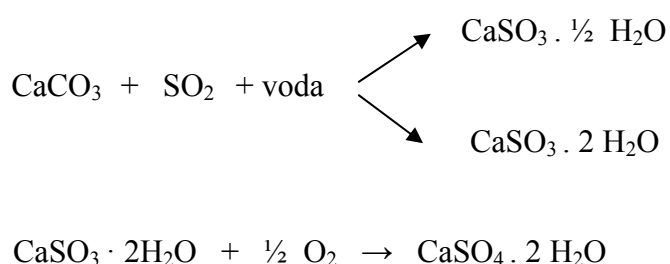
Voda obsažená v pórech se postupně stává roztokem solí. Obsahuje složky vyluhované z minerálů obsažených obvykle v malých množstvích ve struktuře ale i solí obsažených ve srážkové vodě (především uhličitany a sírany). Vlivem teplotního gradientu jsou soli

transportovány k povrchu kamene, kde se odpařují a dochází ke krystalizaci spojené se vznikem tlaků v pórech se stejným výsledkem jako při vymrzání. Rozpustné soli obsahující krystalickou vodu např. sádrovec (dihydrát síranu vápenatého $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) vyvolává hydratační tlaky, které mohou rozrušovat povrchovou zónu kamenů.

Je tedy zřejmé, že vedle daných mineralogicko-petrografických charakteristik je to i pórová struktura, která rozhoduje o trvanlivosti kamenů.

Narušování struktury kamenů korozní činností směrem od povrchu kamene dovnitř je ve své podstatě chemickým pochodem, při kterém vznikají produkty odlišné co do chemického složení od původních minerálů vytvářejících pevnou strukturu kamenů. Hlavními faktory zodpovědnými za změny ve složení kamenů jsou voda a znečištěná atmosféra od spalovacích procesů - uhlí, nafta, oleje. Obsah agresivních plynů se zvyšuje o oxidů dusíku až 200x, oxidu uhelnatého až 700x a oxidu siřičitého až 1000x.

Pro korozi kamenů je jednoznačně nejnebezpečnější oxid siřičitý SO_2 , voda tvoří reakční prostředí. U nás se na jeho obsahu v ovzduší výrazně podílí hnědé uhlí, používané při výrobě elektřiny a tepla. Dostává se do vzduchu jako suchý plyn, který snadno reaguje s vodou ve vzduchu a vytváří kyselinu siřičitou. I ve formě slabé kyseliny je pro horniny obsahující uhličitán vápenatý velmi nebezpečný. Proces degradace je komplikovaný, ale konečným produktem je vždy dihydrát síranu vápenatého nebo hořečnatého. Zjednodušeně je možno přeměnu představit ve dvou reakčních krocích:



Průběh reakce je závislý na mnoha faktorech - mineralogickém složení, pórové struktuře, specifickém povrchu (zahrnuje i vnitřní povrch pórů) i stopovém obsahu některých prvků (zvláště železa, které katalyticky urychlují korozní reakci). Vzniklý síran vápenatý (sádrovec) je mnohem rozpustnější ve vodě než uhličitán vápenatý - při 18°C se rozpouští ve vodě 0.013 g/l CaCO_3 , ale 2.020 g/l $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Takže v místech, kam se dostává dešťová voda, je

síran vápenatý vymýván z povrchu a kámen je přímo ochuzován o pojivou složku. Korozní proces je tedy zodpovědný za ztrátu pojiva ve vnitřní struktuře kamene a v případě vzniku krusty a jejímu odpadnutí za snížení až úplnou ztrátu pevnosti jako je tomu u zpráškování **opuky**.

Proces degradace pískovce je na rozdíl od opuky ovlivněn především objemovými změnami, ke kterým dochází při střídavém mrznutí a tání vody v pórech a krystalizací rozpustných solí na povrchu a pod povrchovou zónou kamene. Velký vliv má i zatěžování pískovce nasyceného vodou, protože tento kámen vykazuje značný pokles pevnosti a modulu pružnosti. Rozpad pískovce ilustruje Obr. 5.11.



Obr. 5.11 *Postup rozpadu pískovcového zdiva.*

5.4 Konzervace a konsolidace narušených kamenů

Účelem **konzervace** kamenných prvků i celých objektů z kamene je zlepšit jejich aktuální mechanické vlastnosti snížené degradačními procesy, zvýšit jejich odolnost proti působení povětrnostních vlivů a zamezit vnikání srážkové a odstříkové vody. Konsolidace kamene je náročný proces zahrnující zpevňování a doplňování zvláště narušených kamenných prvků staveb.

Dříve než se rozhodne o postupech a prostředcích konzervace je třeba provést podrobnou diagnostiku stavby. Závěry provedených průzkumů a zkoušek by měly dát jednoznačnou

odpověď na příčiny poškození kamene. Prvým krokem je petrologické určení typu horniny, dále strukturu a statigrafii trhlin, stupeň zpráškování a odebrat vzorky k analýze současného fyzikálního stavu a chemického složení. Pouze celkové závěry těchto pozorování a zkoušek mohou umožnit provést konzervaci a zamezit ještě zhoršení stavu kamene.

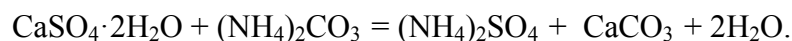
Diagnostika narušených kamenů zahrnuje zkoušky stanovení objemové hmotnosti, pórovitosti, nasákavosti. Důležitým zjištěním je i orientační zjištění rychlosti vztlínání vody, které ukáže schopnost přijímat tekuté konzervační prostředky i možnou hloubku jejich penetrace. Petrografický průzkum umožňuje odhalit složky horniny, které jsou snadno napadány vodou a jejími agresivními látkami (jsou to např. slídy, živec, tmely, jílovité podíly).

Prvým krokem rozhodujícím o způsobech konzervace je průzkum povrchové zóny kamenů pokrytých obvykle krustou. Vznik krusty je výsledkem negativních změn v ovzduší průmyslových oblastí a hustě osídlených městských aglomeracích, ale také nedostatečné nebo většinou vůbec neprováděné údržby kamenných památkově ceněných historických objektů. V současné době je možno pozorovat značné aktivity v **čištění** kamenných fasád významných objektů se snahou odstranit nánosy špíny pokud možno jen té části krusty, která vznikla na povrchu kamene (Obr. 5.12).

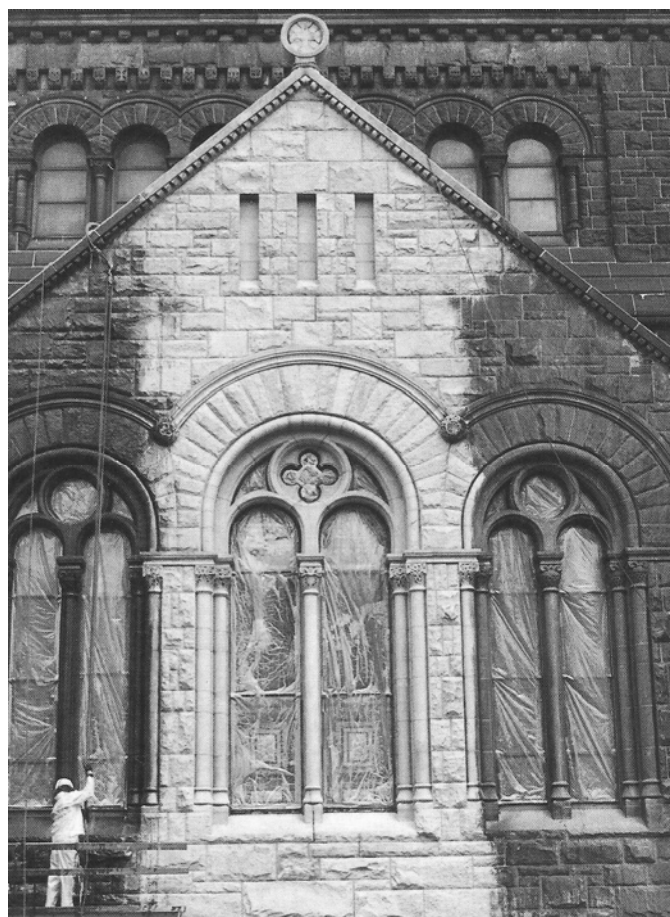
Většina čisticích postupů je založena na aplikaci tlakové vody. Dosavadní zkušenosti ukazují, že většina postupů je založena na aplikaci tlakové vody. Dosavadní zkušenosti ukazují, že úspěchy v tomto směru jsou závislé jednak na typu kamene, jeho textuře (hladký povrch mramoru je příznivější než povrchově vysoce porézní pískovec) a způsobu provedení daného limitním tlakem vody a tvarem trysky přístroje.

Současné moderní postupy jsou založeny na společném uplatnění tlakové vody a látek, které rozpouštějí součásti krusty působící největší problémy především u staveb z pískovce. Jde v první řadě o málo rozpustný sádrovec, který je podstatnou složkou krusty se zvláště nepříznivým degradačním účinkem.

Princip současného působení proudu tlakové vody a chemického činidla je založen na reakci uhličitanu amonného se sádrovcem:



Nepatrně rozpustný sádrovec (2.23 g/l vody) je působením uhličitanu amonného přeměněn na síran amonný, který je podstatně lépe rozpustný ve vodě (730 g/l vody). Přitom se využívá i mechanický účinek krystalické formy uhličitanu amonného na rozbití krusty a je pak možno snížit účinný tlak vody až desetkrát. Tento způsob je pokládán za nejefektivnější čištění u pískovcových fasád historických objektů.



Obr. 5.12 *Presbyteriánský kostel v Pittsburgu, USA.*

Technika konzervace závisí na penetrační schopnosti konzervačního prostředku a technologii napouštění. Pro povrchy kamene, které dobře sají je nanášení štětcem metodou splývavého filmu. Napouštěním pomocí tlakového postřikovače se kapalný konzervační prostředek nanáší pod nízkým přetlakem, aby se zamezil jeho vliv na vdechování rozprášených, většinou zdraví škodlivých látek. Kompresní napouštění je vhodné pro hloubkovou konzervaci.

Výběr vhodných konzervačních prostředků je vysoce odbornou záležitostí a měl by být vždy podložen dlouhodobými poznatky s aplikacemi v terénu. Ideální konzervační prostředek by měl splňovat tyto požadavky:

- a) dlouhodobý konzervační účinek,
- b) zajistit, aby nedošlo jeho aplikací ke změně vzhledu povrchu kamene,
- c) stupeň zpevnění by neměl převýšit původní pevnost kamene,
- d) jeho aplikací by nemělo dojít ke změně difúzního odporu (zamezení „dýchání“)
- e) viskozita kapalných prostředků by měla být nízká ve formě pravých roztoků, nikoli emulzí nebo disperzí,
- f) vytváření pevné aktivní látky by nemělo být provázeno zvýšením teploty, konzervační zpevňovací látka by měla být reverzibilně odstranitelná.

Je zřejmé, že splnění všech uvedených požadavků klade vysoké nároky na výběr vhodného konzervačního prostředku. V minulosti používané a ověřené konzervační prostředky jsou v současné době stále doplňovány novými materiály a jejich aplikace přináší jen střídavé úspěchy.

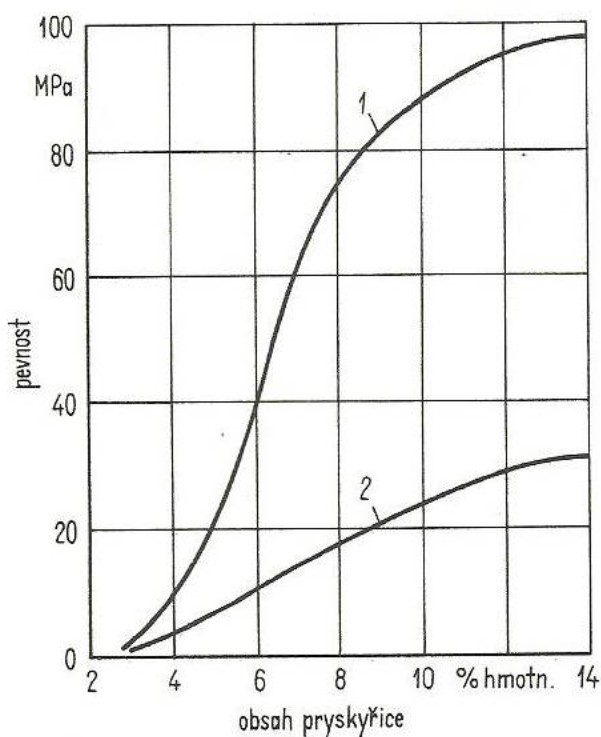
Z pohledu stavební chemie lze **konsolidační prostředky** rozdělit na anorganické a organické. v tomto smyslu pouze vápenná voda a hydroxid barnatý zbývají z dlouhé řady látek, které byly v historickém období používány. Základní sortiment konsolidačních látek je dnes založen na esterech kyseliny křemičité, akrylátech a epoxidech, tedy materiálech z oblasti organické chemie. Některé prostředky se zcela zdiskreditovaly ať už vlivem neblahých důsledků v průběhu dlouhodobého užívání - hlavními reprezentanty jsou **sodná a draselná vodní skla** - nebo nevhodnou technologií aplikace jako např. **fluáty**.

Nejširší uplatnění nachází stále vápenná voda, která se považuje za jednoznačně bezpečný konsolidant pro zpevňování kamenů, jejichž podstatnou složkou je uhličitán vápenatý (opuka). Nevýhodou je pouze malá účinnost protože aktivní složka hydroxid vápenatý je málo rozpustný ve vodě (1,85 g/l) a je třeba ho vícenásobně aplikovat.

Od 70. let minulého století převažují pro zpevňování porézního kamene **roztoky polymerů** vytvářející na vnitřních stěnách pórů tenký film a vedle ochrany před agresivními látkami a podstatně zvyšují pevnostní charakteristiky kamene. Avšak zpevňující efekt nejrozšířenějších polymerů - akrylátů, polyesterů, epoxidů - se v některých případech ukazuje jako

problematický - ucpání pórů a nepropustné zpevněné vrstvy znamená ve svém důsledku podstatné snížení difúzních charakteristik kamenů a tak zpevnění pouze povrchové vrstvy vede často k rychlejší destrukci porézních stavebních kamenů.

Restaurátoři dávají dnes přednost **polyesterovým** a **epoxidovým pryskyřicím** pro jejich vynikající adhezni schopnost, odolnost proti působení vody, alkáliím, i kyselinám. Jsou vhodné i pro výrobu umělého kamene (Obr. 5.13), který je nedílnou součástí restaurátorských zásahů.



Obr. 5.13 Pevnost umělého pískovce na bázi polyesterové pryskyřice,
1-pevnost v tlaku, 2-pevnost v tahu za ohybu – převzato z Schulze W. a kol. 1990,
Necementové malty a betony, SNTL Praha, 271 s.

6 BETON – VZTAH MEZI STRUKTUROU A VLASTNOSTMI

6.1 VÝVOJOVÉ ETAPY VÝVOJE BETONU

6.2 VÝROBA PORTLANDSKÉHO CEMENTU

6.3 ROZDĚLENÍ A VLASTNOSTI ČISTÝCH LÁTEK

6.4 VZNIK PORÉZNÍ STRUKTURY BETONU

6.5 HYDRATACE PORTLANDSKÉHO CEMENTU

6.6 STRUKTURA BETONU

6.7 VODA V HYDRATOVANÉM CEMENTOBÉM POJIVU

6.8 PÓRY V HYDRATOVANÉM CEMENTOVÉM POJIVU

6.9 ZPRACOVATELNOST BETONOVÉ SMĚSI

6.10 VLIV PORÉZNÍHO PROSTORU NA VLASTNOSTI BETONU

6.11 PŘÍSADY DO BETONU

Beton je v současném stavebním průmyslu nejrozšířenější a nejdůležitější stavební hmotou. Suroviny pro výrobu základního komponentu betonu – cementu i další složky – písku a kameniva, jsou v dostatečných zásobách v obydlených oblastech všech kontinentů. Jednoduchá technologie výroby a její přizpůsobivost různým podmínkám, výhodné mechanicko-fyzikální vlastnosti a s tím související všestrannost a univerzálnost využití vytvářejí předpoklady pro příznivé ekonomické hodnocení v tradiční individuální i hromadné výstavbě. V Tab. 6.1 uvádíme pro představu množství použitého betonu v porovnání s ostatními běžnými konstrukčními materiály. Hodnoty odpovídají spotřebě materiálů v roce 2000 v USA, které patří společně s Čínou k největším producentům cementu a betonu na světě.

Tab. 6.1 *Množství stavebního materiálu použitého v USA v roce 2000.*

Materiál	Objem (10^6 m^3)	Hmotnost (10^6 t)
Stavební dřevo	107	-
Beton	275	640
Cement	33	105
Ocel	2	13

Pálené cihly a výrobky z jílu	-	39
Stavební kámen	0,3	1
Asfalt	-	2
Neželezné kovy	-	29

Častou aplikaci betonu jako konstrukčního materiálu je možné zdůvodnit celou řadou výhodných užitných vlastností, kterých většina ostatních stavebních materiálů není schopna dosáhnout, případně pouze některých z nich. Hlavní výhody betonu jako konstrukčního materiálu jsou následující:

- vysoká pevnost v tlaku,
- možnost odlití specifických tvarů,
- trvanlivost,
- požární odolnost v závislosti na použitém typu kameniva a pojiva,
- možnost produkce přímo na stavbě,
- ekonomické výhody,
- energetické výhody,
- estetické vlastnosti.

Jednotlivým vlastnostem betonu se budeme věnovat v následujících kapitolách. Přesto zde popíšeme alespoň výhody betonu z pohledu jeho ekonomické a energetické náročnosti. Nejvyšší ekonomickou náročnost materiálů představují **náklady na energii**, která je nutná pro jejich výrobu a často je doprovázena také negativními vlivy na životní prostředí, jako je například produkce CO₂. V porovnání s množstvím energie potřebné pro výrobu oceli je množství energie spotřebované při produkci betonu podstatně nižší. Tento fakt je způsoben tím, že výroba oceli je vysokoteplotní proces (300 GJ/m³), přičemž pouze jeden z hlavních komponentů betonu – cement, vyžaduje teplotní zpracování (22 GJ/m³). Nejvyšší náklady na výrobu spojené s energií představují opět výdaje spojené s produkcí ocelové výztuže. Přesto ale celkové náklady na výrobu betonu (i vyztuženého) nedosahují nákladů na výrobu oceli, hovoříme-li o nákladech na stejný konstrukční prvek mající stejné mechanicko-fyzikální vlastnosti. Energetické náklady na výrobu betonu bývají často snižovány **využitím druhotných materiálů** pro jeho výrobu, například **elektrárenského popílku, vysokopecní strusky, mikrosiliky, energosádrovce, chemosádrovce** apod. Tyto vedlejší produkty

průmyslové výroby přitom nesnižují pouze množství použitého cementu, ale mohou zlepšit vlastnosti betonu v porovnání s betonem vyrobeného pouze na bázi portlandského cementu.

Kromě celé řady výhod má beton také své specifické nevýhody, které limitují jeho použití. Mezi hlavní **nevýhody betonu** (hovoříme o prostém, nevyztuženém betonu) patří:

- nízká pevnost v tahu,
- nízká tažnost,
- objemová nestálost,
- nízký poměr pevnosti k hmotnosti.

V technické praxi se problém nízké pevnosti v tahu řeší přidáním výztuže, ať rozptýlené či definovaně orientované, která přenáší převážnou část tahového napětí při zatížení betonových konstrukcí. Objemová stálost betonu, pomineme-li počáteční smršťování betonu ve stádiu hydratace, je určena jeho permeabilitou pro agresivní složky prostředí, které narušují vnitřní strukturu betonu a vedou ke vzniku reakčních a krystalizačních produktů vyšších molekulárních objemů, které následně narušují strukturu betonu. Tento problém již současná stavební praxe umí řešit, například technologickými opatřeními při výrobě betonu nebo již samotných složením čerstvé betonové směsi. Nízký poměr pevnosti k hmotnosti je možné částečně zvýšit výrobou lehčených betonů.

Cesta k dosažení současného stupně poznání o struktuře betonu a možnostech technologického rozvoje vedoucí k výrobě betonu vysokých kvalit byla velmi dlouhá. Až do poloviny 19. století byly nové poznatky získávány výhradně na základě zkušeností získávaných postupně na stavbách stále dokonalejších objektů. Historickým předělem byl rok 1869, kdy W. Michaelis publikoval **teorii chemismu tvrdnutí portlandského cementu**. V následující kapitole si přiblížíme jednotlivé historické etapy této cesty z pohledu materiálového inženýrství.

6.1 Vývojové etapy výroby betonu

Prvou hmotou, kterou vzhledem k použitým surovinám, způsobu výroby i vlastnostem, můžeme považovat za materiál podobný betonu, byla směs vápna, drcených cihel a sopečného tufu používaná Féničany již kolem roku 1000 př. Kr. ke stavbě vodovodních přivaděčů a

zásobních cisteren na vodu. Je však třeba říci, že Féničané navazovali nepochybně na starší empiricky získávané znalosti starověkého stavitelství.

Ve druhém století př. Kr. vynalezli Řekové novou zdící techniku, kdy masivní kamenná zeď s mezerou uprostřed byla výplní z lité malty a lomového kamene zpevňována a vytvářela zdivo nazývané **emplekton** (Obr. 6.1). Od Řeků převzali emplekton Římané, propracovali složení výplňové malty skládající se z vápna, sopečného tufu, drceného kamene s pískem a tuto maltu nazvali **opus caementum**. Tento termín se v průběhu vývoje změnil až na dnes jednotný název **hydraulického pojiva - cement**.



Obr. 6.1 *Opus spicatum, zbytky římských staveb (Aquincum, Budapešť).*

Původ moderního označení pro lité zdivo termínem beton, není dosud uspokojivě objasněn. Většinou se soudí, že jeho vznik se odvozuje od starofrancouzského slova beter, znamenajícího tuhnutí (to podporuje i anglický termín pro tuhnutí = *concrescere* a z toho *concrete*).

Prudký rozvoj průmyslové výroby v 17. a 18. století znamenal i rozvoj výroby staviv, především betonu. S tím byl spojen i zájem zkvalitnit dominantní přírodní hydraulická pojiva. Intenzivní obchod v Evropě se **směsí trasu a mleté tufové horniny sopečného původu** lze zaznamenat po uzavření Vestfálského míru. V této době se objevují první pokusy o umělou výrobu maltového pojiva z jiných surovin. Úspěšný v tomto hledání, které mělo výhradně charakter širokých empirických zkoumání, byl nakonec až J. Smeaton (1724-1792), který došel k závěru, že pevnost zatvrdlého **vápna závisí na chemickém složení vápence určeného k výrobě hydraulického pojiva - cementu**. Toto poznání lze považovat za

historický předěl ve výrobě cementu a tedy i betonu, a představuje klíč k dalšímu zkoumání hydraulických vlastností již na teoretické rovině.

V roce 1796 získává Angličan J. Parker patent na způsob výroby přírodního hydraulického cementu (nesprávně označovaného jako **románský cement**) pálením vápence vhodného chemického složení s příměsí hlinitých součástí. Tento typ pojiva betonu se stal převažujícím pojivem betonu v období první poloviny 19. století. Obdobný proces vývoje hydraulických pojiv lze pozorovat i ve Francii, kde v roce 1813 připravil Vicat umělé hydraulické vápno kalcinací syntetické směsi vápence a jílu. Proces výroby hydraulického vápna zavedl později, v roce 1822, v Anglii James Frost. Konečně, v roce 1824, J. Aspdin, stavitel z Leedsu, obdržel patent na výrobu „portlandského cementu“. Označení „portlandský“ vytvořil sám Aspdin, na základě podobnosti vytvrzeného cementu s vápencem těženém na ostrově „Isle of Portland“, který byl v 18. a 19. století často používán k výstavbě budov v jižní Anglii.

Po poznání hydraulických vlastností vápenných pojiv s přidáním jílových minerálů se následující materiálový vývoj soustředil na zdokonalení pojivové složky – cementu (úprava složení – vstupní suroviny, pece pro výrobu cementu, mlýny, atd.) Současně s rozvojem výroby hydraulických pojiv se posouvá i úsilí k řešení technologických problémů výroby betonu.

Mezi průkopníky rozšiřování betonu do stavební výroby patří především F. Coignet (1814-1888), který formuluje řadu zásad, jejichž realizace umožňuje rozšíření betonu. Je to například potřeba důkladného hutnění čerstvého betonu, užívání minimálního množství vody, drcení kameniva před aplikací do betonové směsi a formuluje i statické důvody pro vyztužování betonu ocelí. Nelze zapomenout úlohu J. Moniera (1823-1906), považovaného za otce železobetonu, který významně přispěl k rozšíření tohoto dnes nejrozšířenějšího konstrukčního stavebního materiálu (železobetonové příčky - monierky).

Během následujícího vývoje a rozšíření betonu byla vytvořena řada technologických principů a postupů, které přetrvávají v drobných změnách až do padesátých let 20. století. V teoretické oblasti jsou řešeny otázky optimálního složení betonové směsi, jsou navrhovány nové typy hydraulických pojiv betonu (směsné cementy, hlinitanový cement), postupy zpracování čerstvé betonové směsi, úloha přísad (především plastifikátorů), trvanlivost vůči agresivnímu

prostředí. Lze říci, že snaha zlepšit mechanicko-fyzikální vlastnosti betonu se soustřeďuje na otázky chemického charakteru složek betonových směsí.

Klíčovou teoretickou práci publikovanou v roce 1955 T. C. Powersem je možno považovat za kvalitativně nový pohled na vztah mezi pevností a strukturním uspořádáním betonu prokazující, že pevnost betonu je nepřímě úměrná obsahu pórů v makrostruktuře. Tato práce umožnila formulovat nové postupy při výrobě betonu, které vedly k výrobě betonů vyšších užitných betonu, které jsou v současnosti označovány pojmem vysokohodnotné betony. Složením, vlastnostmi a návrhem vysokohodnotného betonu se budeme podrobně zabývat v kapitole 7.

6.2 Výroba portlandského cementu

Portlandský cement je nejčastějším typem anorganického pojiva, které se v současnosti pro výrobu betonu používá. Z tohoto důvodu se v této kapitole budeme zabývat výhradně technologií výroby portlandského cementu, která vychází z požadavků na výrobu slínku, jehož mikrostruktura je tvořena novými sloučeninami (fázemi) vzniklými během výroby ze surovinové směsi. Surovinová směs musí být jemně mletá s **velkým měrným povrchem**, aby průběh reakcí v žáru a vznik taveniny podmiňující vytvoření slínku byly co nejrychlejší a nejúplnější. Teplota, doba a prostředí výpalu jsou pak pro průběh reakcí rozhodující - i při správném dodržení chemismu lze nevhodným výpalem dospět k nekvalitnímu slínku.

Výrobu portlandského cementu lze v zásadě rozdělit do tří základních fází:

- výroba surovinové moučky,
- výpal portlandského slínku,
- mletí a výroba cementu.

V první fázi výroby portlandského cementu je nejprve provedena těžba vápence a korekčních surovin, jejich drcení, mletí a homogenizace, která se provede na základě přesných chemických analýz jednotlivých složek surovinové směsi. Je nutné zdůraznit, že mletí surovinové směsi patří k nejdůležitější části přípravy vstupních surovin před výpalem a zároveň patří v technologii výroby cementu k technologicky i energeticky k nejnáročnějším procesům. Během mletí je podrcená, a primárně homogenizovaná surovinová směs mletá na moučku o velikosti zrna řádově X0 μm .

Při výrobě cementu rozlišujeme v zásadě tři základní typy surovin: **základní**, **vedlejší** a **pomocné**. Mezi základní složky cementu řadíme suroviny vápenaté a jílovité (sialitické). **Vápenaté složky** jsou tvořeny vápenci, jílovitými vápenci a krystalickými vápenci (mramory). Hlavním minerálem je kalcit (CaCO_3), nevhodné jsou dolomitické vápence, tj. karbonátové horniny s vyšším podílem dolomitu ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), neboť MgO způsobuje rozpínání a vznik tahových napětí ve struktuře betonu. Optimální obsah CaCO_3 ve vápenci je udáván zhruba v rozmezí 75 až 80 hm. %, zbytek připadá na jílovité složky, křemen, sloučeniny železa apod. K takovéto surovině pak není potřeba přidávat jíl nebo další složky obsahující SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

Mezi **jílovité suroviny** pro výrobu cementu řadíme hlíny, jíly, slíny, jílovce, jílovité břidlice - horniny sedimentárního původu, obsahující zejména jílové minerály (fáze tvořené SiO_2 , Al_2O_3 , popř. Fe_2O_3 a dalšími oxidy). Tyto složky se do surovinové směsi přidávají v případě, že základní složkou směsi je vysokoprocentní vápenec, obsahující příliš mnoho CaCO_3 .

Vedlejší (korigující) suroviny se přidávají do surovinové směsi v menším množství a slouží ke korekci obsahu hydraulických oxidů. Řadíme mezi ně loužence - kyzové výpražky, ocelářenské kaly (korekce Fe_2O_3), bauxit (korekce Al_2O_3), křemičitý písek, křemelinu (korekce SiO_2). Při výrobě cementu je zároveň snaha o co nejnižší cenu finálního výrobku. Z tohoto důvodu se při výrobě cementu používají často také odpadní průmyslové látky namísto přírodních surovin.

Pomocné suroviny se používají v malém procentním obsahu. Upravují vlastnosti surovinové směsi za syrova nebo v průběhu výpalu. Mezi pomocné suroviny patří **intenzifikátory pro výpal slínku** (látky, které při malém přídávku snižují viskozitu kapalně fáze – fluorit CaF_2), **intenzifikátory pro mletí slínku** (zkracují dobu mletí), mineralizátory (látky ovlivňující tvorbu některých slínkových minerálů), regulátory tuhnutí (slouží k regulaci průběhu tuhnutí cementu po jeho rozdělení s vodou, např. sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$).

Zastoupení hlavních surovin v surovinové směsi definují cementářské moduly. **Hydraulický modul** je definován jako hmotnostní podíl obsahu jednotlivých oxidů dle následujícího vztahu

$$H_m = \frac{\text{CaO}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2}.$$

Nízký hydraulický modul představuje nižší vývin hydratačního tepla. Pro vyšší hodnoty hydraulického modulu získáváme vysokou počáteční pevnost. Optimální hodnota pro hydrataci je udávána v rozsahu 1.75 – 2.4.

Silikátový modul je definován jako

$$S_m = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}.$$

Čím je větší, tím pomaleji cementy tvrdnou, typické hodnoty se pohybují v intervalu 1.7 – 2.7.

Aluminátový modul popisuje následující vztah

$$A_m = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}.$$

Jeho hodnoty jsou typicky v rozsahu 1.5 – 2.5. Čím vyšší je hodnota aluminátového modulu, tím vyšší hydratační teplo cementy vyvíjejí.

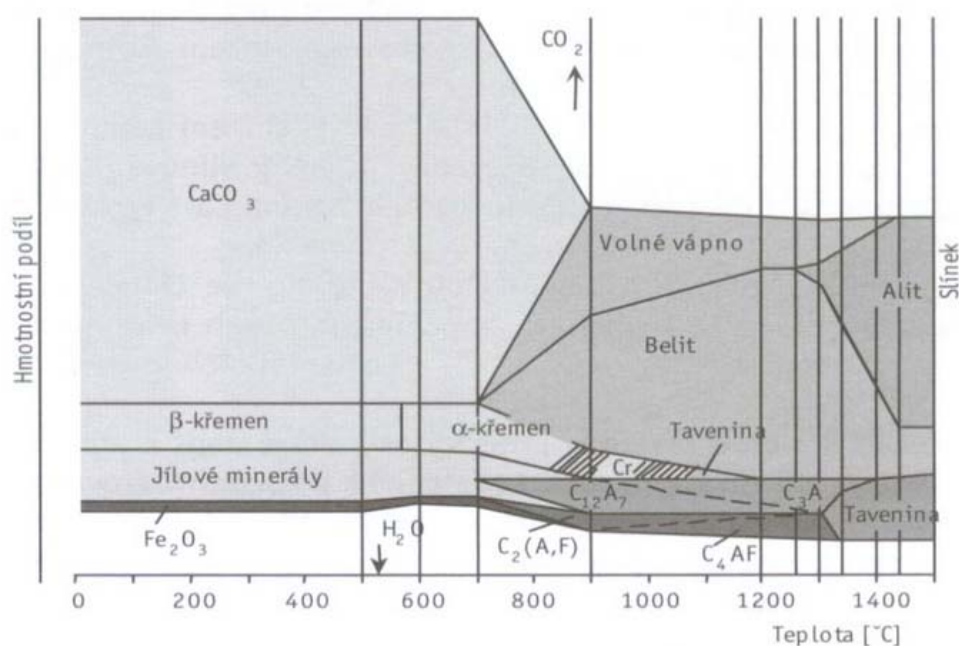
Druhou fází při výrobě cementu představuje výpal slínku, který se nejčastěji provádí v **rotačních pecích**. Během výpalu prochází surovinová směs celou délkou pece a postupuje v ní různými tepelnými pásmy: sušícím (do 200°C), přehřívacím (200 – 800°C), kalcinačním (dekarbonatizačním, 800 – 1200°C), exotermickým (1300°C), slinovacím (1400 – 1450°C) a chladícím (1100 – 1000°C). Jednotlivé reakce, které probíhají v surovinové směsi během jejího výpalu v cementářské peci, jsou uvedeny v Tab. 6.2. V této tabulce se poprvé v textu seznámíme s betonářskou terminologií pro jednotlivé složky portlandského slínku, kde C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, C = CO₂ a S značí SO₃.

Tab. 6.2 *Reakce v surovinové směsi během výpalu portlandského slínku, převzato z Henning O., Lach V. 1983, Chemie ve stavebnictví, SNTL.*

Teplota (°C)	Reakce	Chemická rovnice
20 - 200	vypuzení volné vody (sušení)	-
200 - 450	vypuzení adsorbované vody	-
450 - 600	rozklad jílu, vznik metakaolinitu	$Al_4(OH)_8Si_4O_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3 \cdot 2SiO_2) + 4H_2O$
600 - 900	reakce metakaolinitu vznik C ₂ S a CA (před C ₂ S), dále C ₂ F	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 + 5CaCO_3 \rightarrow$ $CaO \cdot Al_2O_3 + 2CaO \cdot SiO_2 + 5CO_2$ $2CaCO_3 + Fe_2O_3 \rightarrow 2CaO \cdot Fe_2O_3 + 2CO_2$

900 - 1000	rozklad vápence, vznik $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ a $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ $5\text{CaO} + 2\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 2(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2) + \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
1000 - 1300	vznik dalšího C_2S , dále vznik C_4AF a C_2A , dosavadní reakce bez účasti taveniny (v tuhé fázi)	zkrácené vzorce: $2\text{C} + \text{S} \rightarrow \text{C}_2\text{S}$ $\text{CA} + 2\text{C} \rightarrow \text{C}_3\text{A}$ $\text{CA} + 3\text{C} + \text{F} \rightarrow \text{C}_4\text{AF}$
1300 - 1450	vznik taveniny (slinování), reakce za účasti taveniny, vázání přebytku C na C_2S za vzniku hlavního slínkového minerálu C_3S	$\text{C}_2\text{S} + \text{C} \rightarrow \text{C}_3\text{S}$

Vznik hlavních složek portlandského slínku v závislosti na teplotě výpalu je popisuje také Obr. 6.2.



Obr. 6.2 Vznik složek portlandského slínku při výpalu.

Cementový slínek je tvořen směsí různých vápenatých křemičitanů, hlinitanů, železitanů a dalších fází, přičemž mineralogické složení slínku má zásadní vliv na konečné vlastnosti slínku a cementu. V portlandském slínku bylo doposud popsáno více než 25 minerálních fází, rozhodující význam pro vlastnosti cementu však mají čtyři hlavní sloučeniny:

- trikalciúmsilikát (C_3S),
- dikalciumsilikát (C_2S),

- trikalciumaluminát (C3A),
- tetraalkciumaluminoforit (C4AF).

Kromě výše uvedených minerálních fází můžeme v portlandském slínku popsat tzv. **technické minerály** (fáze) – alit, belit a celit. V betonářské praxi se většinou klade rovnítko mezi C₃S a alitem, C₂S a belitem a C₄AF a celitem, mineralogicky však tyto technické fáze obsahují ještě další složky.

Alit je nejdůležitějším slínkovým minerálem. Obsah alitu ovlivňuje rychlost tvrdnutí, hydratační teplo a pevnosti (zejména počáteční) cementu. Je charakteristický vysokou reaktivností, která se projevuje rychlým růstem pevností a značným vývinem hydratačního tepla. Belit se vyznačuje pomalejším, ale déletrvajícím růstem pevností a menším vývinem hydratačního tepla. Alit a belit představují hlavní slínkové minerály, jejich obsah je obvykle 75 - 85% hmotnosti slínku. Mezi krystaly alitu a belitu jsou přítomny především aluminátová a ferrialuminátová fáze, přičemž jejich objemový podíl na objemu je obvykle 20 – 25% hmotnosti. Kromě hlavních slínkových minerálů obsahuje portlandský slínek další vedlejší složky jako například volné vápno (CaO), jehož obsah se pohybuje okolo 2% hmotnosti. Další složkou je MgO, který se může objevovat jako součást tuhých roztoků za vzniku Mg(OH)₂, která je doprovázena objemovou změnou. Obsah volného MgO ferrialuminátové fáze nebo C₃S, může být součástí sklovité fáze a může se vyskytovat i jako volné MgO ve formě minerálu **periklasu**. Periklas se objevuje při obsahu MgO vyšším než 2%. Volné MgO je nežádoucí příměsí ve slínku vzhledem k jeho opožděné reakci s vodou ve slínku je v průměru okolo 1.5%. Přehled hlavních slínkových minerálů a jejich základních vlastností ve vztahu k hydrataci je uveden v Tab. 6.3. Mineralogické složení slínku je výsledkem čistoty, kvality a chemické složení základních materiálů použitých pro výrobu surovinové moučky, stejně jako homogenizace jednotlivých složek této směsi a jejich procentuelního zastoupení. Z tohoto důvodu je v Tab. 6.3 uveden vždy rozsah obsahu jednotlivých složek slínku.

Tab. 6.3 *Mineralogické složení portlandského slínku, převzato z Gregerová, M. 1996, Petrografie technických hmot, Masarykova univerzita v Brně.*

Název minerální fáze	Vzorec	Technické fáze	Obsah (%)	Hydratace
trikalciumpilikát	C ₃ S	alit	37 - 75	rychlá
dikalciumpilikát	C ₂ S	belit	5 - 40	střední

trikalciumaluminát	C ₃ A	amorfní fáze	3 - 15	velmi rychlá
tetrakalciumaluminoforit	C ₄ AF	celit	9 - 14	rychlá
oxid vápenatý	CaO	volné vápno	< 4	pomalá
oxid hořečnatý	MgO	periklas	< 6	pomalá

Poslední fázi při výrobě cementu představuje mletí slínku a výroba cementu. Ze slínkových sil se slínek odebírá pro mletí v cementových mlýnech, kde se mele společně s regulátory tuhnutí (energósádrovec, chemosádrovec), případně dalšími složkami (struskou, popílkem a jinými) na hotový produkt – cement, který je veden do cementových sil a následně expedován. Na tomto místě je nutné zdůraznit, že mletí slínku je zásadní výrobní operací vzhledem k použití cementu. Jemně mleté cementy rychleji hydratují (mají větší měrný povrch), mají větší počáteční a konečné pevnosti, vyvíjejí větší hydratační teplo, při zpracování jsou plastičtější. Minimální jemnost mletí Portlandského cementu je 225 m²/kg.

6.3 Základní druhy cementů

Jelikož se v současné době vyrábí celá řada různých druhů cementů, zaměříme se podrobněji pouze na některé z nich. Z pohledu využívání jednotlivých typů cementů ve stavebním průmyslu můžeme obecně dělit cementy na **cementy pro obecné použití** a **cementy speciální**, navrhované a produkováné pro speciální aplikace, ve kterých by běžné cementy nemohly být využity.

Cementy pro obecné použití definuje technická norma ČSN EN 197-1, která je platná od 1. 4. 2002. V této normě jsou cementy pro obecné použití označovány jako CEM a jsou děleny do pěti základních skupin. Všechny tyto cementy mají za základní složku portlandský slínek.

Dle té to normy tedy dělíme cementy na:

- CEM I **Portlandský cement** – obsahuje portlandský slínek a max. 5% minoritních přísad,
- CEM II **Portlandský cement směsný** – obsahuje portlandský slínek a max. 35% dalších složek,
- CEM III **Vysokopecní cement** – tvořen portlandským cementem a vyšším procentuelním zastoupením vysokopecní strusky,
- CEM IV **Pucolánový cement** – obsahuje portlandský cement a max. 55% pucolánových příměsí,

- **CEM V Směsný cement** – tvořen portlandským cementem, vysokopecní struskou, elektrárenským popílkem a pucolánovými příměsemi.

Kromě výše uvedeného dělení cementů pro obecné použití do pěti základních kategorií se v označení cementů uvádí také hodnota jejich pevnostní třídy, která představuje pevnost cementové pasty po 28 dnech hydratace. V České republice se v současné době vyrábějí pevnostní třídy cementů 32.5, 42.5 a 52.5. U rychlovazných cementů dosahujících vysokých počátečních pevností se připojuje označení třídy cementu R. Cementy, která mají standardní dobu tuhnutí, se označují N.

Výše uvedené typy cementů se používají v Evropě. Například v USA se pro klasifikaci cementu používá norma ASTM C150, pro směsné cementy norma ASTM C595. Je nutné zmínit odlišné chápání směsných cementů v Evropě a v USA, neboť směsné cementy v evropském smyslu se v USA produkují velmi málo, neboť minerální příměsi jsou do struktury betonu přidávány nejčastěji až při míchání čerstvé betonové směsi. Z tohoto pohledu můžeme všechny evropské cementy vyráběné v Evropě dle normy EN 197-1 označit jako směsné.

Speciální cementy jsou všechny typy cementů se speciálními vlastnostmi, které se od běžných typů cementů liší svým složením, výrobou, a následným mechanismem tuhnutí. Můžeme rozlišovat například cementy:

- **silniční** – charakteristický limitovaným obsah C_3A ve slínku ($< 8\%$) a pevností v tahu za ohybu minimálně 6.5 MPa (musí odolávat zvýšenému tahovému a smykovému namáhání), mele se na měrný povrch maximálně 350 až 370 m^2/kg ,
- **hlinitanový cement**,
- **rozpínavý cement**,
- **vysokohodnotný cement** - obsahuje vysoké procento C_3S , jemně mletý,
- **bílý cement** – vyrábí se z bílých vysokoprocentních vápenců a kaolinu s nízkým obsahem oxidů železa ($< 1\%$),
- **barnatý cement**,
- **síranovzdorný cement** – navržen pro použití v prostředí s vysokou koncentrací síranových iontů, musí mít obsah $C_3A < 3\%$,
- **cementy upravené přísadami** – hydrofobními, plastifikačními, fungicidními, provzdušňujícími apod.

Hlinitanové cementy jsou hydraulická pojiva pro výrobu betonů určených pro monolitické či prefabrikované stavby pecí a vyzdívek, tzv. **žárovetonů** (do 1600°C) a pro betony odolné vyšším teplotám (typicky nad 200°C). Surovinou směs pro jejich výrobu tvoří velmi čistý vápenec a **bauxit**. Jejich výroba je velmi nákladná. Vyrábí se například tavením v elektrické obloukové peci při teplotách 1500 - 1600°C. Tavenina se pomalu ochlazuje tak, aby vznikl krystalický AS, který se následně mele na prášek. Slínek hlinitanového cementu se skládá z 45% Al_2O_3 (u žáruvzdorných až 81%) a 40% CaO . Zbytek tvoří oxidy železa, křemíku a zbytkové příměsi. Ze slínekových minerálů hlinitanového cementu pak můžeme identifikovat například C_2A , C_3A_5 , C_3A_2 , C_2AS , C_4AF , C_5A_3 a další. Slínek po smíchání s vodou rychle hydratuje na $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ za uvolnění značného hydratačního tepla - 550 – 650 J/g (běžné portlandské cementy mají hydratační teplo cca 270 – 400 J/g) a dosahuje vysokých počátečních pevností (20 – 60 MPa/24 hod.). Druh a složení hydrátů portlandského cementu je výrazně závislý na teplotě hydratace (viz Tab. 6.4).

Tab. 6.4 *Vliv teploty hydratace hlinitanového cementu na formování hydratačních produktů.*

Teplota hydratace (°C)	Produkt hydratace
22	$\text{CA} + 10\text{H} \rightarrow \text{CAH}_{10}$
22 - 30	$2\text{CA} + 11\text{H} \rightarrow \text{C}_2\text{AH}_6 + 2\text{AH}_3$
30	$3\text{CA} + 12\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{AH}_6 + 2\text{AH}_3$
> 30	$3\text{CA} + 10\text{H} \rightarrow \text{C}_3\text{AH}_6 + 2\text{AH}_3 + 18\text{H}$

Při nedostatečném ošetřování betonu (vlhčení a to ihned po zatuhnutí), vzniká nebezpečí tvorby málo pevného C_3AH_6 . Na to má vliv i rychle hydratující C_5A_3 s nestabilní strukturou, která se může projevit snižováním pevnosti betonu během času. To se potvrdilo i několika haváriemi betonových konstrukcí. **Z tohoto důvodu se u nás od roku 1985 nesmí hlinitanový cement používat k výrobě betonu nosných konstrukcí.**

Teplotní odolnost betonu není určena pouze hydratovaným cementovým pojivem, ale také kamenivem, která musí odolávat stejnému tepelnému namáhání. Pro výrobu žárovetonů s objemovou hmotností vyšší než 1500 kg/m^3 , které jsou navrhovány pro teploty do 700°C, postačí přírodní kamenivo. Přírodní kamenivo nesmí při vyšší teplotě měnit své mechanické vlastnosti a nesmí se vlivem vysoké teploty smršťovat. Nejvhodnějšími přírodními kamenivy

pro hutné žárobetony jsou **čedič**, **diabas**, **andezit**. Naprosto nevhodnými kamenivy jsou **křemenná kameniva** a **žula**. Pro hutné žárobetony vystavené teplotám v rozsahu 800°C až 1000°C již nelze použít přírodní kamenivo. Pro tyto teploty lze použít buď drcený **keramický střep**, nebo **drcenou pomalu chlazenou vysokopecní strusku**.

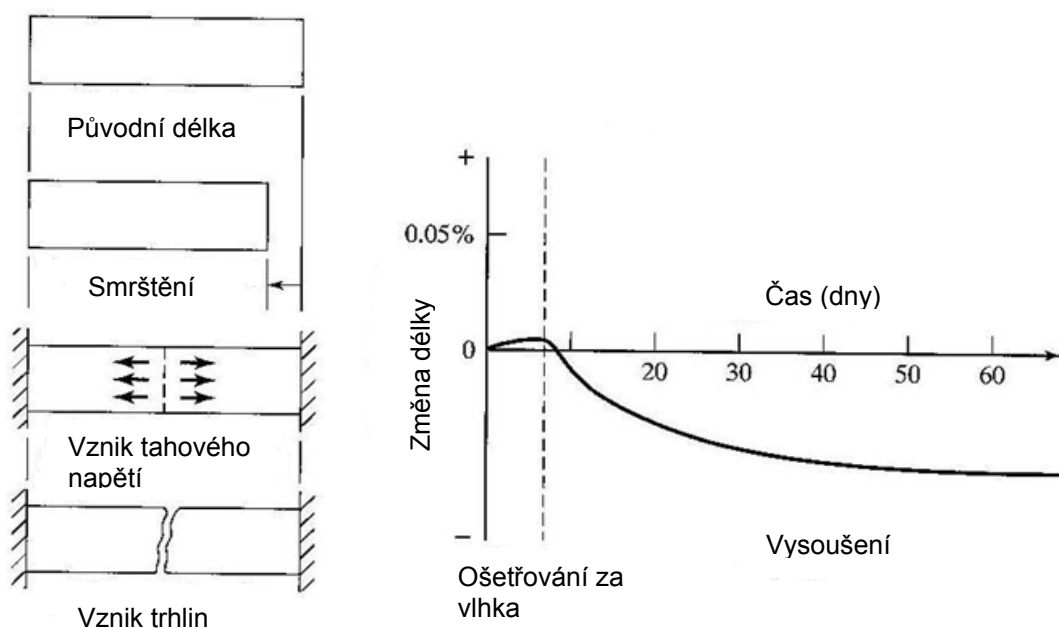
Pro teploty nad 1000°C lze použít jako kamenivo drcený šamot, korund, karborundum, drcený bauxit a chromit.

Jednu z hlavních nevýhod betonů na bázi portlandského cementu představuje jeho **objemová kontrakce** (smrštění), ke které dochází při jeho vysychání během hydratace. Pokud je tomuto **smrštění** bráněno, například konstrukčně, vzniká v betonu tahové napětí, které může být doprovázeno vznikem trhlin. Náhodné trhliny v betonové konstrukci jsou sice neestetické, závažnějším problémem je, že ve svém důsledku mohou narušit integritu celé konstrukce. Z tohoto důvodu je nezbytné již v návrhu konstrukcí tak při jejich provádění zohlednit vliv případného smrštění. Vznik trhlin je kritický zejména pro konstrukce zadržující kapalnou vodu (přehrady, nádrže) a pro konstrukce, ke kterým voda nesmí proniknout. Jako logické řešení problému smrštění se jeví možnost vnesení počátečního objemového rozpínání v betonu v rámci počátečního stádia hydratace a tvrdnutí. Ačkoli běžný portlandský cement vykazuje velmi malou počáteční rozpínavost během mokrého procesu jeho ošetřování, jeho rozpínavost může být cíleně modifikována **expanzivními cementy**. Na Obr. 6.3 a 6.4 je zobrazen princip smrštění a kompenzace tohoto smrštění pomocí počáteční objemové expanze.

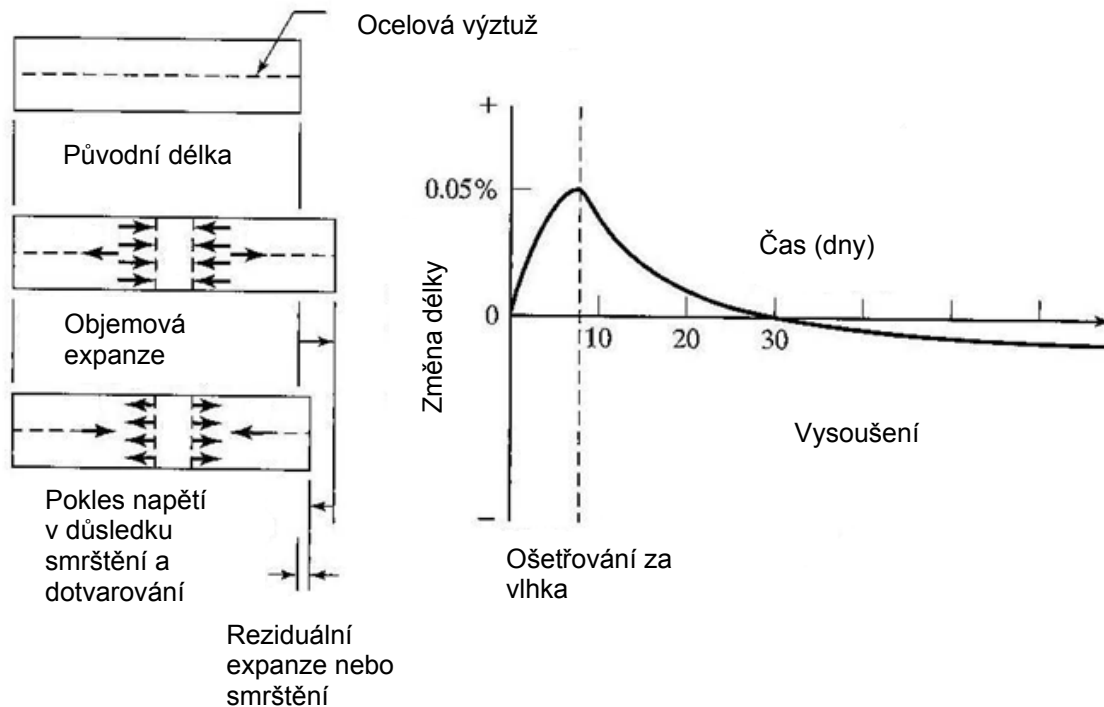
Všechny expanzivní cementy jsou založeny na formaci podstatného množství ettringitu v počátečním stádiu hydratace (během prvního týdne). V podstatě se vyrábějí tři základní varianty těchto cementů, označované K, M, a S, lišící se původem hlinitanové sloučeniny, ze které je následně při hydrataci tvořen ettringit. Reakci je možné popsat následující rovnicí

$$\text{pecifická forma vápenatého hlinitanu} + S + H \rightarrow \text{ettringit}.$$

Specifickou formou vápenatého hlinitanu nahradíme tedy C_3A ve slínku, přičemž zbývající slínkové minerály nadále kontrolují vlastnosti betonu, zejména v dlouhodobém měřítku. Jako příklad můžeme uvést typ E-1(K), který se vyrábí pouze v USA a skládá se z C_4A_3S a anhydritu CS. Typ M využívá CA se sádrovcem a typ S obsahuje větší množství C_3A (typicky 20 hm. %).



Obr. 6.3 Průběh smrštění při vysušování betonu.



Obr. 6.4 Průběh smrštění při vysušování betonu při aplikaci expanzivních cementů.

6.4 Vznik porézní struktury betonu

Z pohledu materiálového inženýrství můžeme beton definovat jako heterogenní soustavu kameniva propojenou cementovým gelem s rozptýlenými póry. Beton nelze považovat za hmotu, jejíž vlastnosti jsou neměnné, neboť v něm probíhají časově závislé změny, ke kterým dochází v pojivu (ztvrdlé cementové maltě) a v zóně mezi touto hmotou a kamenivem, vlivem krystalizace hydratačních sloučenin, odpařování vody z pórů i vlivem vnějšího působení na beton. Vznik betonu je vázán na přeměnu pojivé složky - cementu, který po smíchání s vodou chemicky reaguje a mění svou počáteční konzistenci vysokoviskózní vodné suspenze – cementové pasty, na pevnou formu hmoty - **cementový gel**. V průběhu materiálového výzkumu byla odvozena celá řada teorií tvrdnutí cementu, z nichž většina z nich vychází z následujících dvou teorií.

První základní teorií je **krystalová teorie Le Chateliera** (1882). Dle této teorie probíhá proces tvrdnutí cementu ve dvou fázích, první fázi představuje postupné rozpuštění cementu ve vodě (hydrolýza + hydratace), kde výsledkem je přesycený roztok. Druhou fází je krystalizace z roztoku a vylučování jehličkovitých, vzájemně propojených krystalů.

Druhou základní teorii představuje **koloidní teorie** navržená Michaelisem (1892). Tato teorie opět předpokládá dvoufázový proces tvrdnutí cementu. Nejdříve dochází k částečnému rozpuštění cementu ve vodě a tvorbě koloidní hmoty z CS-, CA-, a CF-hydrátů, přičemž vznikají tzv. **C-S-H gely**. Ve druhé fázi poté dochází ke smrštění hydrogelu vlivem „vnitřního odsávání“ vody ještě nehydratovanými cementovými zrny. V průběhu materiálového výzkumu byla odvozena celá řada dalších teorií tvorby pevné cementové matrice, například gelově-krystalová teorie Bajkova (1923), teorie tvorby mikrostruktury Rebinděra Apolla (1960), teorie struktury gelu Powerse (1961) a mnoho dalších. Obecně je možné se přiklonit k názoru, že tvrdnutí a tvorba pevné cementové matrice probíhá na principu **gelově-krystalové teorie**.

6.5 Hydratace Portlandského cementu

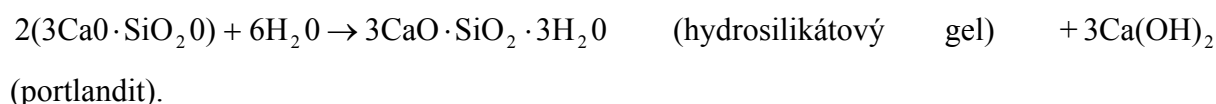
Z časového hlediska se dá hydratace cementu rozdělit do tří základních period:

1. perioda – nazývaná někdy také jako indukční,
2. perioda – charakteristická přechodem hydratačních produktů do tuhého skupenství,
3. perioda – vytváří se stabilní struktura hydratované cementové pasty.

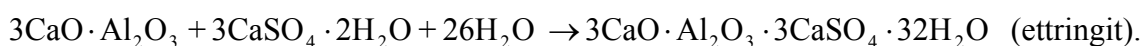
Jednotlivé periody jsou charakteristické dobou trváním, chemickými reakcemi složek slínku s vodou, rychlostí a mírou uvolňování hydratačního tepla a tvorbou pevnosti cementového tmele, či v pozdějším stádiu hydratace cementového kamene. V následujícím textu se s jednotlivými etapami tuhnutí a tvrdnutí cementu blíže seznámíme a popíšeme si základní hydratační mechanismy jednotlivých slínkových minerálů.

6.5.1 Indukční perioda hydratace cementu

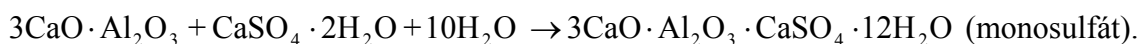
Tuto periodu můžeme rozdělit na dvě další období, tzv. předindukční, které je velmi krátké a probíhá po dobu 10 – 15 minut od prvního kontaktu zrn cementu se záměsovou vodou. Nejprve dochází ke smáčení zrn cementu a následně k první reakci se slínkovými minerály. Téměř okamžitě reaguje podstatná část C_3S za vzniku hydrosilikátového gelu a portlanditu dle rovnice



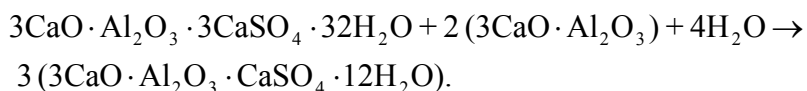
Zároveň také probíhá reakce C_3A za přítomnosti sádrovce, který se přidává k portlandskému slínku jako **zpomalovač tuhnutí**. Ten v důsledku hydrolýzy přechází do roztoku, který je následkem hydratačních reakcí přesycen $Ca(OH)_2$. Při větším množství síranů dochází ke vzniku **ettringitu** (označovaného také jako trisulfát) podle následující rovnice



Při menším množství $CaSO_4$ dojde ke vzniku **monosulfátu**. Tuto reakci můžeme popsat rovnicí

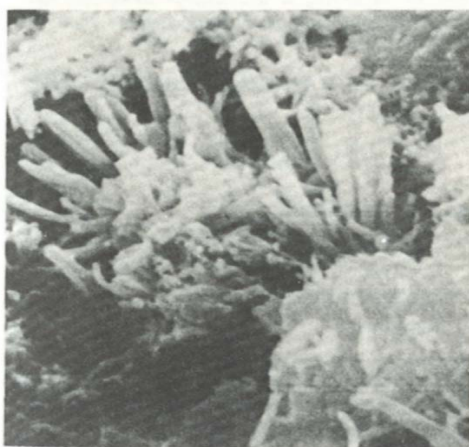


Ettringit může následně přecházet na monosulfát reakcí s dalšími podíly C_3A a vodou



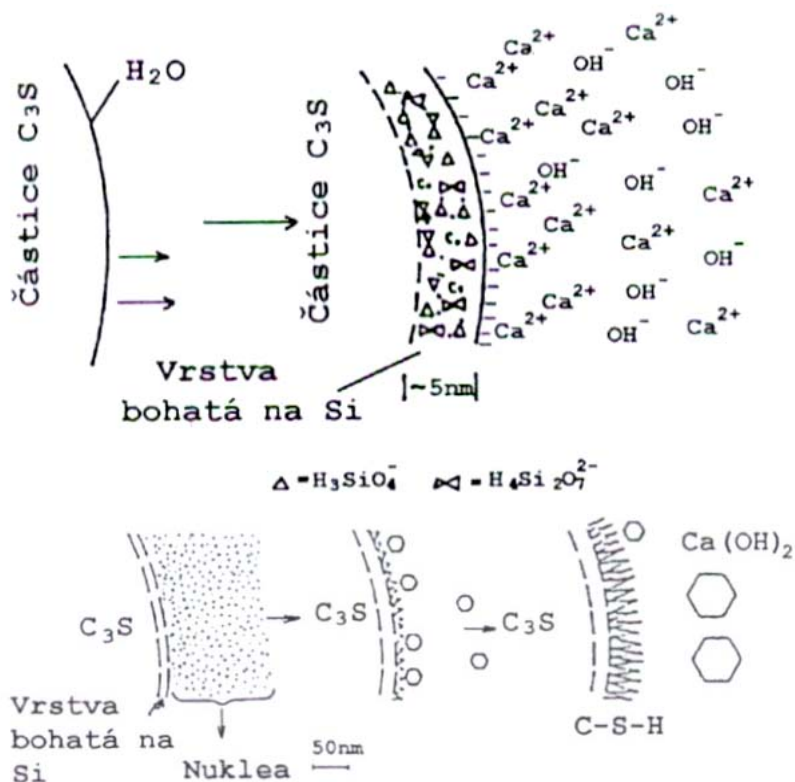
Druhá indukční perioda je ukončena přibližně 1 až 2 hodiny po smíchání cementu s vodou. V rámci této periody dochází k nárůstu viskozity suspenze, nastává úbytek silikátů a tvoří se zárodky krystalů C-S-H a CH. Pokračuje také tvorba hexagonálně krystalického ettringitu, který postupně přechází na monosulfát tvořící destičky. Po ukončení této indukční periody

dosahuje pevnost v tlaku cementového tmele hodnoty nižší než 100 KPa. Na Obr. 6.5 jsou zobrazeny jehličkovité krystaly ettringitu v hydratovaném portlandském cementu.



Obr. 6.5 *Krystaly ettringitu v hydratovaném portlandském cementu, převzato z Henning O., Lach V. 1983, Chemie ve stavebnictví, SNTL.*

Představa o mechanismu hydratace C_3S jako hlavní složky portlandského slínku je názorně popsána na následujících obrázcích.

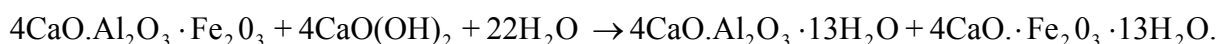


Obr. 6.6 *Počáteční stádia hydratace C_3S , převzato z Jirásek, J., Vavro, M. 2008, Nerostné suroviny a jejich využití, Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.*

V horní části obrázku je popsán vznik elektrické dvojvrstvy, dané nepohyblivou silikátovou vrstvou a pohyblivými ionty Ca^{2+} . Dále je zde patrné uvolňování Ca^{2+} a OH^- . Ve spodní části obrázku je znázorněn průběh nukleace a krystalizace hydratačního produktu na konci indukční periody.

6.5.2 Druhá perioda hydratace cementu

Tato perioda hydratace cementu je charakteristická přechodem cementové pasty do tuhého skupenství v důsledku rozvoje základní hydratační reakce C_3S za vzniku dlouhovláknitého kalciumhydrosilikátu a zvětšených krystalků portlanditu. Tyto produkty hydratace způsobují přibližování zrn cementu v důsledku prorůstání jednotlivých krystalů a vytvářejí základ mikrostruktury cementového kamene, přičemž narůstá pevnost hydratované cementové pasty v závislosti na jemnosti mletí, chemismu slínku a dalších faktorech, na hodnoty 1 – 20 MPa. Při těchto krystalizačních reakcích dochází zároveň k nárůstu měrného povrchu systému až 100x. V rámci této periody probíhá také hydratace C_4AF dle rovnice



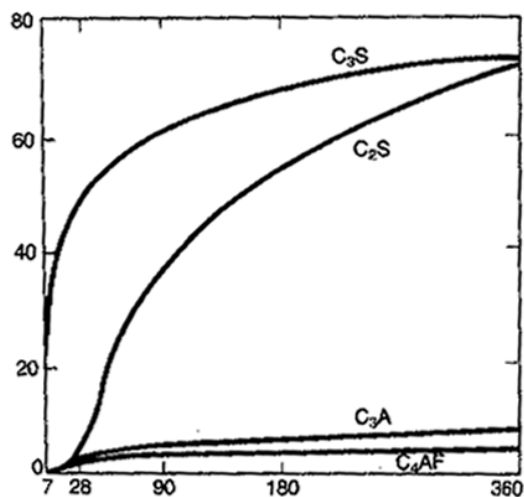
6.5.3 Třetí perioda hydratace cementu

Třetí perioda je charakteristická vytvořením stabilní struktury cementového kamene. Dochází k rekrystalizaci hydratačních produktů vlivem difúze vody, ettringit postupně přechází na monosulfát a tvoří se drobnovláknité fáze C-S-H. Dochází také k hydrataci nehydratovaných cementových zrn a hydrataci C_2S , kterou popíšeme rovnicí



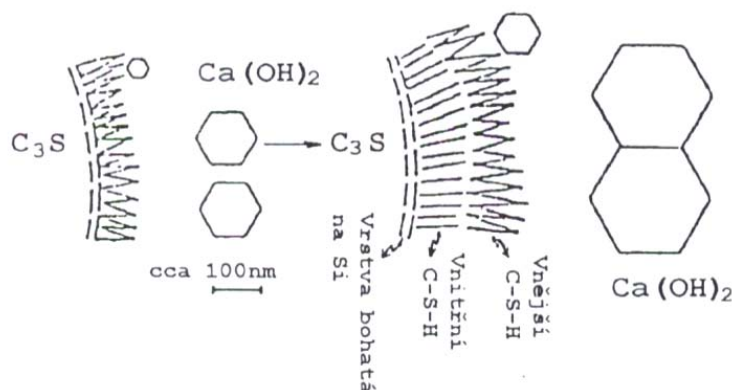
Z časového průběhu hydratace cementu můžeme tuto periodou rozdělit na **období klesající rychlosti hydratace** (cca 28 dnů) a na **období dozrávání**, které může trvat několik let v závislosti na vnějších podmínkách, kterým bude materiál vystaven. Důležitým faktorem pro dozrávání betonu je možnost přístupu vody do struktury cementového kamene a teplota.

Rychlost průběhu hydratace portlandského cementu je patrná z Obr. 6.7, kde je uveden vývin pevnosti hydratačních produktů hlavních slínkových minerálů. Z tohoto obrázku je patrný také podíl jednotlivých slínkových minerálů k celkové pevnosti cementové pasty a betonu.



Obr. 6.7 Vývoj pevnosti cementové pasty na bázi Portlandského cementu.

Pokročilé stádium hydratace C_3S je zobrazené na Obr. 6.8, kde nejprve vidíme růst hydratačních produktů v průběhu druhé periody hydratace a zhuštění částic C-S-H gelu v časově neomezené poslední fázi hydratace.



Obr. 6.8 Pokročilá stadia hydratace C_3S , převzato z Jirásek, J., Vavro, M. 2008, *Nerostné suroviny a jejich využití*, Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

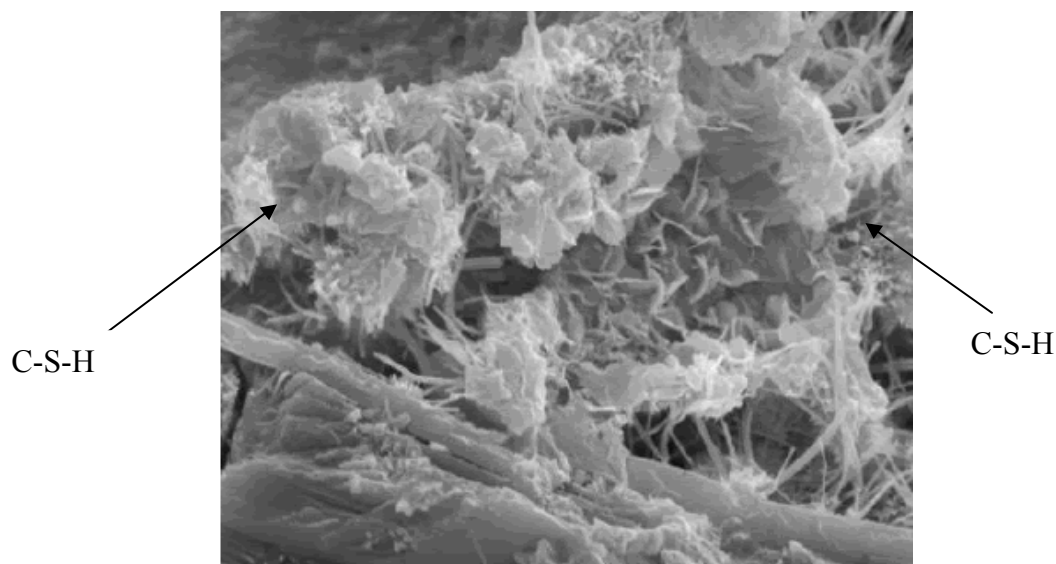
Jak jsme popsali v přecházejících kapitolách, při hydrataci C_3S a C_2S vznikají hydrosilikáty, obecně označované jako C-S-H gely. V odborné literatuře zabývající se problematikou hydratace cementu můžeme najít celou řadu specifických struktur hydrosilikátových gelů, například: $5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot 5H_2O$ (tobermorit), $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ (afwillit), $2CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ (hillebrandit), apod. Struktura vzniklého C-S-H gelu je závislá na chemickém složení slínku, množství záměsové vody a na teplotě hydratace, s čímž souvisí také její rychlost a časová míra vývinu hydratačního tepla.

6.6 Struktura betonu

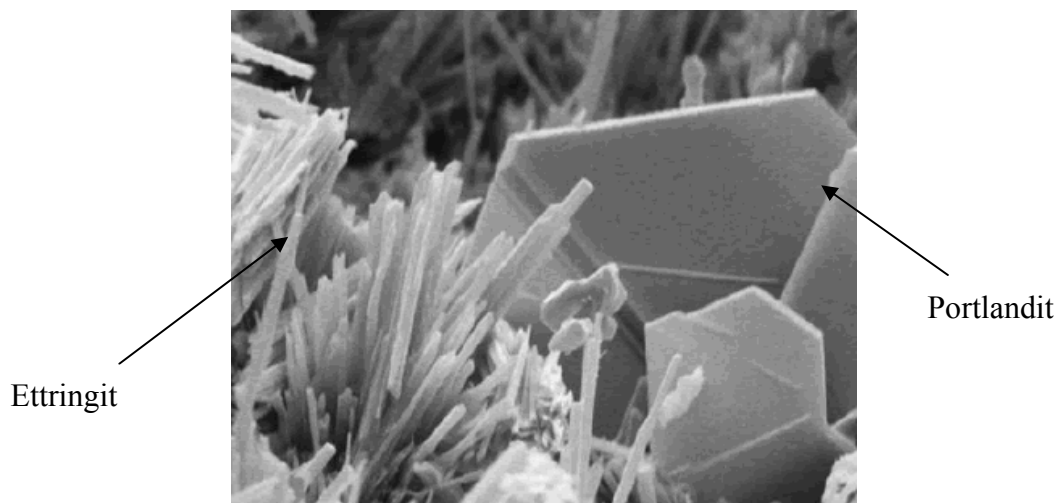
Při hodnocení a studiu struktury betonu můžeme v závislosti na úrovni pozorování hovořit o **makrostruktuře betonu**, která je hodnocena podle příčného či podélného řezu betonové prvku pouhým okem. Ukazuje beton jako dvousložkový materiál, který obsahuje kamenivo různých velikostí a tvarů a pojivo, jako nesouvislou vrstvu zhydratovaného cementu propojující kamenné plnivo. Popsat mikrostrukturu betonu a identifikovat její jednotlivé složky umožňuje pozorování například optickým, či ještě lépe elektronovým mikroskopem. Díky tomu získáváme informace o rozdílné struktuře pojiva v různých místech betonu (zejména v oblasti přechodové zóny na styku kameniva a cementového tmelu), u zdánlivě homogenního pojiva definujeme porézní strukturu o různé velikosti a tvaru pórů. Právě elektronová mikroskopie umožnila identifikovat čtyři základní pevné složky zhydratované cementové pasty:

- kalcium silikát hydráty (C-S-H),
- kalcium hydroxid (CH),
- kalcium sulfoalumináty (C-S-A-H),
- nezhydratovaná cementová zrna.

Na následujících obrázcích jsou prezentovány snímky z elektronového mikroskopu charakterizující C-S-H gely a portlandit.

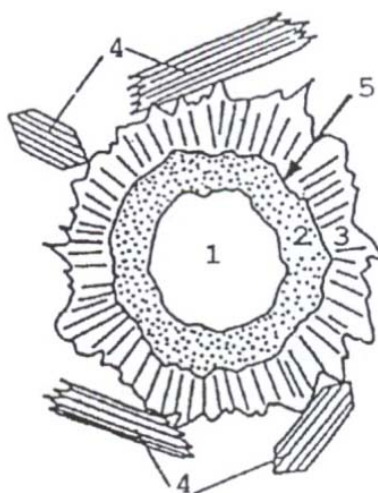


Obr. 6.9 Snímek z elektronového mikroskopu, C-S-H gel.



Obr. 6.10 Snímek z elektronového mikroskopu, ettringit.

Kalcium silikát hydráty zaujímají 50 – 60% objemu hydratovaného cementu a jsou určujícím faktorem vlastností cementového gelu. Tyto hydratační produkty hydratace C_3S a C_2S mají variabilní morfologický obraz a jsou charakteristické existencí krystalických vláken až po vláknité mřížkovité útvary. Tvorba vzniku C-S-H gelu začíná růstem vláknitých útvarů na cementových zrnech vlivem reakce s vodou. Postupem času se tloušťka hydratující složky zvyšuje a stává se pro další vodu nutnou k postupu reakce překážkou – snižuje se hydratační rychlost. Při aplikaci vhodných přísad (plastifikátory) případně s nárůstem měrného povrchu cementových zrn lze docílit vyšší míry prohydratování. Na Obr. 6.11 je zobrazen průběh hydratace cementového zrna, kde 1 – nezhydratovaný zbytek zrna, 2 – vnitřní C-S-H hydrát, 3 – vnější C-S-H hydrát, 4 – dendritické krystalky portlanditu, 5 – hranice zrna na počátku hydratace.



Obr. 6.11 Průběh hydratace cementového zrna, převzato z Jirásek, J., Vavro, M. 2008, *Nerostné suroviny a jejich využití*, Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

Další složkou hydratovaného cementového pojiva je **kalcium hydroxid** (portlandit). Zaujímá 20 – 25% objemu pevné fáze hydratované cementové pasty a vytváří rozměrné hexagonální krystaly. Je mu přisuzován nepříznivý vliv na chemickou odolnost betonu především v kyselém prostředí, neboť reaguje například se vzdušným CO_2 za vzniku CaCO_3 , což je doprovázeno nejen nárůstem objemu, ale i změnou pH. To může být kritické pro pasivaci ocelové výztuže.

Kalcium sulfoalumináty (C-S-A-H gely) zaujímají 15 – 25% objemu hydratovaného cementu. V počátečním stádiu tvrdnutí jsou zdrojem tvorby ettringitu, který posléze transformuje na monosulfát hydrát $\text{C}_4\text{ASH}_{18}$, který tvoří hexagonální krystaly. Přítomnost těchto produktů ve struktuře betonu má za následek sníženou odolnost betonu proti působení síranů.

Poslední složkou hydratovaného cementu, kterou si zde uvedeme, představují **nehidratovaná cementová zrna**. Jejich přítomnost a množství jsou závislé na vodním součiniteli, velikosti cementových zrn a kameniva, což ve svém důsledku určuje stupeň hydratace cementových zrn. Vliv na obsah nehydratovaných cementových zrn má také způsob výroby a zpracování a betonu a v neposlední řadě složení čerstvé betonové směsi.

6.7 Voda v hydratovaném cementovém pojivu

Voda představuje stálou složku mikrostruktury hydratované cementové pasty (cementového gelu). Dle formy v jaké je voda přítomna ve struktuře betonu a vlivů na fyzikální parametry betonu definujeme:

- kapilární vodu,
- gelovou vodu,
- chemicky vázanou vodu,
- vodní páru.

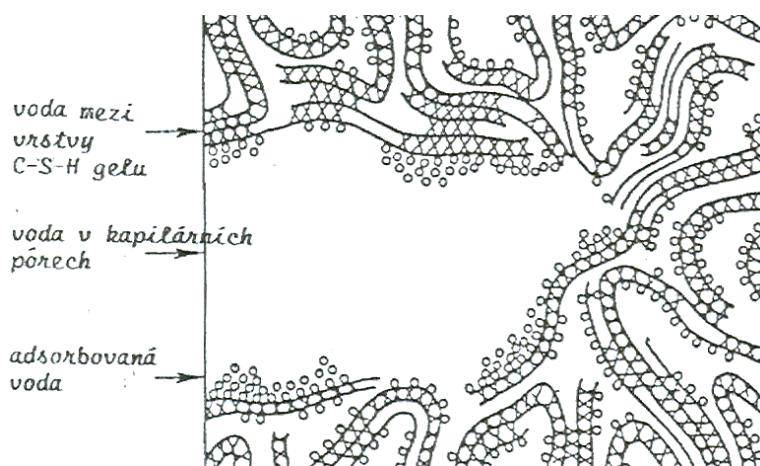
Kapilární voda zahrnuje **volnou vodu** v makropórech (průměr > 50 nm) a technologických dutinách. Její obsah je závislý především na podmínkách vnějšího prostředí, ve kterých je betonový prvek umístěn. Změna jejího množství (pokud hovoříme o vodě v kapalném skupenství) nemá podstatný vliv na mechanicko-fyzikální parametry betonu. Mezi kapilární vodu řadíme také vodu přítomnou v **malých kapilárách** (< 50 nm), která je pevně poutána

ke struktuře betonu kapilárními silami a jejíž ztráta se projevuje smrštěním. Poslední formou kapilární vody je **fyzikálně adsorbovaná voda** na povrchu struktury hydratačních útvarů. Až 5 molekulových vrstev vody může být vázáno na povrch porézní struktury cementové pasty (celková šířka této vrstvy může být 1.3 nm). Ztráta této vody se také projevuje smrštěním.

Uvnitř C-S-H struktury je monomolekulární vrstva vody pevně zakotvená vodíkovými můstky. Tuto vodu nazýváme pojmem **gelová** a je přítomna v gelových pórech užších než 2.6 nm. Při relativní vlhkosti nižší než 11% vede k razantní objemové změně ztvrdlé cementové pasty.

Chemicky vázaná voda je součástí sloučenin vzniklých hydratací cementu. Její odstranění není možné docílit standardním vysoušením, ale dochází k němu pouze za vysokých teplot (900 – 1000°C) a vede k samotné dekompozici cementové pasty.

V případě, že makropóry betonu nejsou plně zaplněny kapalnou vodou, je zbytek porézního prostoru vyplněn **vodní párou**, která je v rovnováze s relativní vlhkostí a teplotou prostředí obklopujícího betonový prvek. Schematické zobrazení přítomnosti vody ve struktuře cementové pasty je zobrazeno na Obr. 6.12.

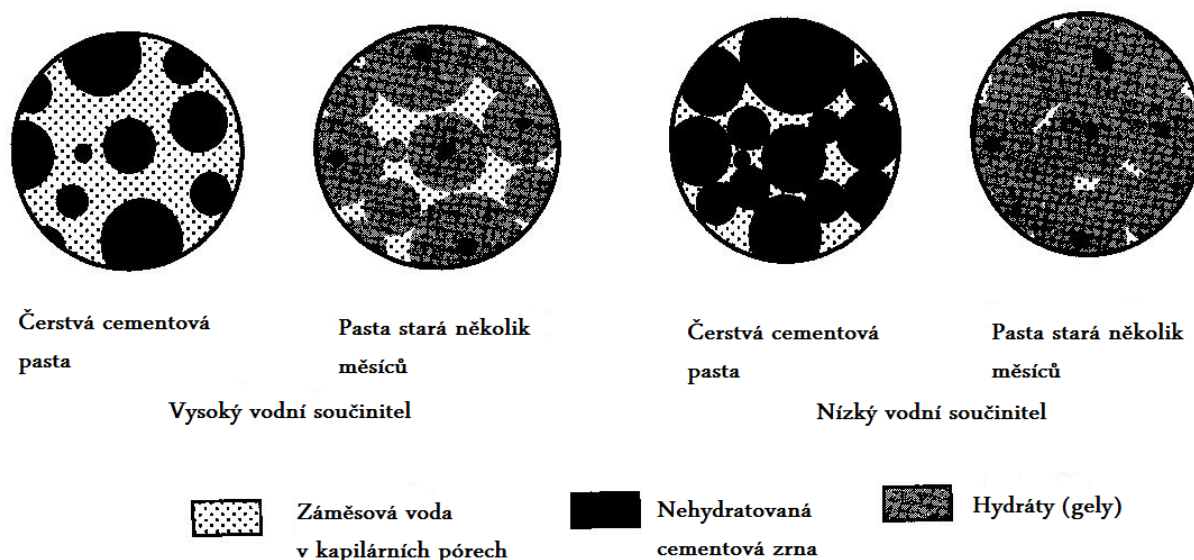


Obr. 6.12 Přítomnost vody v hydratované cementové pastě (Feldman a Sereda).

6.8 Póry v hydratovaném cementovém pojivu

Proces hydratace a tvrdnutí betonu je časově dlouhodobý proces, který je provázen změnou struktury hydratovaného cementového pojiva. Z tohoto důvodu jsou velikost, tvar a distribuce pórů také časově závislé parametry. Tento proces tvorby a změny porézní struktury popisuje

Obr. 6.13. Na levé straně obrázku máme cementovou pastu s vysokým vodním součinitelem, například 0.8. V tomto případě dojde po zamíchání s vodou ke značné disperzi zrn cementu ve vodě a během následného zrání zůstává část záměsové vody v kapilárních pórech. V případě nízkého vodního součinitele (např. 0.4) jsou při zamíchání zrna cementu v bližším kontaktu a následně se vytvoří vyšší objemový podíl hydratačních produktů.



Obr. 6.13 *Vývoj struktury cementové pasty.*

Póry ve struktuře betonu je třeba dělit a klasifikovat v souladu s jejich vznikem při výrobním procesu (přechod z heterogenní viskózní suspenze na pevnou formu hmoty). Z tohoto pohledu rozlišujeme póry **gelové**, **kapilární** a **technologické**. Technologické póry vznikají buď přirozenou cestou při míchání betonové směsi stržením okolního vzduchu, nebo záměrně vytváříme uzavřené kulové póry přidáním například **provzdušňovacích přísad**. Tyto kulové póry zajistí rovnoměrnou distribuci pórů a zvyšují odolnost betonu proti působení agresivního prostředí. Typickým příkladem může být nárůst odolnosti proti zmrazovacím cyklům, neboť kulové póry se nezaplní zcela vodou a tím vytvářejí rezervu pro nárůst objemu vody při fázové změně na led. Do pórů ve struktuře betonu je nutné zahrnout také póry kameniva, jejichž objem je u kameniva používaného u nás (křemenné kamenivo, čedičové) velmi malý, typicky v rozsahu 1 – 5%. Podíváme-li se však do oblastí středomoří, kde se jako kamenivo velmi často používá vápenec, musíme počítat s jeho velkou pórovitostí, která dosahuje až 24%. Během studia struktury betonu se představy o uspořádání porézní struktury C-S-H měnily v závislosti na kvalitě experimentálních metod a zařízení. Nemění se však definice gelových pórů, které jsou definovány jako součást struktury C-S-H gelu.

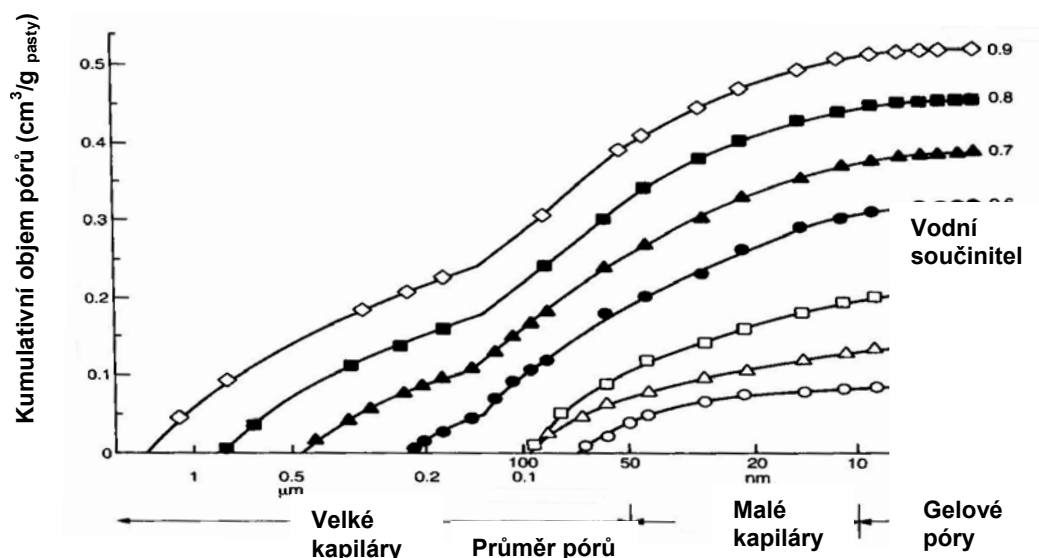
V Tab. 6.4 uvádíme klasifikaci pórů v hydratované cementové pastě dle jejich velikosti, základních vlastností a významu ve vztahu k vlastnostem betonu.

Tab. 6.4 *Klasifikace pórů v hydratované cementové pastě, převzato ze Svoboda L. a kol. 2004, Stavební hmoty, Jaga, Bratislava.*

Název	Velikost	Popis	Vztah k vlastnostem betonu
Technologické póry	1000 – 15 μm	velké, přibližně kulové póry	podstatně ovlivňují pevnost a propustnost
Kapilární póry	15 – 0,05 μm	širší kapiláry	ovlivňují pevnost, propustnost a smrštivost na počátku tuhnutí
	50 – 10 nm	střední kapiláry	ovlivňují pevnost, propustnost a smrštění při vyšší relativní vlhkosti
Gelové póry	10 – 2,5 nm	úzké kapiláry	vliv na průběh smrštění při relativní vlhkosti < 50%
	2,5 – 0,5 nm	póry mezi hydratovanými útvary gelu	ovlivňují smrštění a dotvarování
	< 0,5 nm	póry mezi vrstvami gelu	ovlivňují smrštění a dotvarování

Jak je patrné z Obr. 6.13, zásadní vliv na strukturu porézního prostoru hydratované cementové pasty má velikost vodního součinitele, případně vliv přidání **plastifikačních** a **superplastifikačních přísad**, které v podstatě snižují množství záměsové vody až na minimální hodnoty z pohledu zpracovatelnosti betonové směsi. Vliv na strukturu betonu mají bezpochyby také minerální příměsi jako elektrárenský popílek, vysokopeční struska a další přísady, které vedou k poklesu pórovitosti betonu a tím i k nárůstu pevnosti v širším časovém intervalu.

Obr. 6.14 popisuje distribuci pórů v cementové pastě v závislosti na změně vodního součinitele. Je zřejmé, že s nárůstem vodního součinitele dochází nejen k nárůstu pórů větších rozměrů, ale i k nárůstu celkové pórovitosti hydratovaného pojiva. Optimalizací hodnoty vodního součinitele tedy můžeme zásadně zvýšit užité vlastnosti betonu.

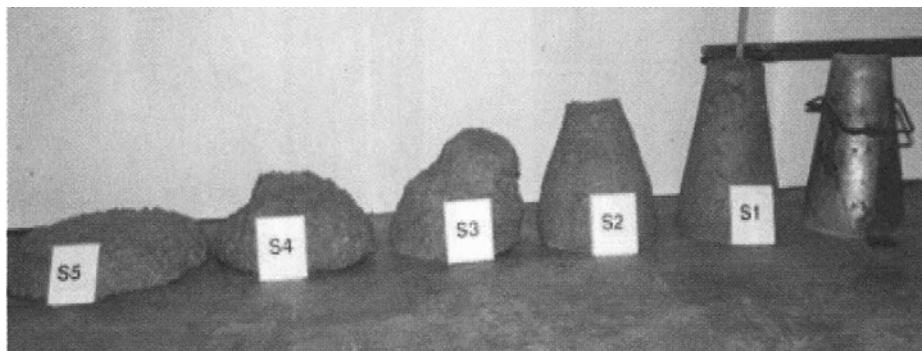


Obr. 6.14 Distribuce pórů v závislosti na změně vodního součinitele, převzato z Mehta, P. K. 1986, *Concrete: Structure, Properties and Materials*, Prentice-Hall, New Jersey.

6.9 Zpracovatelnost betonové směsi

Zpracovatelnost je vlastnost betonové směsi se pohybovat a být zhutňována. Je nezbytné ji sledovat pro dopravu, čerpání, ukládání a vhodné zalití ocelové výztuže (**pohyblivost**). **Zhutnitelnost** je nezbytná vlastnost pro vypuzení vzduchu zachyceného z okolního prostředí během míchání z čerstvého betonu pomocí vibrace – zajištění vysoké hutnosti betonu a soudružnosti s výztuží. V České republice se pro stanovení zpracovatelnosti nejčastěji používá měření **sednutí kužele** dle ČSN EN 12350-2 (Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím). Při aplikaci této metody se měří pokles výšky betonového vzorku, který je naplněn do formy tvaru kužele (**Abramsův kužel**) o výšce 300 mm.

pokles výšky betonového vzorku, který je naplněn do formy tvaru kužele (Abramsův kužel) o výšce 300 mm. Zpracovatelnost je pak klasifikována dle pěti tříd konzistence S1 – S5.



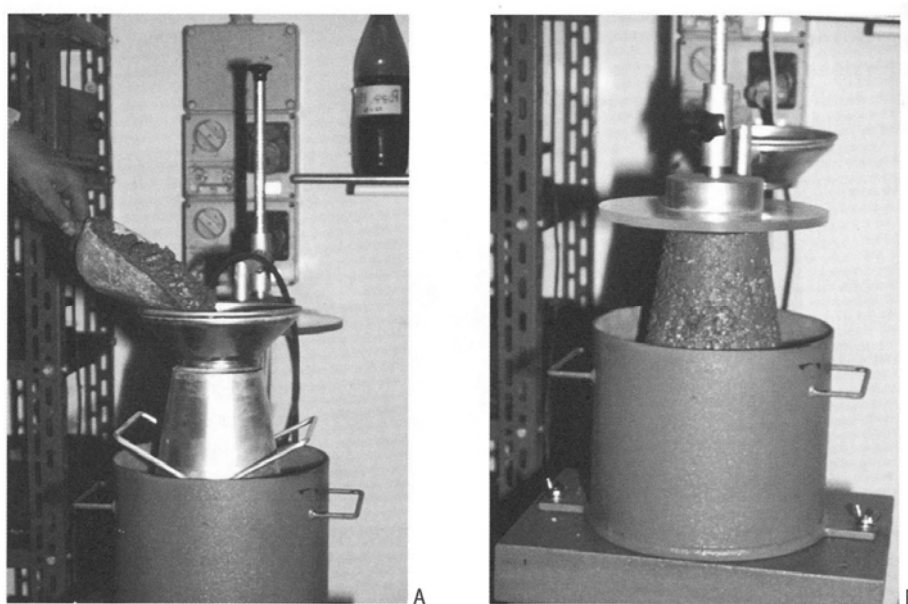
Obr. 6.15 Příklad zkoušky sednutí kužele.

Volba vhodné zpracovatelnosti je ovlivněna typem konstrukce (hustotou výztuže, tvarem a velikostí konstrukce) a hutnicí technikou. Kromě válcovaného betonu a posuvného bednění je pro většinu betonových konstrukcí vhodná zpracovatelnost S3 (měkká) – S5 (tekutá). Obecně platí, že čím více výztuže a složitější tvar konstrukce (bednění), tím vyšší třída zpracovatelnosti. Příklady sednutí a použití betonů o specifické třídě konzistence prezentuje Tab. 6.5.

Tab. 6.5 Příklady sednutí a použití betonů s různou konzistencí.

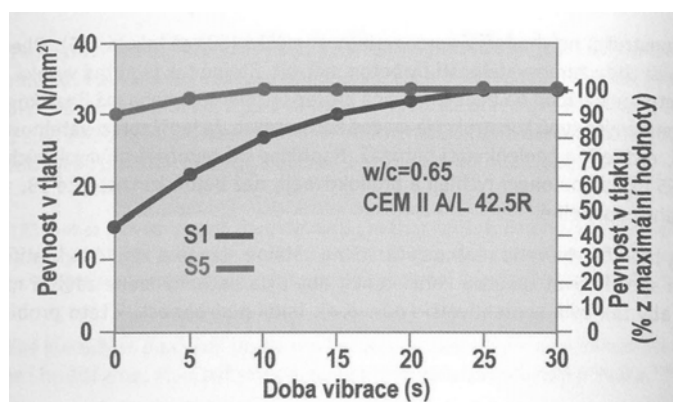
Stupeň konzistence	Sednutí (mm)	Aplikace
S1 (tuhá)	10 – 40	(vibro)válcovaný beton
S2 (plastická)	50 – 90	posuvné bednění pro konstrukce válcovitého průřezu
S3 (velmi měkká)	100 – 150	šikmé konstrukce
S4 (tekutá)	160 – 210	hustě armované konstrukce
S5 (tekutá)	> 210	hustě armované a tvarově složité konstrukce

Pro měření zpracovatelnosti je možné využít také zkoušku VeBe (ČSN EN 12350-3), která se aplikuje u zavlhlých směsí, u nichž se neprojeví sednutí kužele. V tomto případě měříme čas, za který bude průhledná kruhová deska plně v kontaktu s betonem (viz. Obr. 6.16).



Obr. 6.16 Zkouška VeBe – převzato z M. Collepardi 2009, *Moderní beton*, ČKAIT, Praha.

Se zpracovatelností betonové směsi úzce souvisí také spolehlivost konstrukcí. Dobře zpracovatelný beton vyžaduje méně účinné zhutňování (menší požadavky na kvalitu pracovní čety). Z následujícího obrázku je patrný vliv zpracovatelnosti na dosažení předpokládané charakteristické pevnosti v tlaku. Vidíme, že i v případě, kdy tekutou směs nevibrujeme, dostáváme velmi vysoké hodnoty pevnosti v porovnání s tuhrou směsí. V případě, že nebude vibrován beton o třídě S1, dojde ke vzniku nekompaktní a nehomogenní struktury, u které je nezbytné počítat se sníženou trvanlivostí a pevností. Takový beton může být lehce degradován korozí způsobenou například ve vodě rozpustnými solemi apod.

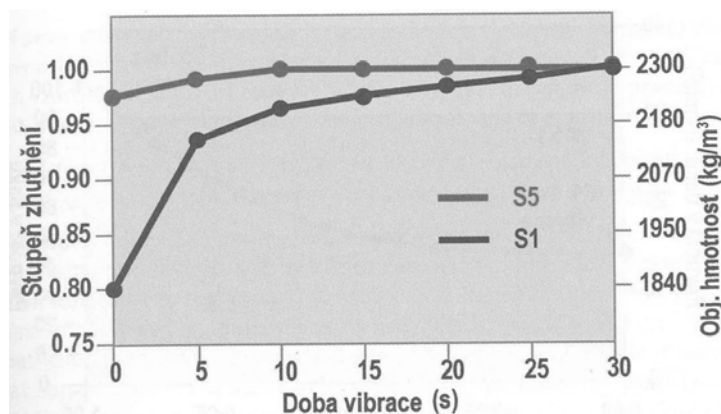


Obr. 6.17 Vliv doby vibrace a zpracovatelnosti na charakteristickou pevnost – převzato z M. Collepardi 2009, *Moderní beton*, ČKAIT, Praha.

Pro beton se také stanovuje **stupeň zhutnění**. Stanovuje se z jádrového vývrtu z konstrukce a ze vzorku dokonale zhutněného betonu, který byl zhotoven pro zkoušky 28denní pevnosti. Stupeň zhutnění se vypočte dle následující rovnice

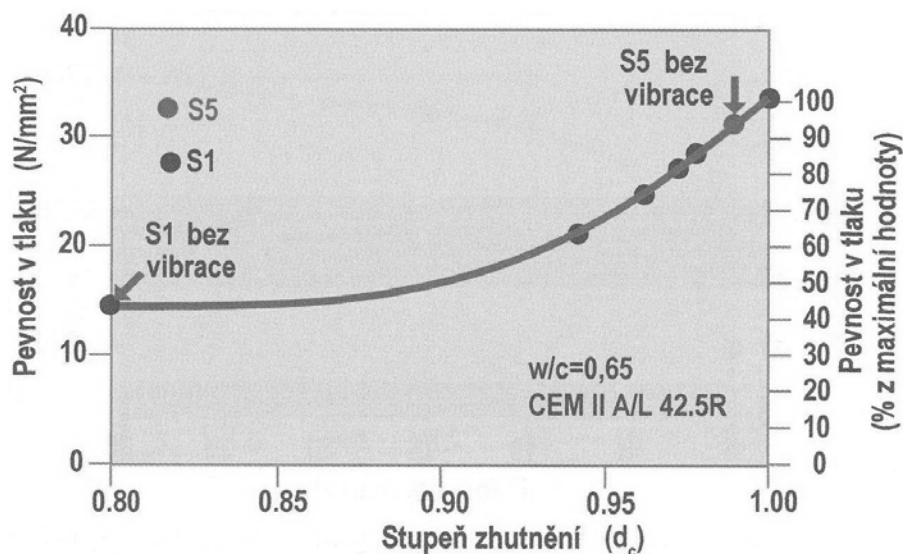
$$d_c = d/d_0,$$

kde d (kg/m³) je objemová hmotnost jádrového vývrtu a d_0 (kg/m³) objemová hmotnost dokonale zhutněného vzorku.



Obr. 6.18 Vliv doby vibrace na stupeň zhutnění a objemovou hmotnost betonu.

Stupeň zhutnění ve vztahu k celkové pevnosti betonu demonstruje Obr. 6.19. Vidíme zřejmý vliv konzistence a stupně zhutnění na vývoj charakteristické pevnosti v tlaku.



Obr. 6.19 Vliv stupně zhutnění na pevnost v tlaku – převzato z M. Collepardi 2009, *Moderní beton*, ČKAIT, Praha.

6.10 Vliv porézního prostoru na vlastnosti betonu

Porézní struktura betonu je charakterizována porozitou, měrným objemem pórů, specifickým povrchem pórů a jejich distribuční funkcí. Všechny tyto parametry zásadně ovlivňují vlastnosti betonu, jeho užitnou funkci a ve svém důsledku i jeho trvanlivost a životnost.

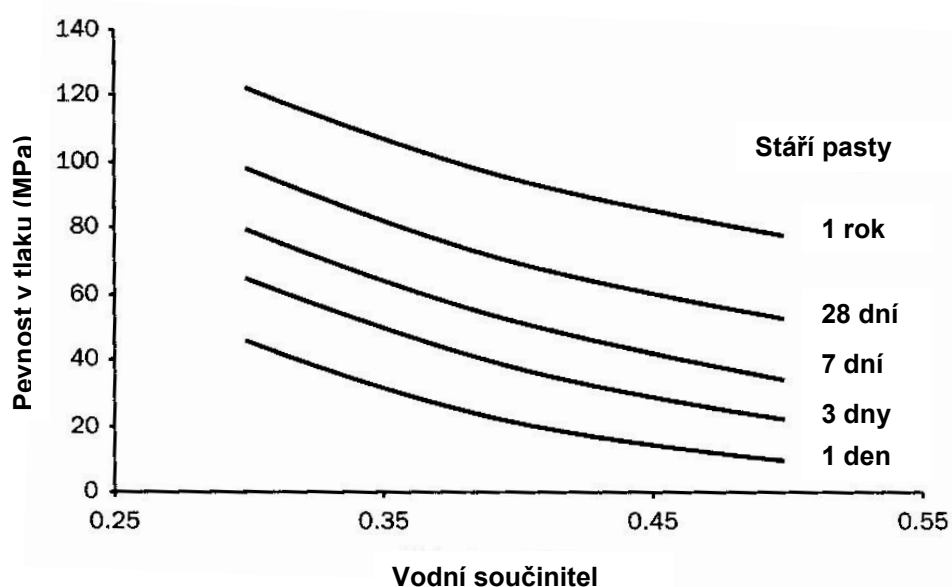
6.10.1 Vliv pórovitosti na pevnost betonu

Jak jsme již uvedli v přecházející kapitole, pórovitost betonu je funkcí hodnoty vodního součinitele a času stárnutí betonu. Je tedy evidentní, že tyto faktory ovlivňují také pevnost betonu. Na Obr. 6.20 je zobrazen vývoj pevnosti v tlaku pasty z portlandského cementu uložené ve vodě při teplotě 20°C. S nárůstem vodního součinitele výrazně klesá pevnost cementové pasty, která naopak narůstá s dobou stárnutí.

Pevnost betonu je tedy v přímé vazbě s jeho pórovitostí, přičemž s poklesem pórovitosti pevnost narůstá a při jejím nárůstu naopak pevnost klesá. Tento vztah vyjádřil ve své práci poprvé Powers v roce 1958, čímž zásadně změnil vývoj betonu s ohledem na výrobu betonů výrazně vyšších pevností. Powers popsal vztah pevnosti a pórovitosti rovnicí

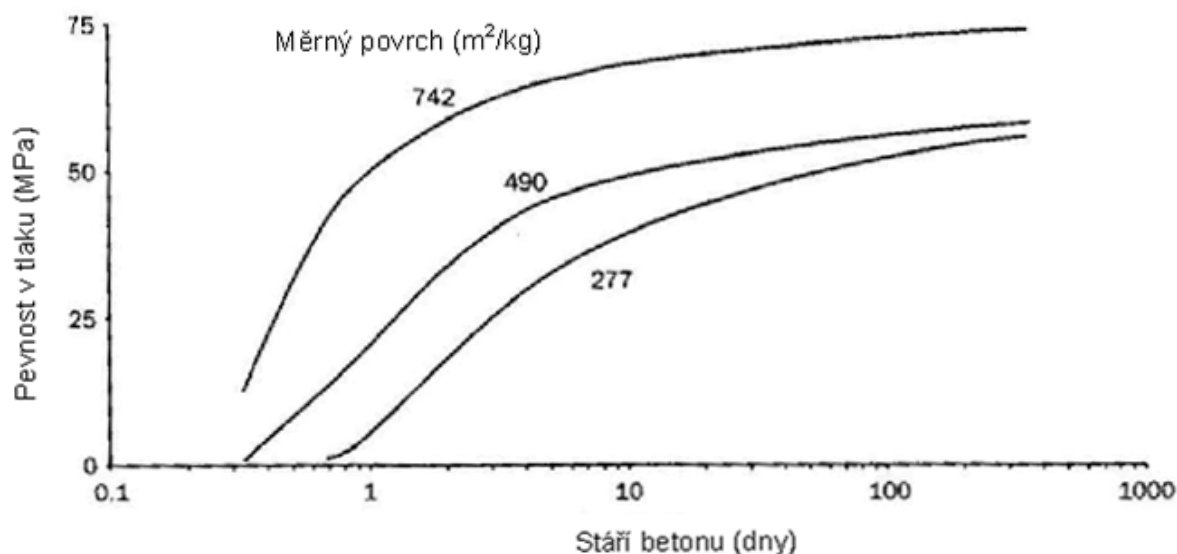
$$\sigma = k \cdot (1 - P^3),$$

kde σ (MPa) je pevnost v tlaku, k (-) konstanta pro specifický typ materiálu a P (-) pórovitost. Je nutné zdůraznit, že tento vztah byl odvozen pouze pro cementové pasty na základě experimentálních měření. U betonu bude komplikovat otázku vztahu porozity a pevnosti v tlaku přítomnost **mikrotrhlin**, které vznikají v průběhu zrání smršťováním především v zóně mezi ztuhlou cementovou pastou a kamenivem. Kromě celkového objemu pórů má zásadní vliv na pevnost betonu také rozměr pórů. Zredukujeme-li obsah velkých pórů ($> 15 \mu\text{m}$) přidáním například polymerního materiálu do cementové pasty a zároveň za dostatečně nízkého vodního součinitele a ošetřování za vysokého tlaku, můžeme získat tlakové pevnosti cementové pasty vyšší než 200 MPa.



Obr. 6.20 Vliv vodního součinitele a doby vytvrzování na pevnost cementové pasty.

Formování porézní struktury cementového kamene je výrazně ovlivněno také **vlastnostmi cementu**. Pomineme-li vliv chemického složení portlandského slínku, je rozhodujícím faktorem tvorby kvalitní mikrostruktury hydratovaného cementového pojiva **jemnost mletí cementu**, respektive jeho **měrný povrch**. Zvýšením měrného povrchu pojiva můžeme výrazně snížit pórovitost betonu a tím zvýšit jeho pevnost. Vliv měrného povrchu na časový vývoj pevnosti betonu je zobrazen na Obr. 6.21.



Obr. 6.21 Vliv měrného povrchu cementu na časový vývoj pevnosti betonu z portlandského cementu (vodní součinitel 0,4), převzato z Illston, J. M., Domone, P. L. J. 2007, *Construction materials*, Spon Press, Taylor & Francis Group, New York.

6.10.2 Vliv pórovitosti na tepelnou vodivost betonu

Tepelná vodivost betonu je závislá na pórovitosti a s tím spojeném obsahu vody v pórech, přičemž stupeň nasycení ovlivňuje hodnotu součinitele tepelné vodivosti více než porozita. Následující tabulka zřetelně popisuje závislost součinitele tepelné vodivosti cementové pasty na vodním součiniteli a tím spojené pórovitosti.

Tab. 6.6 Vliv vodního součinitele na tepelnou vodivost cementové pasty, převzato ze Svoboda L. a kol. 2004, *Stavební hmoty*, Jaga, Bratislava.

Vodní součinitel	Součinitel tepelné vodivosti (W/m K)
$v/c = 0.4$	1.3
$v/c = 0.5$	1.2
$v/c = 0.6$	1.0

Kromě pórovitosti má zásadní vliv na tepelnou vodivost betonu také nárůst teploty, zejména v rozsahu vyšších teplot, kde dochází k chemickým reakcím, které jsou doprovázeny změnou struktury betonu.

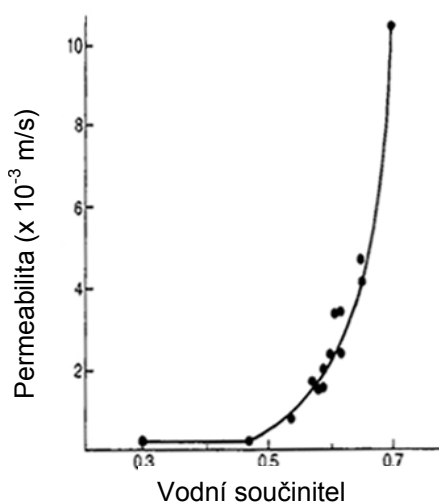
6.10.3 Vliv pórovitosti na propustnost betonu

V současné době se kromě mechanicko-fyzikálních parametrů betonu klade důraz také na jeho další vlastnosti, zejména odolnost proti působení agresivního prostředí, kterému jsou betonové konstrukce během své životnosti vystaveny. Jedním ze základních parametrů majících přímou vazbu k trvanlivosti betonu je jeho permeabilita K (m/s). Určuje průchodnost kapalin betonem, čímž definuje odolnost betonu proti cyklickému zmrazování, vysušování a vlhčení, stejně jako odolnost proti působení ve vodě rozpustných solí. Je definována Darcyho zákonem

$$\frac{dq}{dt} = K \cdot \frac{\Delta H}{L \cdot \mu},$$

kde dq/dt je rychlost toku kapaliny, μ viskozita kapaliny, ΔH gradient tlaku, L tloušťka tělesa.

Vztah mezi pórovitostí a permeabilitou popisuje Obr. 6.22.

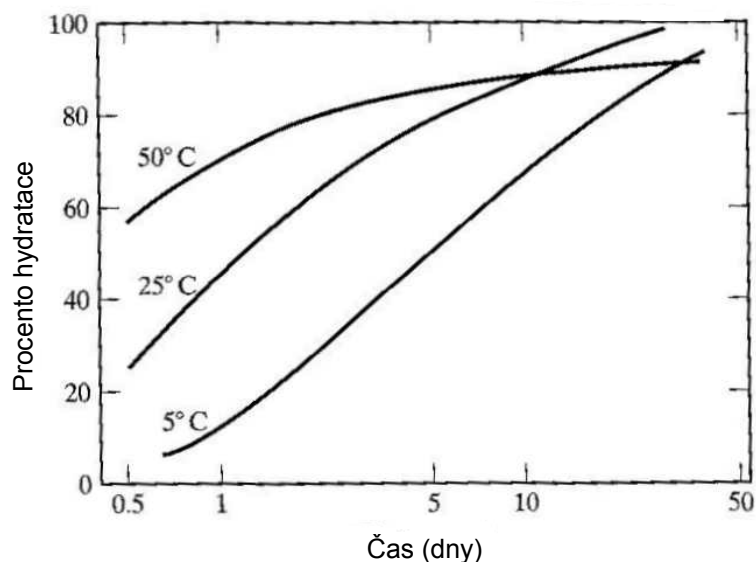


Obr. 6.22 Závislost permeability cementové pasty na vodním součiniteli.

6.10.4 Vliv teploty hydratace na porézní strukturu betonu

Kromě chemického složení slínku, vodního součinitele a jemnosti mletí, má výrazný vliv na tvorbu pevné struktury cementového kamene teplota, při které dochází k hydrataci. Obecně platí, že zvýšená teplota hydrataci urychluje a její pokles vede ke snížení reakční rychlosti hydratace – zastavení hydratace. Za hraniční teplotu je považována teplota -10°C .

Nastartování hydratace při nižší teplotě vede k tvorbě struktury s převažujícím podílem dobře vyvinutých krystalů **tobermoritu** ($\text{Ca}_5[\text{Si}_3\text{O}_8(\text{OH})]_2 \cdot 2\text{-5H}_2\text{O}$), což vede ke zvýšení celkové pevnosti hydratovaného cementového pojiva a tím i betonu. Rychlá počáteční hydratace při zvýšené teplotě vytváří tlustší zónu kolem zrn slínku, která je málo propustná pro vnější vodu a hydratace se zbrzdí (viz Obr. 6.23). Teplota hydratace má zásadní vliv na průběh a velikost smršťování (tahová napětí, doprovázená zužováním kapilár – rychlost odpařování vody).



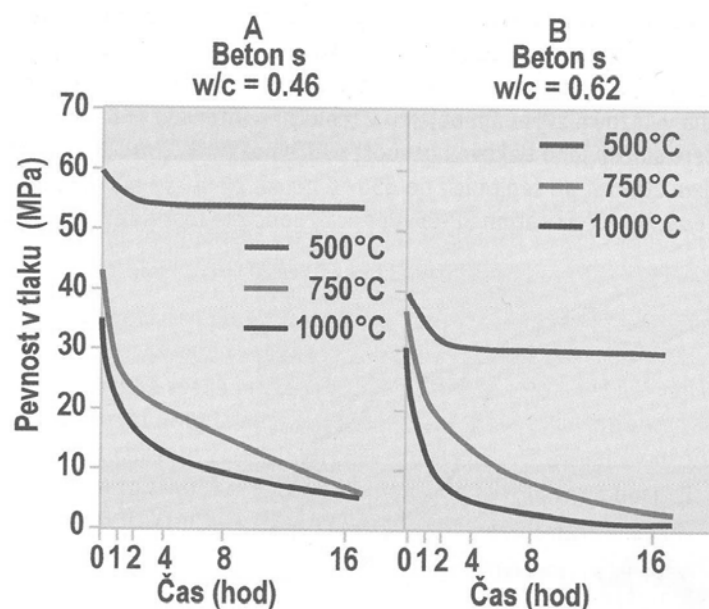
Obr. 6.23 Teplota hydratace a její vliv na průběh hydratačního procesu.

6.10.5 Vliv působení vysokých teplot na porézní strukturu cementového pojiva

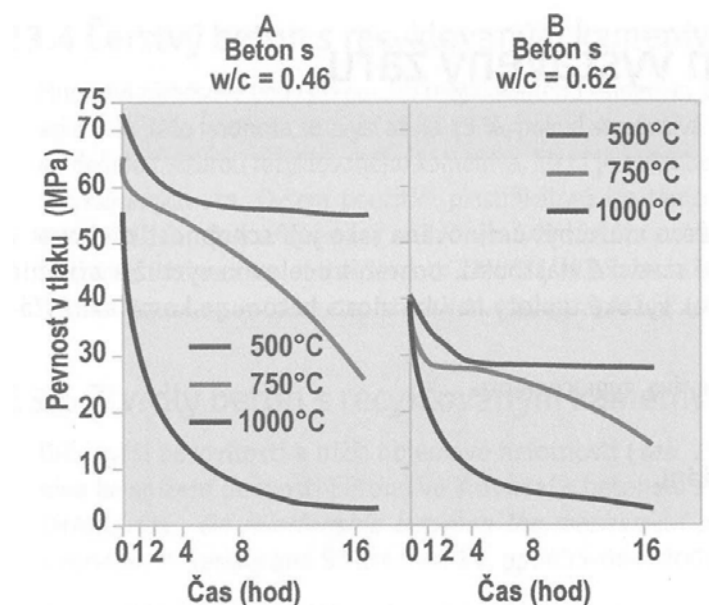
Působení vysokých teplot má negativní vliv na vlastnosti cementového kamene na bázi portlandského cementu a může vést ve svém důsledku k úplnému rozložení hydratovaného cementového pojiva. Této problematice je nezbytné věnovat zvýšenou pozornost, zejména s ohledem na požární odolnost a bezpečnost staveb. Při vysokoteplotním zatěžování betonu můžeme rozlišit několik základních teplotních intervalů, který jsou charakteristické specifickou změnou vlastností a chování betonu. Při teplotě 150°C dochází ke ztrátě gelové vody a krystalické vody sulfoaluminátu. Přibližně od 500°C se začíná rozkládat portlandit (narušení mikrostruktury cementového pojiva). V případě, že jsme použili v betonu křemenné kamenivo, dojde při teplotě 573°C k přeměně jeho nízkoteplotní formy (β - křemen) na jeho vysokoteplotní formu (α - křemen). To je doprovázeno nárůstem objemu a změnou krystalové struktury, čímž dojde ke vzniku napětí ve struktuře betonu. Při teplotách vyšších než 800°C dochází k úplnému rozložení cementového pojiva.

6.10.5.1 Chování betonu při požáru

Trvanlivost betonové konstrukce při vystavení žáru může být definována jako její schopnost zachovat si v případě požáru původní funkci – udržet statické vlastnosti a ochránit ocelovou výztuž. V následujících obrázcích je vidět pokles mechanické pevnosti betonu v závislosti na teplotě a době vystavení této teplotě.



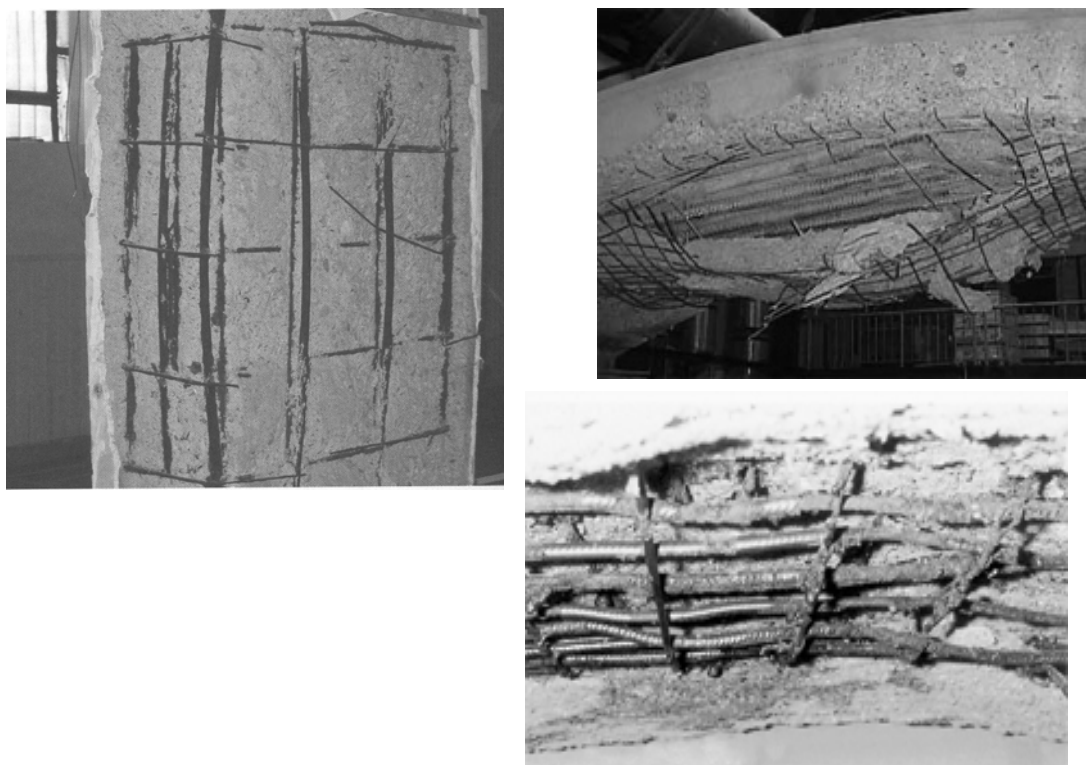
Obr. 6.24 Vliv teploty na pevnost v tlaku betonu s křemičitým kamenivem – převzato z M. Collepardi 2009, *Moderní beton*, ČKAIT, Praha.



Obr. 6.25 Vliv teploty na pevnost v tlaku betonu s vápenatým kamenivem – převzato z M. Collepardi 2009, *Moderní beton*, ČKAIT, Praha.

Z výše uvedených obrázků je zřejmé, že pokud je teplota žáru nižší než 750°C je snížení pevnosti betonu u betonu s uhličitánovým kamenivem nižší než v případě křemenného kameniva. Tato skutečnost je vysvětlována vyšší spotřebou tepla na endotermickou reakci při rozkladu CaCO_3 na oxid uhličitý při teplotě cca 800°C.

Také lehké betony s expandovaným jílem vykazují při požáru vyšší odolnost v porovnání s betony s křemenným kamenivem. Zároveň mají i lepší tepelně-izolační vlastnosti, díky čemuž jsou schopny delší dobu chránit ocelovou výztuž. Ta ztrácí svoje mechanické vlastnosti při teplotách 450 – 500°C. Pro její ochranu v případě požáru má zásadní význam tloušťka a vlastnosti krycí vrstvy, která by měla udržet teplotu výztuže pod 450°C. Tepelná vodivost ocelové je výrazně výztuže vyšší než betonu (cca 50 W/mK > 2 W/mK) – větší deformace výztuže (rozpínání) – porušení vazby mezi výztuží a betonem – oddělení krycí vrstvy. Čím tlustší je krycí vrstva, tím nižší riziko lokálních trhlin vedoucích k výztuži. Beton v krycí vrstvě musí být dobře zhutněn, neboť v případě lokálních poruch z důvodu nedostatečného zhutnění mohou horké plyny pronikat až k výztuži a zahřívat ji. Příklady železobetonové konstrukce po požáru jsou uvedeny na Obr. 6.26a, b, c. Charakteristické je především odloupení krycí vrstvy výztuže a její deformace.



Obr. 6.26a, b, c *Železobetonová konstrukce po požáru.*

6.10.6 Vliv působení nízkých teplot na porézní strukturu betonu

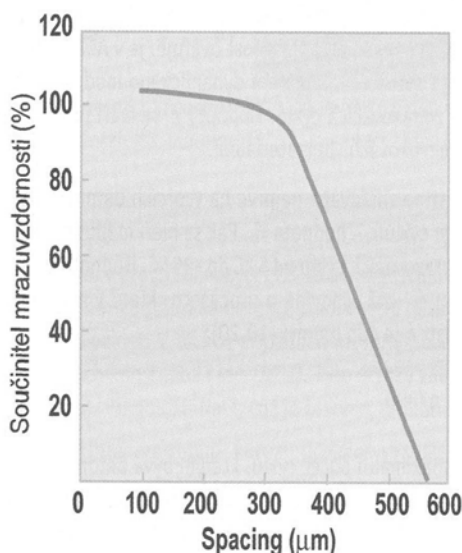
Rozrušování porézní struktury cementové pasty je způsobeno změnou skupenství vody v kapilárních pórech. Tato přeměna je provázána objemovým nárůstem o cca 9%, v důsledku kterého dochází ke vzniku vnitřní pnutí a tahového napětí ve struktuře betonu. K porušení betonu vlivem fázové změny kapalné vody na led může dojít pouze tehdy, když je **stupeň nasycení** (objem vody/objem pórů) vyšší než určitá prahová hodnota, tzv. **kritické nasycení** (závislé na porézní struktuře betonu). Pro zajištění mrazuvzdornosti je nezbytné při návrhu betonu a jeho výrobě zohlednit tři základní faktory: **omezení obsahu kapilárních pórů, míra provzdušnění betonu, použití hutného, mrazuvzdorného kameniva.**

Snížení objemu kapilárních pórů (0.1 – 10mm) v cementové pastě dosáhneme snížením vodního součinitele. V důsledku omezení objemu kapilárních pórů zabráníme pronikání vody z vnějšího prostředí do betonu, čímž snížíme celkové množství kapalné vody, která by se při působení mrazu mohla přeměnit v led.

Provzdušněním betonu se rozumí zanesení uzavřených pórů (bublin) o průměru 100 – 300 µm do struktury betonu. Vzdálenost těchto pórů (**spacing**) by měla být v rozsahu 50 - 250 mm, při celkovém objemu dutin cca 4-6% z objemu betonu. Tyto záměrně vnesené póry uvolní v případě mrazu vnitřní napětí v betonu, čímž nedojde ke vzniku velkých krystalizačních tlaků ledu. Se vzrůstajícím objemem ledu je do těchto pórů tlačena tekutá voda – nutnost blízkosti vzduchových bublin a kapilárních pórů, kde se mohou tvořit první krystalky ledu. Tímto způsobem dojde ke krystalizaci ve velkých pórech a ne v malých, kde by hrozilo překročení pevnosti betonu. Při tání je voda transportována z velkých pórů opět do malých kapilárních pórů. Po vícenásobném zatížení zmrazovacími cykly může dojít k částečnému zaplnění vzduchových bublin hydratačními produkty. V tomto případě betonová konstrukce po určitém čase ztrácí svou mrazuvzdornost. Pokud je vzdálenost vzduchových pórů > 300 mm (viz. Obr. 6.27) dochází k výraznému poklesu součinitele mrazuvzdornosti pod limitní hodnotu. V tomto případě je nutné upravit množství provzdušňovací přísady, případně složení betonové směsi

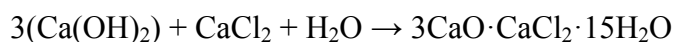
Je nutné si uvědomit, že účinek provzdušnění je omezen pouze na cementovou matici. Z tohoto důvodu se musí použít při výrobě mrazuvzdorného betonu hutné, mrazuvzdorné kamenivo.

Pro hodnocení mrazuvzdornosti se stanovuje stupeň mrazuvzdornosti k (%). V České republice se nejčastěji určuje dle ČSN 73 1322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu, přičemž se počítá jako poměr dynamických modulů pružnosti, pevností v tahu za ohybu, nebo pevností v tlaku betonu zatíženého zmrazovacími cykly a betonu bez zatížení. Mezní hodnota součinitele mrazuvzdornosti pro mrazuvzdorný beton je 75%.



Obr. 6.27 Vliv vzdálenosti vzduchových bublin na součinitel mrazuvzdornosti.

Při mrznutí a tání ledu je nutné počítat s tím, že beton není v kontaktu pouze s čistou vodou, ale že často dochází k těmto fázovým změnám v prostředí nasyceném rozmrazovacími solemi. Tomuto působení jsou vystaveny například mostní konstrukce, vozovky, chodníky, apod. Jako rozmrazovacích prostředků se v České republice nejčastěji používá NaCl a CaCl₂. Při tání ledu je tedy nutné brát v úvahu také jejich vedlejší účinky. Chloridové ionty způsobují elektrochemickou korozi výztuže. Přítomnost Na⁺ iontů může vést v případě reaktivního kameniva k alkalicko-křemičité reakci. CaCl₂ může reagovat s portlanditem za vzniku oxichloriduvápenatého.

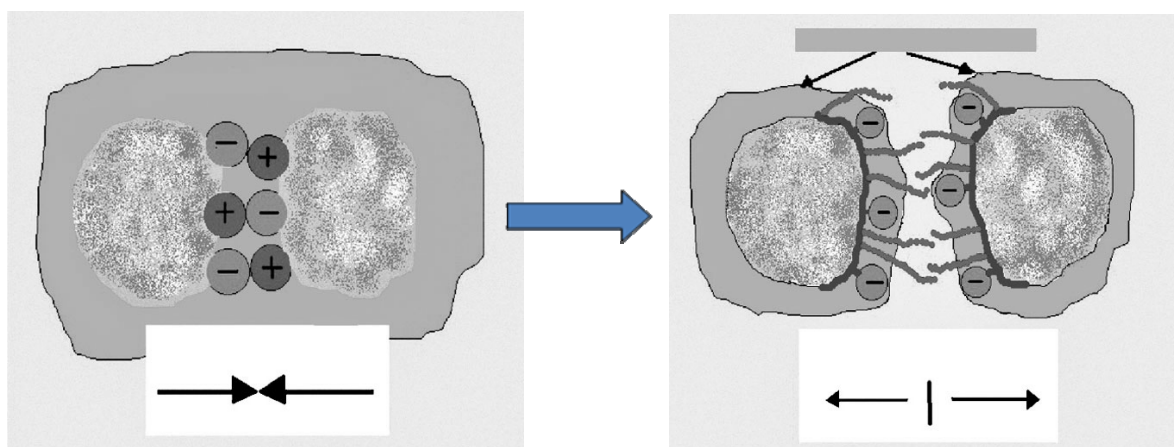


Tato reakce se navenek projeví odlupováním povrchových vrstev betonové konstrukce a vyluhováním pojiva z betonu.

6.11 Přísady do betonu

Přísady do betonu jsou chemické látky, které se do betonové směsi přidávají těsně před nebo v průběhu míchání. Významně mění počáteční vlastnosti betonu i betonu zatvrdlého, čímž umožňují optimalizovat fyzikálních vlastnosti betonu. Přísad se do betonu aplikuje pouze malé množství, typicky v rozsahu 1 až 2% hmotnosti cementu (i méně). Mezi nejčastěji aplikované přísady do betonu patří plastifikátory, superplastifikátory, urychlovače tuhnutí a tvrdnutí, zpomalovače (retardéry) tuhnutí a tvrdnutí, provzdušňovací činidla.

Plastifikátory jsou polymerní látky s dlouhým řetězcem, které způsobují **nárůst tekutosti** a zpracovatelnosti cementové pasty, malty a betonu. Hlavní typy jsou založeny na **kyselině lignosulfonové** a **hydroxycarboxylové** a jejich různých solích. Jsou relativně levné, na druhou stranu však obsahují velké množství nečistot. Jejich plastifikační účinek je způsoben **povrchovou aktivitou polymerních molekul**, které jsou adsorbovány na povrchu cementových zrn. Tyto molekuly vytvářejí na povrchu cementových zrn negativní náboje v rozsahu milivoltů, díky čemuž dochází k vzájemnému elektrostatickému odpuzování cementových zrn (Obr. 6.28). Plastifikátory umožňují tedy disperzi cementových zrn a tím i uvolnění vázané vody mezi zrny, díky čemuž výrazně vzroste tekutost betonové směsi.



Obr. 6.28 Elektrostatické odpuzování zrn cementu v důsledku aplikace plastifikátoru.

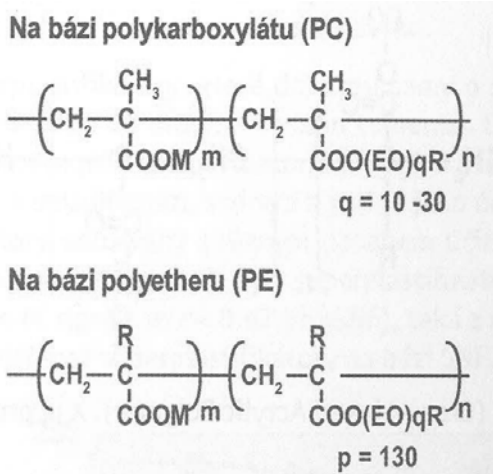
Plastifikátory jsou také známy jako látky snižující množství záměsové vody, neboť umožňují vytvořit beton o stejné zpracovatelnosti při nižším poměru v/c. Důsledkem je nárůst pevnosti a trvanlivosti výsledného betonu při stejném obsahu cementu. Plastifikátory způsobují také zpomalení doby tuhnutí a snížení počáteční pevnosti. Mohou také zároveň provzdušnit beton

v důsledku vzniku vzduchových bublin. Problémem je jejich nečisté chemické složení. Na druhou stranu se jedná o látky relativně levné a jsme schopni jejich reakci cíleně modifikovat a optimalizovat.

Superplastifikátory jsou syntetické látky, které jsou při dosažení tekutosti a zpracovatelnosti více účinné než plastifikátory. Označují se anglickým pojmem „high-range water reducers“. Mají vysokou molekulární hmotnost a vyrábí se v podstatně vyšší kvalitě (čisté látky) než plastifikátory. Díky tomu může být dosaženo jejich vysokého primárního účinku bez sekundárních nepříznivých efektů. Superplastifikátory představují jednu z nejdůležitějších složek vysokohodnotných a vysokopevnostních betonů. V současnosti se používají čtyři základní druhy superplastifikátorů:

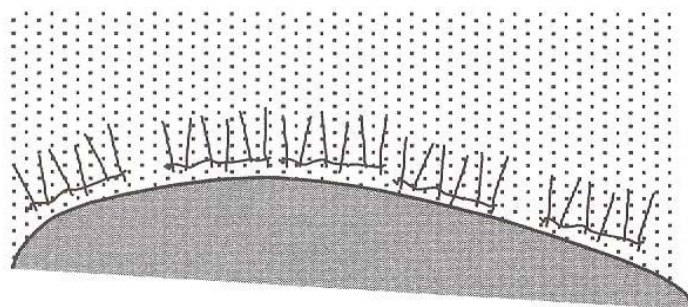
- **modifikované lignosulfonany (MLS)** – čisté chemické složení lignosulfanových plastifikátorů s vyšší molekulovou hmotností - vyšší účinnost,
- **sulfonované melaminformaldehyd kondensáty (SMF),**
- **sulfonované naftalenformaldehyd kondensáty (SNF),**
- polymery obsahující skupiny **kyseliny karboxylové**, např. **polykarboxyláty (PC)** – **polyakryláty (PA)**, **akrylové ethery (PCE - polycarboxylatethery)**, **sulfonované polystyreny** – vyvinuty nedávno, označovány jako superplastifikátory nové generace.

Chemická struktura superplastifikátorů na bázi PC a PE je patrná z Obr. 6.29. Zde q, p jsou počty monomerů etylenoxidu (EO) v řetězci PC, PE.



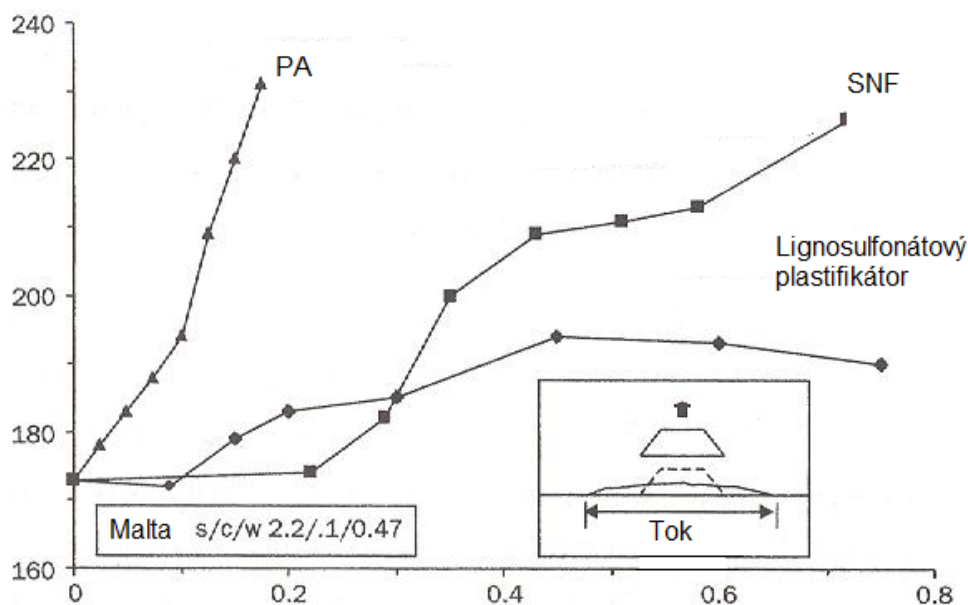
Obr. 6.29 Chemická struktura superplastifikátorů.

Princip působení superplastifikátorů je obdobný působení plastifikátorů. Způsobují vzájemné odpuzování cementových zrn a prostorovou blokáce cementových zrn molekulami vody. Prostorová blokáce („steric hindrance“) vzniká v důsledku vytvoření ochranného štítu pomocí molekul vody, jejichž orientace zabraňuje kontaktu cementových zrn. U superplastifikátorů na bázi MLM, SMF a SNF převažuje elektrostatické odpuzování cementových zrn. U PC působí prostorová blokáce působí ve stejné míře jako elektrostatické odpuzování. Neboť dochází k formování molekul polycarboxylového superplastifikátoru na povrchu cementových zrn (Obr. 6.30).



Obr. 6.30 „Hřebenovité“ molekuly polycarboxylového superplastifikátoru na povrchu cementových zrn.

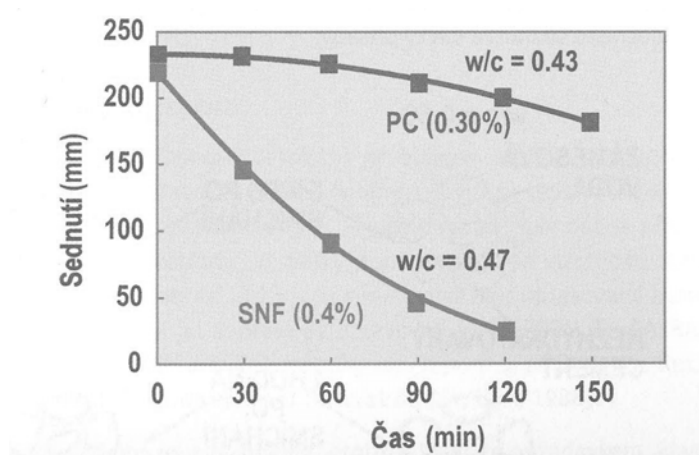
Příklad ztekucovacího vlivu různých typů plastifikátorů demonstruje Obr. 6.31. Zpracovatelnost je zde vyjádřena pomocí zkoušky rozlivu, kde na svislé osy jsou uvedeny hodnoty rozlivu v mm.



Obr. 6.31 Vliv plastifikátoru na zpracovatelnost cementové malty.

Chování jakékoliv kombinace superplastifikátoru a cementu závisí na celé řadě vnějších a vnitřních faktorů, především na typu přísady, složení cementu, jemnosti cementu a na vodním součiniteli. Pro optimální přínos superplastifikátoru k vlastem betonu je vhodné jeho dávkování přibližně 1 – 2 minuty po prvním kontaktu cementu se záměsovou vodou. V případě, že je superplastifikátor aplikován ve stejném čase jako záměsová voda je jeho podstatná část začleněna do rychlé reakce C_3A se sádrou a dojde k redukci zpracovatelnosti.

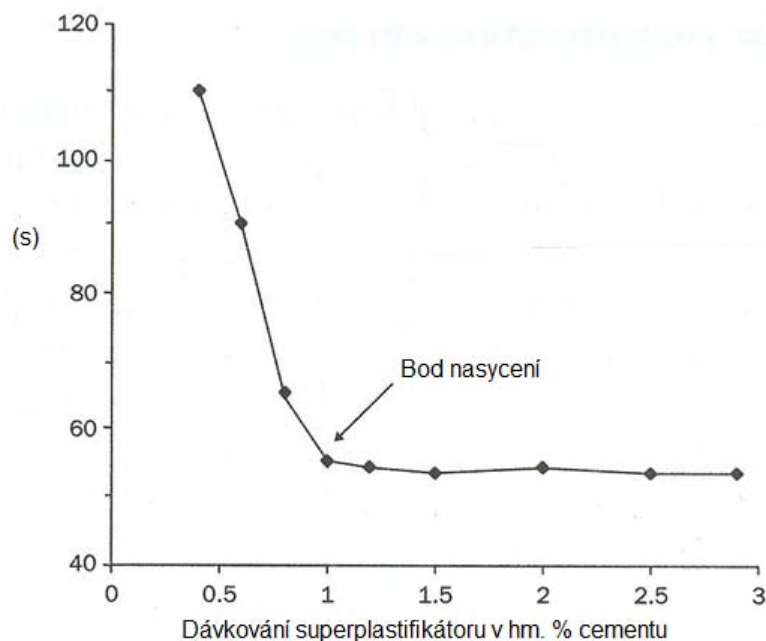
Působení superplastifikátorů je **časově limitováno**, což může být v některých případech, jako např. při transportu na větší vzdálenost problematické (viz. Obr. 6.32).



Obr. 6.32 Ztráta zpracovatelnosti superplastifikovaného betonu při teplotě 20°C, superplastifikátory na bázi polykarboxylátu (PC) a sulfonovaného naftelenformaldehydu (SNF) - převzato z M. Collepardi 2009, *Moderní beton*, ČKAIT, Praha.

Tento problém se řeší smícháním retardéru hydratace společně se superplastifikátorem, přidáním superplastifikační přísady na staveništi před aplikací betonu případně opakovaným přidáním superplastifikačních přísad.

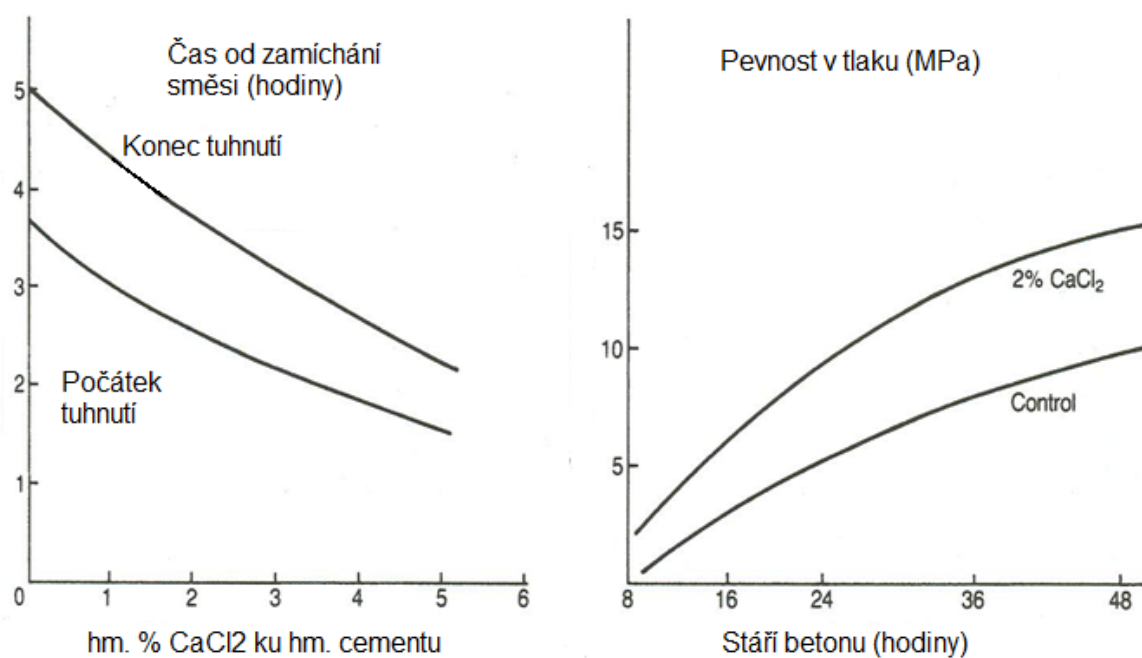
Pro specifický poměr plastifikátoru/hm. % cementu existuje tzv. „**bod nasycení**“ nebo **optimální koncentrace**, za kterou již nenarůstá tekutost betonové směsi (viz. Obr. 6.33). Při překročení této hodnoty již není ekonomicky ani materiálové efektivní zvyšovat množství superplastifikační přísady ve složení betonové směsi.



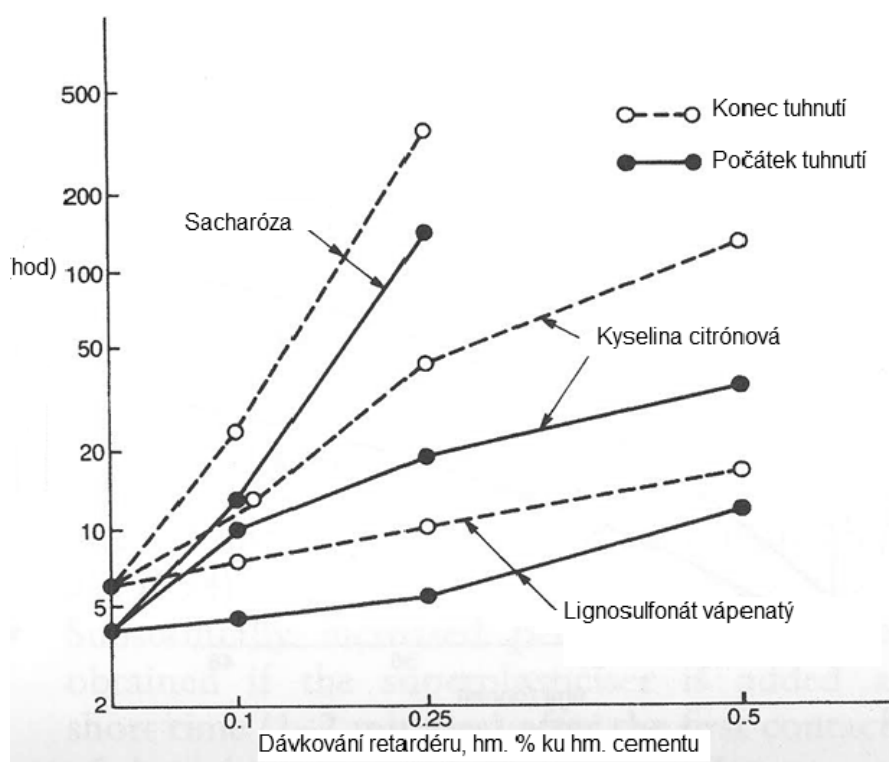
Obr. 6.33 *Stupeň nasycení v závislosti na obsahu plastifikátoru vztaženého k hmotnostním procentům cementu.*

Urychlovače tvrdnutí (tuhnutí) jsou přísady zvyšující a zrychlující podíl hydratované části cementové pasty během hydratace. Jejich aplikace je výhodná s ohledem na zvýšení počáteční pevnosti (1 – 3denní), snížení času ošetřování, možnost rychlejšího odformování, zkrácení doby tuhnutí v případě betonáže za snížené teploty.

V minulosti byl jako urychlovač tuhnutí používán CaCl_2 . Tato látka je snadno dostupná a velmi účinná. CaCl_2 vstupuje do reakce s C_3A , sádrovcem a C_4AF a funguje jako katalyzátor hydratačních reakcí C_3S a C_2S . V důsledku aplikace CaCl_2 dochází také k částečné modifikaci struktury C-S-H gelů. Vliv CaCl_2 na nárůst pevnosti a urychlení tuhnutí je prezentován na Obr. 6.34. Jelikož přítomnost chloridových iontů způsobuje iniciaci koroze výztuže, nemůže být CaCl_2 použit pro vyztužené a předepnuté betonové konstrukce. Z tohoto důvodu byly vyvinuty nové typy akceleratorů bez přítomnosti Cl iontů. Jedná se o látky na bázi dusičnanu vápenatého ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), dusitanu vápenatého ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$), thiosíranu, tri-etanolaminu. Při aplikaci urychlovačů tvrdnutí je nutné brát v potaz skutečnost, že s rychlým nárůstem pevnosti dochází také k nárůstu teploty hydratace. To může přinášet problémy zejména při betonování velkých, monolitických konstrukcí.



Obr. 6.34 Vliv CaCl_2 na nárůst pevnosti a urychlení tuhnutí.

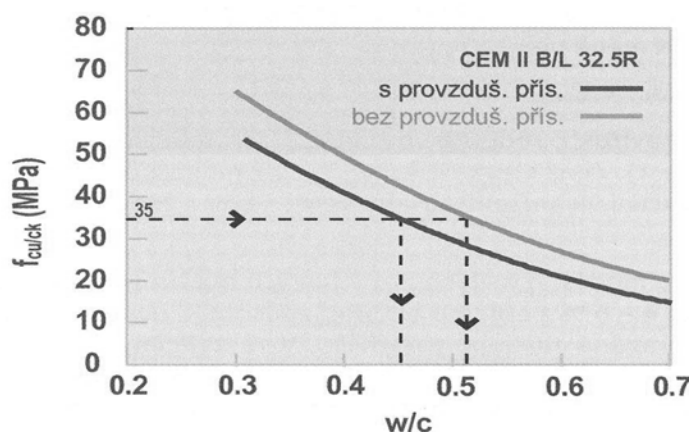


Obr. 6.35 Efekt retardérů hydratace.

Retardéry působí proti akceleraci hydratace v důsledku zvýšené teploty okolí. Používají se zejména v případě, kdy má být beton transportován na delší vzdálenost. Umožňují také

kontrolovat tuhnutí ve velkých pórech, kde je tuhnutí a tvrdnutí výrazně pomalejší. Díky tomu je možné docílit současné tuhnutí veškerých částí betonového prvku bez tzv. **studených spojů** a **diskontinuit**. Velmi efektivními retardéry jsou **sacharóza** a **kyselina citrónová** (Obr. 6.35). Na druhou stranu jejich působení je velmi obtížné kontrolovat. Z tohoto důvodu jsou jako retardéry v současnosti preferovány lignosulfonáty s významným obsahem cukru.

Provzdušňovače („Air entraining agents“) jsou organické materiály, které po přidání do záměsové vody rozptýlí v materiálu kontrolované množství vzduchu ve formě mikroskopických bublin. Průměr vyvozených vzduchových bublin je typicky v rozsahu 0.02 – 0.1mm s průměrnou vzdáleností 0.25 mm. Zformované bubliny jsou dostatečně stálé, aby nedošlo k jejich změně během lití, umístění, hutnění, tuhnutí a tvrdnutí betonu. Hlavním důvodem cíleného provzdušňování je zvýšit odolnost betonu proti zmrazovacím cyklům. Nárůst pórovitosti přináší pokles pevnosti betonu, přičemž nárůst pórovitosti o 1% způsobí přibližně pokles pevnosti o 6%. Tento negativní vedlejší efekt je částečně kompenzován snížením vodního součinitele, které aplikace provzdušňovačů umožňuje. Při aplikaci provzdušňovačů se také částečně zvyšuje zpracovatelnost betonové směsi, což je také výhodné. Vliv míry provzdušnění (obsahu vzduchu) na pevnost betonu v závislosti na vodním součiniteli je patrný z Obr. 6.36. U provzdušněného betonu je nezbytné kontrolovat objemu vzduchu pomocí porozimetru, i z tohoto ohledu je výroba mrazuvzdorného betonu dražší a náročnější než běžného betonu.



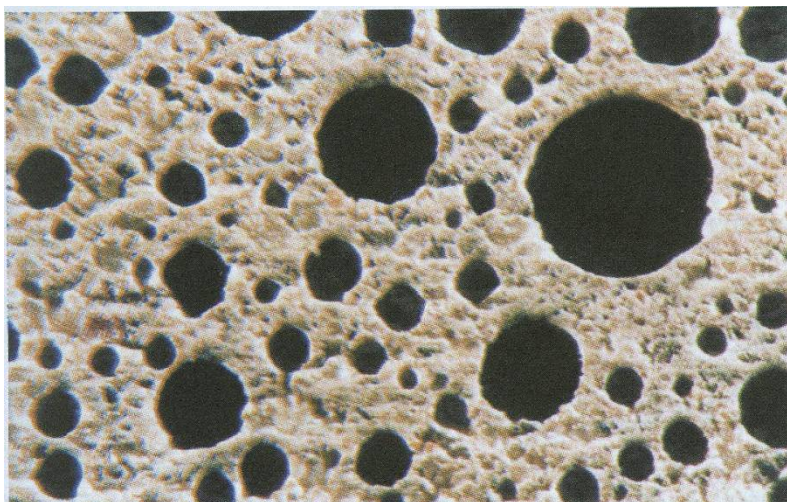
Obr. 6.36 Vliv vodního součinitele na pevnost betonu - převzato z M. Collepardi 2009, *Moderní beton*, ČKAIT, Praha.

Nejčastěji používaná chemická činidla pro provzdušnění mohou být rozdělena do čtyřech základních skupin:

- **solí pryskyřic na bázi dřeva,**
- **syntetické detergenty,**
- **sole kyseliny naftenové,**
- **masné a pryskyřičné kyseliny a jejich soli.**

Do 80. let 20. století převládala aplikace pryskyřic na bázi dřeva např. na bázi neutralizované **Vinsolové pryskyřice**. „Vinsol resin“ – tmavě červeno-hnědá termoplastická pryskyřice extrahovaná z kořenů borovice a rafinována. Vyráběna exklusivně firmou Aqualon v Brunswicku, Georgia, USA. V současné době je vyvinuta celá řada nových typů a v podstatě se aplikují všechny výše uvedené principy jejich složení.

Uměle vytvořený systém vzduchových pórů je ovlivněn materiály použitými v betonu a technologií jeho výroby. Bylo zjištěno, že provzdušnění betonu bude při dodání stejného množství provzdušňovacího činidla tím větší, čím větší bude alkalita betonové směsi. Naopak provzdušnění snižuje nárůst jemnosti mletí cementu. Struktura provzdušněného betonu je zobrazena na Obr. 6.37.



Obr. 6.37 *Provzdušnění rozptýlené v matrici betonu.*

7 VYSOKOPEVNOSTNÍ A VYSOKOHODNOTNÝ BETON

7.1 ŘÍZENÉ TVRDNUTÍ CEMENTOVÉHO POJIVA

7.2 ZVYŠOVÁNÍ PEVNOSTI BETONU

7.3 VYSOKOHODNOTNÝ BETON

7.4 BETONY ULTAVYSOKÝCH PEVNOSTÍ

Současný materiálový výzkum v oblasti navrhování a technologie betonu je zaměřen na vývin materiálů vysokých užitných a fyzikálních vlastností, které jsou navrhovány pro specifické aplikace a podmínky prostředí, ve kterém budou po dobu životnosti působit. Kromě mechanicko-fyzikálních vlastností se klade stále větší důraz na vlastnosti spojení s trvanlivostí betonu, jako je například permeabilita, definovaná porézní struktura, odolnost proti zvýšeným teplotám, odolnost proti agresivnímu prostředí apod. Betony, které splňují požadavky nejen na vysoké pevnostní charakteristiky, ale i jejich další výše uvedené parametry vyhovují současným vysokým požadavkům stavební praxe, označujeme pojmem **vysokohodnotné**. Jak již bylo řečeno v kapitole 6, za klíčový krok pro cílený a řízený návrh betonů vyšších užitných vlastností lze považovat teoretickou práci T. C. Powerse publikovanou v roce 1955. Powers v této práci zohlednil vliv uspořádání porézní struktury hydratované cementové pasty na pevnostní parametry betonu. Z výsledků této práce vycházejí v podstatě všechny výzkumné práce zaměřené na zlepšování fyzikálních parametrů betonu, případně s ní úzce souvisejí. Na základě této práce byla překročena původně nedosažitelná hranice pevnosti betonu v tlaku 110 MPa, při zachování dostatečně jednoduché technologie výroby bez využití speciálních, technicky náročných metod. Přesto má materiálový výzkum v oblasti betonu před sebou řadu úkolů, jako je například řízení procesu hydratace cementu směrem k podstatnému zkrácení doby tvrdnutí čerstvé betonové směsi v automatizované kontinuální výrobě, snížení hmotnosti betonu při zachování dobrých mechanicko-fyzikálních parametrů, uplatnění betonů nižších kvalit, které je možné vyrábět z méně hodnotných surovin a odpadních materiálů. Další směr materiálového výzkumu je zaměřen na výrobu betonů, které mají vyšší odolnost a trvanlivost proti působení agresivního prostředí. Výzkum a vývoj materiálů na bázi betonu tedy není ukončen a zůstává i nadále velice aktuálním tématem zejména s ohledem na ekonomickou a ekologickou náročnost v současnosti produkovaných staveb.

7.1 Řízené tvrdnutí cementového pojiva

Od počátku minulého století, kdy již můžeme mluvit o teoreticky podložené průmyslové výrobě cementového slínku, se používá **universální regulátor rychlosti tuhnutí** směsi portlandského cementu s vodou - **sádrovec**. Posunuje počátek tuhnutí tak, aby mohla být čerstvá betonová směs dokonale zpracována i nejjednodušším způsobem. Sádrovec reaguje s aluminátovou i feritovou fází slínku ihned po smíchání s vodou a oddaluje počátek tuhnutí této soustavy, přičemž mechanismus a kinetika prvních reakcí závisí především na obsahu trikalciium aluminátu (C_3A) ve slínku, ale také na množství sádrovce. Produkty reakcí těchto substancí brzdí další hydrataci cementu a umožňují tak regulovat tuhnutí čerstvé betonové směsi směrem k dosažení potřebné manipulační doby zpracování.

Snaha zkrátit počáteční fázi přechodu systému cement-voda z kvazikapalné formy na pevnou hmotu a urychlit tvrdnutí přísadou urychlovačů přinesla částečné úspěchy v některých aplikačních oblastech, často však provázené nepříznivými jevy, např. **korozí výztuže** při použití nejrozšířenějších přísad na bázi chloridů.

Pouze protěplování betonové směsi v průběhu výroby prefabrikovaných stavebních dílců významněji zkrátilo technologický proces tvrdnutí betonu - avšak za cenu energetických dotací do systému.

Další možností jak ovlivnit proces tuhnutí a tvrdnutí cementového pojiva betonu je změna chemického složení cementářských surovin spojená se změnou procesu výpalu. Takto lze dosáhnout maximálního obsahu trikalciium silikátu C_3S ve slínku, který je pak hlavním nosičem pevnosti betonu po jeho zatvrdnutí.

Současným trendem ve způsobu ovlivňování rychlosti hydratace cementu je náhrada univerzálního zpomalovače sádrovce za jiné **regulační systémy** složené z více substancí. Synergický efekt intenzifikátoru mletí a regulátoru tuhnutí s plastifikačními účinky umožňuje snížit vodní součinitel čerstvé betonové směsi, zkrátit počátek tuhnutí (Tab. 7.1) a dosáhnout rychlejšího růstu počáteční pevnosti. Například intenzifikační účinek **ligninu** aplikovaného při mletí slínku spolu s přísadou vhodných typů alkalických solí umožňuje dosáhnout vysokou jemnost portlandského cementu provázenou rychlým průběhem hydratačního procesu.

Tab. 7.1 *Rychlost tvrdnutí cementové kaše v závislosti na specifickém povrchu cementových zrn.*

Specifický povrch (m²/kg)	Rychlost tuhnutí poč./konec (min)
274	355/595
475	75/110
680	30/40
851	7/8

Náhrada sádrovce za jiné typy regulátorů tuhnutí cementového pojiva přináší s sebou i změny v technologii výroby betonu. Kratší interval zpracovatelnosti čerstvé betonové směsi vyžaduje přesné dávkování všech složek, dodržování časového postupu míchání jednotlivých substancí i účinné ošetřování betonu v počáteční fázi tuhnutí. Zvláště náročná je homogenizace všech složek ve směsi. Spádové míchačky jsou málo vhodné, doporučuje se míchání v horizontálních míchačkách typu Cyklon.

7.2 Zvyšování pevnosti betonu

Teoreticky, z meziatomárních sil odvozená pevnost betonu v tlaku, je asi třikrát vyšší, než je běžnými technologiemi dosažitelná, tj. cca 110 MPa . Důvody jsou v samotné klasicky inhomogenní složité struktuře betonu. Četné nepravidelné dutiny, póry a trhlinky jsou místa, u kterých se koncentruje napětí při zatěžování a začíná proces porušování betonu. Tento proces nelze technologicky předem podstatně ovlivnit. Dílčího úspěchu lze dosáhnout pouze respektováním následujících zásad:

- používat výhradně portlandské cementy o vaznosti minimálně 50 MPa za 28 dní,
- obsah záměsové vody udržovat v mezích $v/c = 0.25 - 0.40$,
- používat kamenivo o pevnosti v tlaku 1.5 x vyšší než je třída betonu, přičemž mezerovitost ve ztuhnutém stavu musí být nižší než 34 %,
- používat podstatně nižší množství písku, než v obvyklé výrobě běžných betonových směsí, tj. $c/p = 1/0.8 - 0.6$.

Zhoršená zpracovatelnost takovýchto směsí vyžaduje intenzivnější zpracování, nezbytně pak účinné vibrování. Limitních nejvyšších pevností lze však dosáhnout pouze aplikací tlaku. Abychom překonali již dlouho platnou výše zmíněnou pevnostní bariéru 110 MPa (pevnost

v tlaku), je třeba nejprve pochopit základní filosofii tvorby makrostruktury betonu. Ta je vyjádřena v teorii materiálového inženýrství vztahem mezi pevností a strukturou betonu: pevnost v tlaku je nepřímo úměrná obsahu pórů v makrostruktuře. Hlavním faktorem, který ovlivňuje pórovitost pojivé složky betonu hydratované cementové pasty je poměr mezi objemy vody a silikátové fáze a množství vzduchu zachyceného během míchání. To popsal již v roce 1892 Féret rovnicí

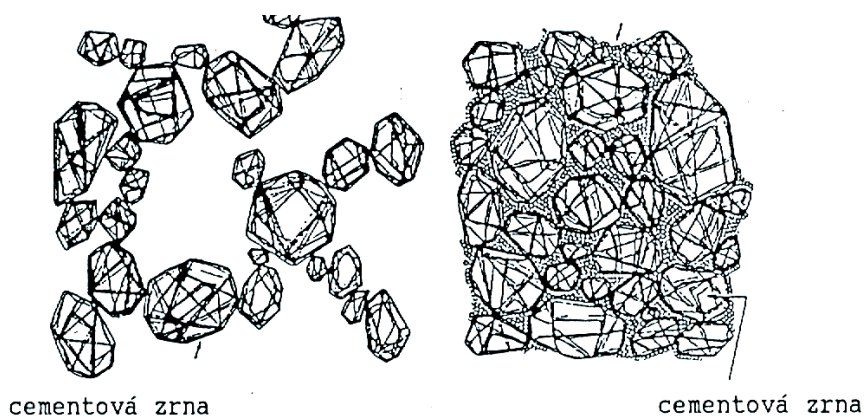
$$f_c = k \cdot \left(\frac{c}{c + v + a} \right)^2,$$

kde f_c je tlaková pevnost hydratované cementové pasty, c , v , a jsou objemy cementu, vody a vzduchu a k je konstanta závislá na druhu cementu. Je zřejmé, že pro růst tlakové pevnosti je nezbytné snížení vodního součinitele a omezení množství zachycovaného vzduchu produkovaného při míchání čerstvé betonové směsi.

Během zhutňování zabraňují velká zrna kameniva rovnoměrnému rozložení vody v čerstvém betonu. **Tranzitní zóna** je typicky široká 0.05 – 0.1 mm a obsahuje relativně velké vzduchové póry a velké krystaly hydratačních produktů. Smrštění v průběhu tvrdnutí vyvolává tahová napětí a v důsledku toho vznikají mikrotrhlíčky ve struktuře betonu. Ke zmenšení tloušťky zóny mezi pojivem a plnivem vede snížení vodního součinitele a použití **mikroplniv** - přednostně **křemičitých úletů**.

Málo pevné kamenivo je nejslabším článkem v makrostruktuře betonu. Je-li použito drcené kamenivo, je třeba, aby zrna obsahovala co nejmenší koncentraci defektů (odstřel v lomech). **Optimalizace křivky zrnitosti** částic kameniva je podmínkou dobrého reologického chování čerstvé betonové směsi. Pokud jsou ve směsi cementu a vody nepatrné sférické částice křemičitého úletu (příp. popílku), mohou vytlačit vodu ze sousedství cementových zrn a z tranzitní zóny.

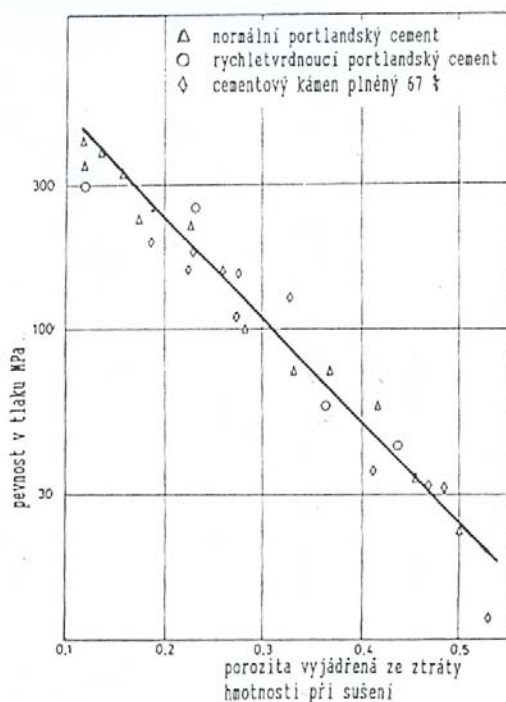
Čím méně vody je při dané dávce cementu do betonu přidáno, tím vyšších pevností betonu se dosáhne. Emulgátory svým dispergačním účinkem redukuje sklon cementových zrn k flokulaci (shlukování) a částice mikrosiliky (popílku) vyplňují póry ve struktuře hydratované cementové pasty a zónu mezi pojivem a kamenivem v betonu (viz Obr. 7.1).



Obr. 7.1 Rozložení zrn v hydratovaném cementovém pojivu před (a) a po vyplnění pórů částicemi mikrosiliky (b).

7.3 Vysokohodnotný beton (HPC)

Za skutečný kvalitativní skok v poznávání kompozitního charakteru betonu, který znamenal nový směr ve výzkumných a vývojových pracích betonů s vysokými pevnostními parametry soustředěnými v první polovině minulého století na změny hmotnostních poměrů slínkových minerálů ve skladbě cementového pojiva, byly práce T.C. Powerse publikované v padesátých letech 20. století. Zkoušky provedené v laboratořích na běžných typech betonů a cementových past prokázaly, že pevnost betonu (ale i jeho trvanlivost, mrazuvzdornost, permeabilita) jsou funkcí porozity betonu.



Obr. 7.2 Závislost pevnosti v tlaku hydratovaného cementového pojiva na obsahu pórů v jeho struktuře.

Tento fakt zjištěný na základě průkazných zkoušek není možno ovlivnit ani tím, že změníme hmotnostní poměry slínkových minerálů ve skladbě cementového pojiva, jak byly v tomto smyslu prováděné rozsáhlé výzkumy v první polovině minulého století (hlinitanový cement). Výzkumné práce se pak soustředily na technologické problémy, především na snižování dotace záměsové vody v čerstvé betonové směsi a zjednodušení způsobu zpracování. Další poznatky, které vedly k návrhu technologie výroby vysokopevnostních betonů, jsou především tyto:

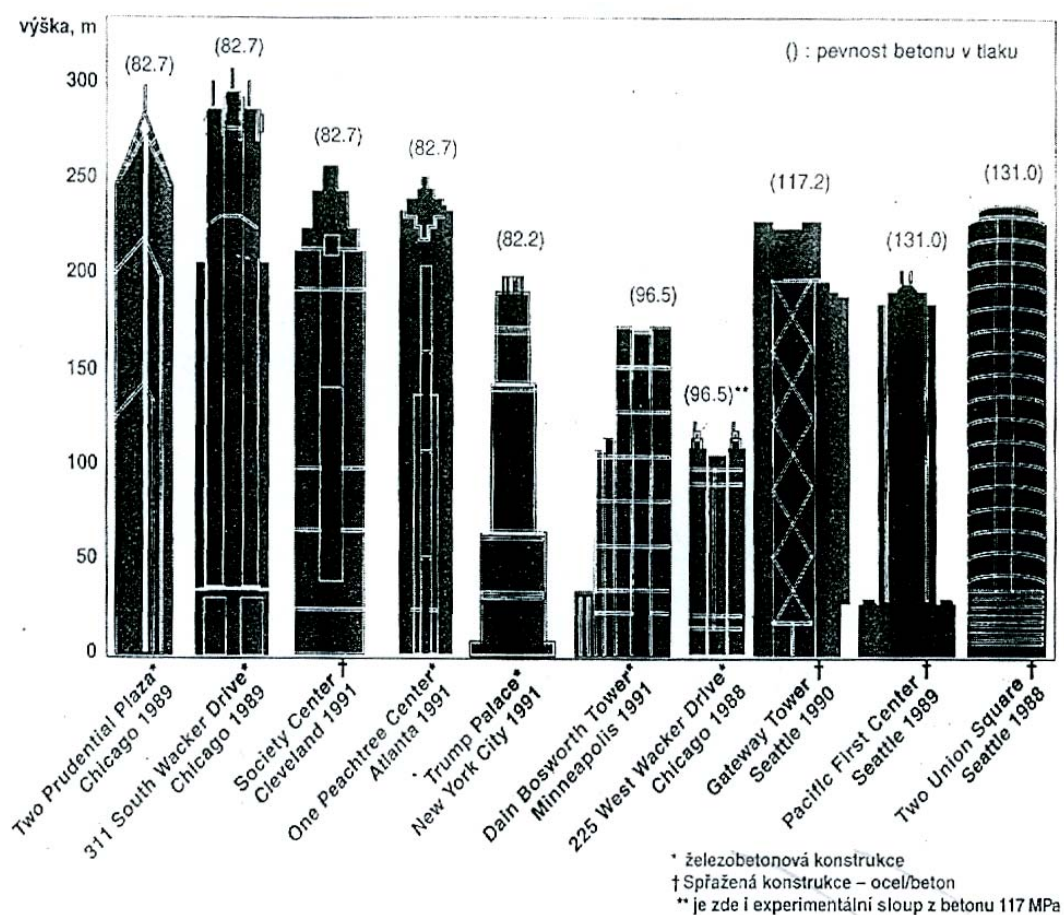
- aplikací látek s **plastifikačním účinkem** do záměsové vody se dosáhne vyššího stupně rozptýlení cementových zrn v hydratujícím pojivu,
- následkem toho dojde k lepšímu vyplnění pórů a dutin v makrostruktuře betonu a tedy ke snížení porozity a eliminaci mikrotrhlin,
- uplatněním cementů o velkém měrném povrchu jeho částic se zvyšuje stupeň hydratování cementu.
-

Díky použití plastifikátorů, zvýšené jemnosti mletí slínek a přísady jemnozrnných popílků se zvýšila pevnost betonu v tlaku až na hranici 60 MPa. Teprve na počátku 70. let minulého století aplikací nových typů plastifikátorů bylo možno snížit vodní součinitel betonových směsí pod hranici $v/c = 0.35$ a přísada křemičitých úletů vyřešila i zásadní problém konzistence těchto směsí - **reologické vlastnosti** se podstatně zlepšily. Za první velkou aplikaci HPC betonu se považuje stavba výškové budovy River Plaza v Chicagu (Obr. 7.3).



Obr. 7.3 Výšková budova River Plaza v Chicagu.

Psychologickou hranici vodního součinitele $v/c = 0.30$ se podařilo snížit použitím speciálního mikrocementu a vysokými dávkami plastifikátorů spolu s příměsí křemičitého úletu až na hranici $v/c = 0.16$. To provedl H. H. Bache v roce 1981 a získal beton o pevnosti v tlaku 280 MPa. Příklady využití HPC betonů ve stavební praxi ukazuje Obr. 7.4. Architekti využili tento beton k zatraktivnění konstrukce díky možnosti navrhnout tenčí podlahy a štíhlejší sloupy.



Obr. 7.4 Mrakodrapy z vysokohodnotného betonu.

Je třeba přiznat, že pokrok ve výrobě vysokopevnostních betonů byl plodem spíše empirického přístupu, než vědy. Teprve následné teoretické práce ukázaly, že na zvyšování pevnosti betonu se nepodílí pouze snižování vodního součinitele, který určuje porozitu a v důsledku toho pevnost cementového kamene, ale i fakt, že nejslabším článkem ve struktuře betonu je **rozhraní mezi kamenivem a ztvrdlým cementovým pojivem**. Záleží tedy na druhu, tvaru, velikosti a prostorové uspořádání plniva betonu a lokální koncentraci pórů ve struktuře.

7.4 Betony ultravysokých pevností

Extremně vysoká pevnost těchto typů betonů vychází z poznání, že čím méně vody je při dané dávce cementu přidáno do čerstvé betonové směsi, tím vyšších pevností se dosáhne. Voda je ovšem nedílnou součástí betonové směsi - plní svou **fyzikální funkci** (rozhoduje o reologickém chování betonu během výroby) a **chemickou funkci** tím, že umožňuje hydrataci cementu. Z těchto skutečností vycházejí jednotlivé, v současné době známé typy betonů. Problémy, které řeší materiálový výzkum a dopracovává stavební praxe, se soustřeďují na:

- hledání nových účinných typů plastifikátorů (superplastifikátorů) a ověřování jejich kompatibility s hydratujícím cementem,
- zkoušky trvanlivosti a zvláště pak jejich mrazuvzdornosti se zaměřením na problematiku provzdušňování,
- snižování hydratačního tepla v průběhu tvrdnutí,
- snižování autogenního počátečního smršťování.

V následujícím textu uvádíme vybrané typy betonů ultravysokých pevností, které byly uplatněny v praxi:

- **DSP beton** („Densified Systems wit Small Particles“) - H. H. Bache (1989) dosáhl pevnosti v tlaku 150 až 200 MPa aplikací mikrosiliky, plastifikací užitím superplastifikátorů a použitím jemného kameniva typu žuly, diabasu nebo taveného bauxitu s maximální velikostí zrn 4 mm,
- **MDF beton** („Macro Defekt Free“) - J. D. Birchall (1986) dosáhl zvýšené pevnosti v tahu za ohybu přísadou polymeru (polyvinylalkoholu), který fungoval jako dispergátor a zároveň také jako druhotné reaktivní pojivo tvořící příčné vazby s ionty ve struktuře hydratujícího cementového pojiva, tímto způsobem bylo dosaženo snížení kritické délky mikrotrhlin, výsledný kompozit je systém obsahující vzájemně se prolínající anorganickou a organickou matici,
- **RPC beton** („Reactive Powder Concrete“) - P. Richard (1994) užitím vybraných komponentů a technologií dosáhl pevnosti v tlaku 800 MPa, výroba byla založena na použití plniva s maximální velikostí zrn s optimální granulometrickou křivkou, omezení chemického smršťování tuhnutím pod tlakem, tepelném ošetření, při kterém dochází k transformaci CSH gelu na tobermorit a aplikaci ocelových vláken, které zlepšily houževnatost výsledného betonového prvku.

Příklad složení RPC betonu aplikovaného při stavbě chladicí věže atomové elektrárny Cattenom v roce 1995 je uveden v Tab. 7.2.

Tab. 7.2 *Složení RPC betonu použitého pro chladicí věže atomové elektrárny Cattenom.*

Složka	Obsah (kg)
písek 0,06 – 0,6 mm	380
křemenná moučka	16
křemičité úlety	90
portlandský cement	420
superplastifikátor	13
Voda	81

8 LEHČENÉ HMOTY

8.1 TECHNOLOGICKÉ POSTUPY VÝROBY LEHČENÝCH HMOT

8.2 PLYNOBETON

8.3 POLYMERNÍ LEHČENÉ HMOTY

8.4 SENDVIČE

8.5 KONSTRUKČNÍ PĚNY

Technologický pokrok ve výrobě hmot, který v posledním čtvrtstoletí přinesl řadu zcela nových výrobních postupů, měl pro další rozvoj stavebnictví zásadní význam, neboť umožnil přípravu velmi lehkých stavebních materiálů s dobrými mechanicko-fyzikálními parametry. Tím byla nastoupena cesta ke splnění hlavního požadavku stavební výroby - **snížení celkové hmotnosti staveb**.

Povaha výroby lehčených hmot - plná automatizace procesu a přenesení jednoduchých výrobních zařízení pro dokončovací práce přímo na staveniště, vyhovují požadavku industrializace, tj. tovární výroby co největších stavebních celků s jednoduchými kompletačními postupy. Výčet výhod lehčených stavebních materiálů je třeba doplnit ještě o jednu důležitou skutečnost; nové technologické postupy umožňují vyrábět lehčené hmoty prakticky ze všech typů materiálů silikátové a makromolekulární báze.

Lehčené hmoty lze definovat jako disperze plynné substance v tuhé hmotě. Z pohledu koloidní chemie se jedná o soustavy s plynným disperzním podílem a jsou označovány jako **tuhé pěny**. Objemová hmotnost vyráběných typů se pohybuje přibližně v rozmezí 10 až 1000 kg/m³.

Vlastnosti lehčených hmot jsou závislé na jejich chemické a fyzikální struktuře. **Chemická struktura** je dána složením stěn pórů a charakterem plynné substance uvnitř těchto pórů. **Fyzikální strukturou** se rozumí geometrická stavba tuhé substance, tloušťka jejich stěn a průměr pórů. Klasifikaci těchto materiálů lze provádět podle různých hledisek. Základní důležitost pro způsob jejich uplatnění v konstrukcích má však zjištění, zda prostory s uzavřeným plynem jsou vzájemně odděleny nebo propojeny. Má to rozhodující vliv jak na

pevnostní charakteristiky, tak na izolační vlastnosti. Je však třeba říci, že reálná lehčená hmota obsahuje jak otevřené, tak i uzavřené prostory a jednotlivé druhy limitují k jednomu z těchto extrémů.

Tuhé pěny dělíme na **pravé** a **nepravé**, podle toho zda jsou jednotlivé póry ohraničeny svou vlastní stěnou (pravé pěny), nebo mají sousední póry stěnu společnou (nepravé pěny).

Vedle pěnových hmot známe však i **voštinové lehčené hmoty**, což jsou vlastně vrstvené materiály získané slepením nebo slisováním voštin (šestiboké hranoly připomínající včelí plástve), dále fóliové materiály s uzavřenými prostory zvané **syntaktické pěny**, které se získávají přidáváním dutých mikrokuliček o průměru 5-100 μm z polymerní hmoty nebo skla do pojiva před vytvrzením daného systému.

8.1 Technologické postupy výroby lehčených hmot

Lehčené hmoty lze vyrobit různými způsoby: vmícháním dutých plniv (tzv. mikrobálónků), vymýváním rozpustného plniva, odpařením těkavého plniva, spékáním plných nebo pórovitých granulí nebo napěňováním. Ke vzniku pórovité struktury může dojít mechanickým našleháním kapalně nebo disperzní směsi, vypařováním nízkovroucích kapalin nebo pomocí inertních plynů, vlivem vývoje plynu chemickou reakcí jednotlivých složek směsi, případně přímým tepelným, katalytickým nebo radiačním rozkladem nadouvadel.

Mechanické napěňování je založeno na našlehávání vodného roztoku nebo disperze dané hmoty smíchané s tvrdidlem, emulgátorem a stabilizátorem pěny. Ke stabilizaci vzniklé pěny, tj. disperze plynu v kapalině, dochází vytvořením tenkostěnného obalu částic dispergované fáze. Poslední operací je vyžrávání (pěny na bázi cementu), vulkanizace (kaučukový latex), polymerace (plasty).

Lehčení plyny při vypařování nízkovroucích kapalin se provádí především při výrobě lehčeného polystyrenu, polyvinylchloridu a fenoplastů. Nejrozšířenější pěnoplast ve stavebnictví pěnový polystyren se vyrábí tak, že se styren polymeruje suspenzním způsobem v přítomnosti těkavých alifatických uhlovodíků, které jsou rozpustné ve výchozím monomeru, ale nerozpustné ve vzniklém polymeru. Získaný předpěněný polymer v podobě granulí se po vložení do formy zahřívá nad teplotu měknutí a dopěňuje účinkem tepla z vodní páry.

Lehčení zplodinami chemické reakce složek směsi je typické pro výrobu polyuretanových lehčených hmot, ale i anorganických pojiv (integrální pěny). Využívá se snadno probíhajících reakcí vybraných sloučenin s vodou, při kterých vzniká oxid uhličitý. Vzájemným poměrem složek systému je možno měnit stupeň napěnění a tím i vlastnosti pěnové hmoty po vytvrzení.

Lehčení nadouvadly je principiálně shodné s předchozím způsobem napěňování chemickými zplodinami. Rozdíl je pouze v tom, že nadouvadlo přidávané do systému v podobě prášku se rozkládá za vývoje plynu, který vytvoří v dané soustavě póry. Nadouvadly se lehčí cementové i sádrové suspenze, ale i termoplasty. Struktura lehčeného materiálu závisí na použitém druhu, množství, teplotě rozkladu a době nadouvání.

Vlastnosti lehčených hmot závisí na řadě parametrů. Z materiálových je nejdůležitější chemická podstata napěňované hmoty, obsah a typ přísad. Ze strukturních je to velikost, typ a distribuce pórů. Struktura tuhých pěn se většinou charakterizuje snadno zjistitelným parametrem - objemovou hmotností lehčené hmoty. Největších pevností se dosahuje u lehčených hmot s uzavřenou pórovitou strukturou.

Mechanicko-fyzikální vlastnosti pěnových hmot na makromolekulární bázi jsou určovány nízkou objemovou hmotností. V tomto směru nemohou být srovnávány s tradičními stavebními hmotami na silikátové bázi (viz Tab. 8.1).

Tab. 8.1 *Srovnání vlastností pěnových hmot na silikátové a makromolekulární bázi.*

Vlastnost	Pěnový polystyren	Plynobeton
Objemová hmotnost (kg/m ³)	20	600
Modul pružnosti (MPa)	14	3000
Smykový modul (MPa)	2.1	-
Pevnost ve smyku (MPa)	0.14	0.7
Teplotní vodivost (W/m K)	0.04	0.28

Za jednoznačně výhodné vlastnosti lehčených hmot pro využití ve stavební výrobě jsou považovány nízká objemová hmotnost a tepelně technické parametry. Z tohoto faktu

vycházejí dosavadní aplikace - sendvičová jádra panelových dílců, izolační a dekorační deskové materiály. Jako samostatný konstrukční materiál se uplatňují pouze lehčené hmoty na silikátové bázi.

8.2 Plynobeton

Nejdůležitějším typem lehčených hmot na silikátové bázi jsou **plynobetony**. Rozeznáváme dva druhy plynobetonů lišících se podle použitého plniva, které výrazně ovlivňuje vlastnosti a chování výrobků aplikovaných stavební výrobou.

Plynobetony, jejichž základní složkou je jemný **křemičitý písek**, který se mísí s cementem a hliníkovým práškem a po napěnění ve formě vodní suspenze vlivem uvolňovaného vodíku se dotvrzuje v autoklávu, našly uplatnění pouze pro nenosné stavební prvky s výhodnými tepelně technickými parametry. Hlavním problémem tohoto druhu plynobetonu je stabilizace pórovité struktury do formy pevné opracovatelné hmoty pro výrobu tvárnic a vysoká nasákavost těchto výrobků (viz Tab. 8.2. a Obr. 8.1).

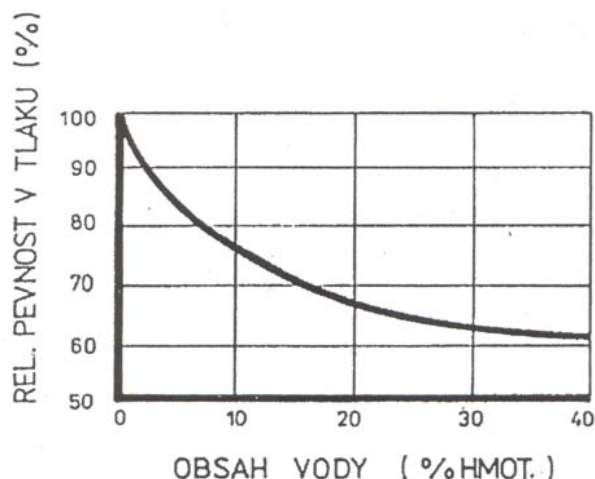
Výrobky z popílku původně označované jako **plynosilikáty** měly původně pojivovou složku výhradně vápennou. Dnes se popílek zpracovává mletím s vápnem a cementem za sucha. Další postup výroby je shodný jako u plynobetonu.

Snadná opracovatelnost lehčených hmot na silikátové bázi přímo vybízí k výrobě přesně definovaných stavebních prvků vhodných pro suché zdění. Vlastnosti tvarovek z autoklávovaného pórobetonu udává Tab. 8.2.

Tab. 8.2 *Vlastnosti tvarovek z pórobetonu.*

Vlastnost	Rozměr	Hodnota
Objemová hmotnost	kg/m ³	400-800
Pevnost v tlaku	MPa	3-10
Modul pružnosti	MPa	14 000-30 000
Tepelná vodivost	W/m K	0.11-0.20
Smrštění	mm/m	0.15-0.45
Nasákavost za 24 hodin	hmotnostní %	26-53

Pórobetony jednoznačně posunuly technickou úroveň stavebních a především rekonstrukčních prací. Avšak základní nevýhoda, která do značné míry omezuje jejich využívání, je citlivost vůči působení povětrnosti (především přímému účinku deště). Snahy řešit tuto nevýhodu aplikací nátěrů selhaly, protože byla nepříznivě ovlivněna difúzní rovnováha vodních par ve hmotě. Docházelo k hromadění vody v pórech v podpovrchové zóně zvláště citlivé na namrzání a v důsledku toho docházelo k odpadávání povrchové vrstvy včetně nátěru.



Obr. 8.1 Pokles pevnosti plynobetonu se vzrůstajícím obsahem vlhkosti ve hmotě.

Nové způsoby řešení tohoto problému jednoznačně směřují k **modifikaci porézní struktury lehčených betonů**. Snahou je docílit větší pravidelnost a výhodnější rozdělení pórů ve struktuře a hydrofobizovat materiály používané k výrobě lehčených betonů, aby se snížil nepříznivý vliv vody. Výroba takového lehčené hmoty je založena na využití jílových materiálů upravených **organokřemičitany**. Nasákavost takto upraveného plynobetonu je řádově nižší, než u původního plynobetonu a je tedy zajištěna vysoká odolnost proti působení mrazu.

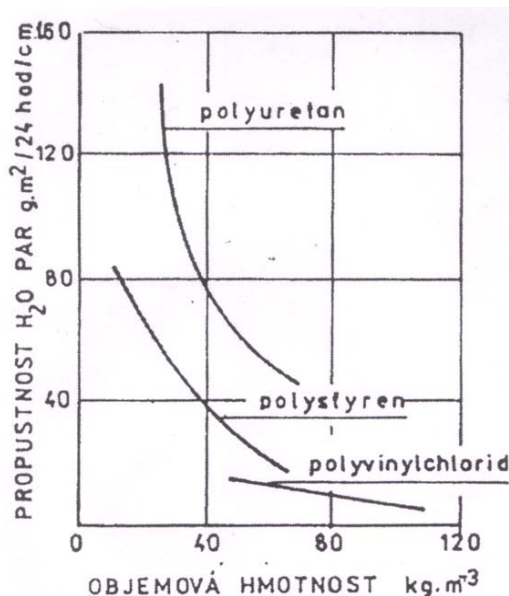
8.3 Polymerní lehčené hmoty

Většinu plastů lze připravit v lehčené formě. Technologické postupy výroby jsou v zásadě stejné jako u předchozích silikátových hmot. Převažuje však chemické vypěňování využívající tepelný rozklad nadouvadel. Z hlediska chemického složení platí, že lehčené hmoty připravené polykondenzačními reakcemi (např. polyesterové pryskyřice) mají menší pevnost než lehčené plasty získané polymerací (polystyren) nebo polyadici (polyuretany).

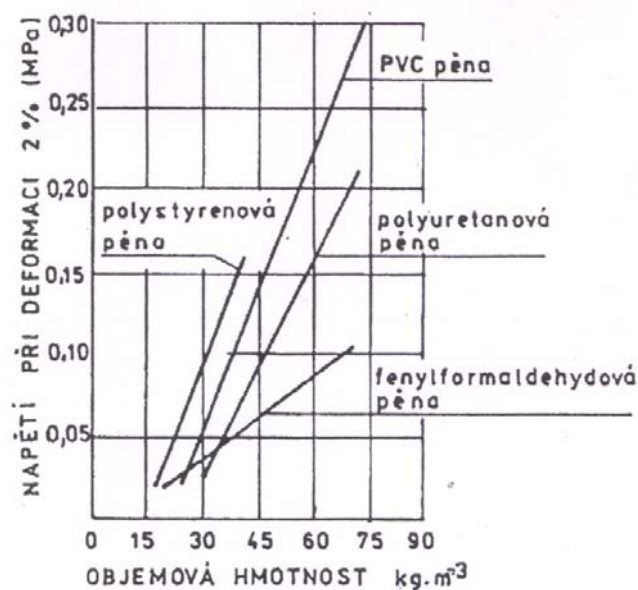
Mezi pro stavebnictví nejvýznamnější polymerní lehčené hmoty patří bezesporu polystyren a polyuretany (viz Tab. 8.2).

Základní vlastnosti lehčených plastů jsou dány **druhem polymerů**, z nichž jsou odvozeny. Jsou to pevnostní parametry, trvanlivost, odolnost vůči povětrnostním vlivům, hořlavost a další. Řada vlastností však závisí na **makrostruktuře**, tj. na velikosti, objemovém obsahu a tvaru pórů. Jsou to, pro stavebnictví tak závažné vlastnosti, jakými jsou propustnost pro vodní páry, nasákavost a tepelně izolační parametry. Rozhodujícím kritériem pro stavební aplikace lehčených plastů je jejich objemová hmotnost. Schopnost tepelně izolovat prudce klesá se stoupající objemovou hmotností, přičemž příkře klesá propustnost pro vodní páry (viz Obr. 8.2). Pevnost v tlaku se uvádí smluvní hodnotou zatížením způsobujícím 2% deformaci, protože při jejich zatěžování nedochází k destrukci. Při větší deformaci se projevuje studený tok plastového skeletu. Na Obr. 8.3 jsou uvedeny takto pojaté pevnosti vybraných lehčených plastů v závislosti na objemové hmotnosti.

Nejdůležitější vlastností, která dnes činí lehčené plasty nepostradatelné pro rekonstrukční postupy (především pro dodatečně prováděné izolace vnějších plášťů panelových domů) je **tepelně izolační schopnost**, závislá ovšem na obsahu vody ve struktuře. Tato skutečnost se někdy pomíjí a často to pak bývá příčinou jejich neúspěšných aplikací.



Obr. 8.2 Závislost paropropustnosti na objemové hmotnosti lehčených plastů.



Obr. 8.3 *Napětí při 2% deformaci lehčených plastů v závislosti na objemové hmotnosti.*

Výrazný vliv vlhkosti na součinitel tepelné vodivosti je způsoben skutečností, že kapalná voda, která může za určitých podmínek vyplňovat póry pěnoplastů, má součinitel tepelné vodivosti při 20°C roven hodnotě 0.58 W/mK, což je 25x vyšší než hodnota tepelné vodivosti vzduchu 0.025 W/mK, který je ovšem nositelem tepelně izolačních vlastností stavebních materiálů obecně. Při vyšší přítomnosti kapalně vody v pórech stavebních hmot dochází k nárůstu transportu tepla prouděním. Negativní vliv vlhkosti na tepelnou vodivost se projevuje při zmrznutí vody - součinitel tepelné vodivosti ledu je roven 2.2 W/mK při teplotě 0°C! To podstatně ovlivňuje postupy při provádění izolací ve stavební praxi. Je tedy vždy počítat s tím, že návrhové hodnoty použité při výpočtech vycházejí z hodnot naměřených na vysušených vzorcích. Při návrhu konstrukcí i konstrukčních detailů je tedy nutno počítat se součinitelem tepelné vodivosti, který odpovídá praktické vlhkosti pěnoplastu.

Je třeba upozornit na citlivost některých lehčených plastů (např. polystyrenu) vůči působení organických kapalin a par (zplodiny dehtu). Známe je „vytrácení“ polystyrénových tepelně izolačních desek na plochých střechách, když byly použity ve spojení s dehtovými lepenkami.

Místo lehčených plastů ve stavební výrobě je především při výrobě vrstvených konstrukčních prvků - sendvičů. Samostatným konstrukčním prvkem však zřejmě budou strukturní a

integrální pěny na bázi vybraných druhů plastů. Tento fakt je z pohledu materiálového inženýrství mimořádně významný.

8.4 Sendviče

Složené konstrukční prvky - sendviče - jako vrstvené kombinace dvou odlišných materiálů, lehkého jádra a pevného pláště, převzali stavebníci od leteckých konstruktérů. Tedy z odvětví, kde nároky na poměr pevnost/hmotnost jsou vůbec nejvyšší.

Stavební konstruktéři byli ovšem podstatně skromnější při posuzování vhodnosti hmot. V izolační jádrové vrstvě se uplatnila celá řada materiálů o nízké objemové hmotnosti od dřevité vlny přes minerální plst' až polenové sklo a pěnoplasty. Obvodové stěny tvořily tradiční osvědčené materiály: sádrokarton, sololit, eternit, tabulové sklo, plech a posléze i vyztužené plasty. Stabilita panelů se zajišťovala rámem, který dodával těmto prvkům charakter samonosného stavebního dílce.

Je nutno zdůraznit, že to byly právě tyto vrstvené sendvičové panely, které položily základy moderní industrializované výrobě prefabrikovaných stavebních prvků vyráběných kompletně mimo staveniště. S postupujícím vývojem kvalitnějších hmot o velmi nízké hmotnosti i dostatečně pevných, se zvyšovala kvalita sendvičů. Zásadní význam pro výrobu znamenaly nové typy reaktivních, na místě vypěňovaných polymerů. Z počátku ryze manufakturní výroba se postupně zautomatizovala.

Vyšší kvalita hmot tvořících sendvič a dokonalejší spojení jádra s pláštěm umožnily provést systematický průzkum chování tohoto kompozitu a vytvořit teoretické zázemí pro jejich výpočet. Dá se říci, že dnes jsou již známy deformační charakteristiky běžných typů kombinací jádro/plášť při namáhání v ohybu, vzpěru i vlivem teplotních změn. V současné době je v konstrukční oblasti soustředěna hlavní pozornost na snížení nadměrného dotvarování sendvičových desek a zajištění dokonalé adheze mezi pláštěm a jádrem. Pro plášťovou část se používají známé tradiční materiály s vysokými parametry. Ve vývoji jsou pouze hmoty pro jádrovou část. Jak vyplývá z Tab. 8.3, ve které jsou uvedeny vlastnosti hmot s ohledem na obecně platná kritéria pro ideální materiál sendvičového jádra, téměř vše mluví pro pěnoplasty.

Vedle mechanicko-fyzikálních vlastností je třeba uvážit i technologické aspekty výroby s ohledem na automatizaci procesu. Je zřejmé, že pouze pěnové polymery umožňují kontinuální výrobu lehkého jádra přímo v plášti sendviče. Existuje celá řada typů zařízení na míchání a dávkování polymerních pěn, jak pro jednorázovou, tak i pro kontinuální výrobu jádrové části sendvičových panelů. Princip výroby je však vždy stejný: v přesných poměrech zamíchané monomerní reaktivní složky a vypěňovací činidla jsou v časově řízeném procesu vstřikovány (vertikální formy) nebo nanášeny (horizontální formy) mezi plášť sendviče a tepelně vytvrzovány v tuhou porézní pěnu.

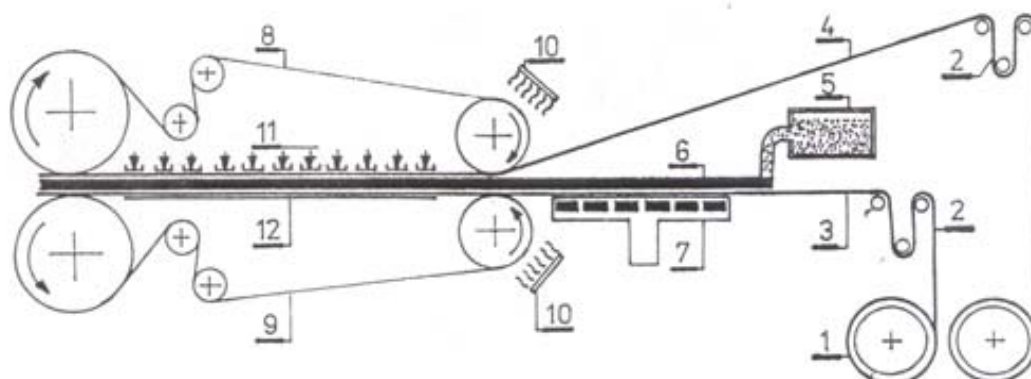
Kusová výroba sendvičů se uplatňuje tam, kde jsou vyžadovány velké tloušťky jádra, dále pro velkorozměrné panely s již zabudovanými instalačními prvky a konečně pro díly se zakřivenými plochami pláště. Pěna je dávkována do dutiny tvořené obvodovým pláštěm. Dávkovací hlavice je posunována od jednoho konce k druhému a zpět rychlostí úměrnou objemovému nárůstu pěny. Vzestup pěny je volný a konečné dotvrzení probíhá po uzavření bočních stěn panelu víky.

Tab. 8.3 *Vybrané parametry lehčených plastů.*

	Polystyren	Polyuretan	Polyvinyl-chlorid	Fenoplasty	Polymeth-akrylimid
Objemová hmotnost (kg/m³)	20-60	20-150	40-80	30-100	30-70
Tepelná vodivost 10⁻² (W/m K)	3-4	18-36	29-38	28-41	29-35
Faktor difúzního odporu (-)	100-250	15-100	170-300	40-63	400-800
Teplotní odolnost do (°C)	75-85	80-120	75-110	130	160-180
Délková roztažnost (10⁻⁵ K⁻¹)	5-8	5-10	5-10	4-6	7
Nasákavost po 14 dnech (objem %)	0.5-1	0,2-3	0.2-0.5	8-10	9-11

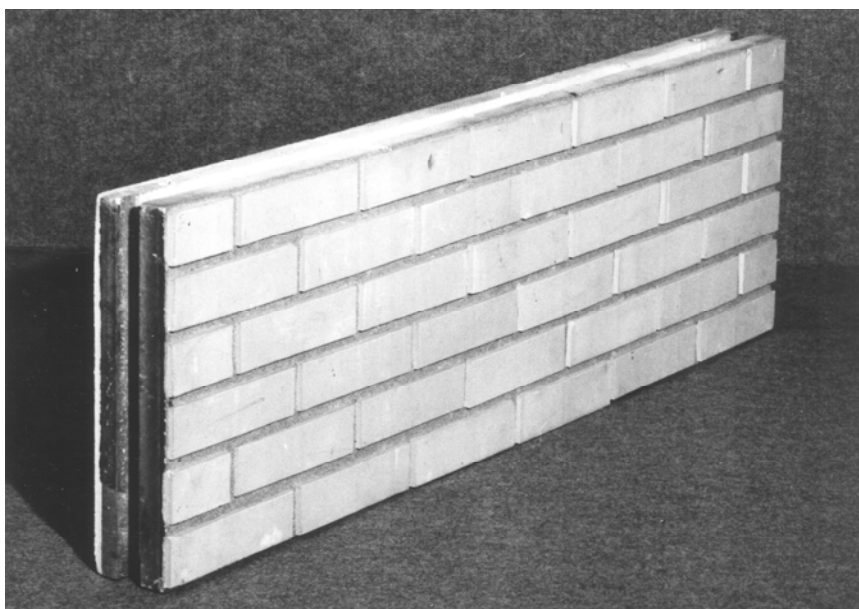
Plně automatizované a počítači řízené linky na kontinuální výrobu sendvičových panelů patří k nejdokonalejším zařízením průmyslu stavebních hmot. Princip výroby spočívá v tom, že tekutá směs reaktivních látek je v předpěněném stavu rozprostírána na spodní část obvodového sendvičového pláště, kde volně stoupá, až dosáhne horní desku pláště a to těsně před tím, než dojde k finálnímu vytvrzení. Na běžícím pásu vychází pak výrobek do

speciálně upraveného hydraulického lisu, který mírným přitlakem zajišťuje požadovanou tloušťku jádra a v konečné fázi je sendvičová deska rozřezána na díly s předem určeným modulem (Obr. 8.4, 8.5).



- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. zásobovací naviják | 7. vytápěná podložní stolice |
| 2. napínací zařízení | 8. horní pás dopravníkového lisu |
| 3. spodní obkladový materiál | 9. spodní pás dopravníkového lisu |
| 4. horní obkladový materiál | 10. infračervené zářiče |
| 5. míchací hlavice | 11. plovoucí deska |
| 6. reaktivní směs | 12. fixní ocelová deska |

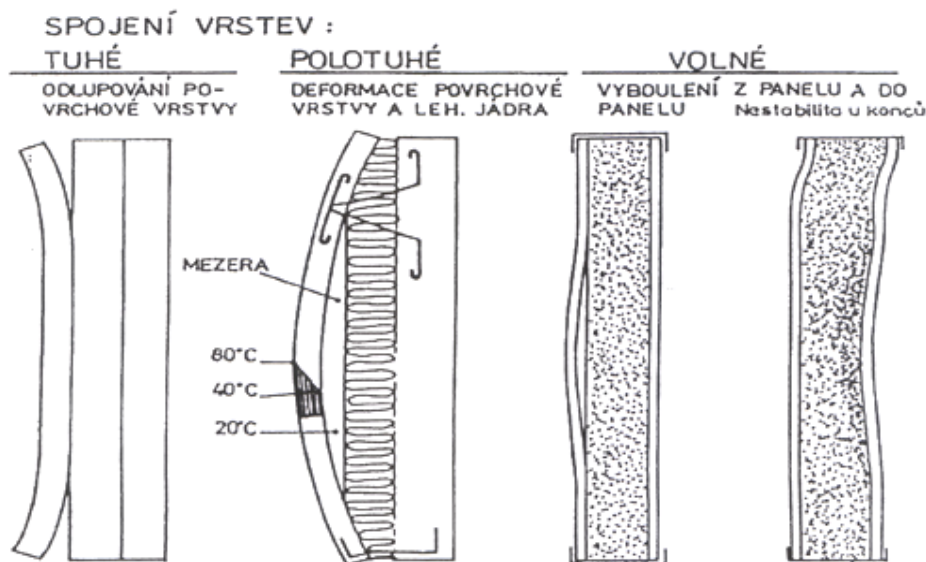
Obr. 8.4 Schéma linky na kontinuální výrobu sendvičových panelů.



Obr. 8.5 Sendvičový panel z kontinuální výrobní linky.

Nejnáročnější na celém výrobním procesu je přesné řízení teploty podložní stolice. Je totiž nezbytně nutné, aby došlo k plné expanzi pěny, avšak jen k částečnému vytvrzení pěny a zachování lepivosti pro spojení s horní deskou pláště.

Materiálová různorodost sendvičů a příkrá změna vlastností po průřezu sendvičového panelu činí nejen technologické problémy při výrobě, ale i značně omezuje i oblast použití ve stavební praxi (Obr. 8.6). Proto v současné době vedle výzkumu nových typů pěnoplastů, jakými jsou na příklad **polyvinylétery** s vyšší tepelnou odolností, jsou vkládány hlavní naděje do **jednosložkových integrálních pěnových hmot**.



Obr. 8.6 Základní typy sendvičových stavebních prvků a jejich závady.

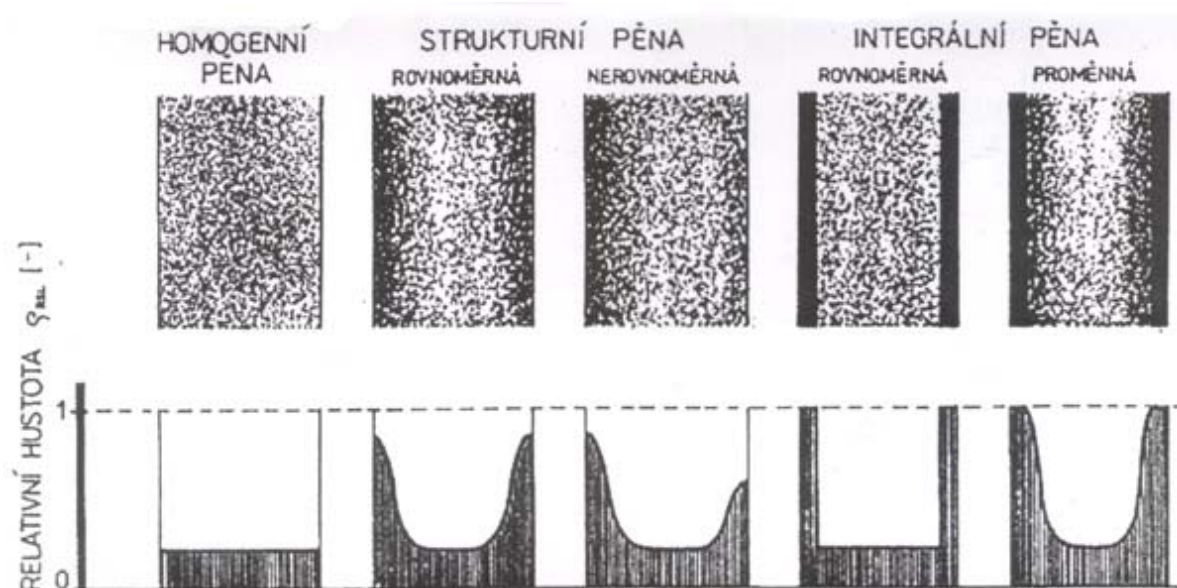
8.5 Konstrukční pěny

Z pohledu materiálového inženýrství byl zásadním obratem vynález technologických postupů výroby **strukturních a integrálních pěn**. Tyto materiály jasně dokumentují souvislost mezi změnami struktury a vlastností hmot.

Strukturní pěny představují skupinu materiálů vyrobených ze směsi hmot v tekuté formě a nadouvadla, u nichž po ztvrdnutí póry ve vzniklém jádře přechází pozvolna do kompaktní vrstvy na povrchu. Povrchová vrstva (krusta) není zcela kompaktní, ale obsahuje mikropóry, které vlivem ochlazení formy již neměly možnost expandovat. Tloušťka krusty je závislá na postupu výroby, rychlosti ochlazování formy, tlaku plynu ve vznikajících pórech, teplotě výchozí soustavy základní složky a nadouvadla atd.

Integrální pěny mají rovněž porézní jádro, avšak na povrchu je kompaktní - integrální krusta vytvořená buď koextruzí výchozí směsi bez nadouvadla z jiného zdroje, nebo je jádro z jednoho typu materiálu a krusta i z jiného typu hmoty s vyššími mechanickými parametry.

V tomto smyslu se podobají sendvičům. Zásadní rozdíl je však v tom, že jsou vyráběny v jedné pracovní operaci.



Obr. 8.7 Schematické znázornění typů konstrukčních pěn.

Vlastnosti konstrukčních pěn jsou dány druhem výchozí hmoty, stupněm napěnění, rozdělením velikosti pórů po průřezu prvků a poměrem tloušťek krusty a jádra. Všechny tyto parametry lze ovlivnit množstvím a druhem použitého nadouvadla, teplotním režimem při výrobě a konstrukcí formy.

Základním problémem při popisu vlastností je, že se využívá převážně při výrobě tvarovaných konstrukčních prvků a hodnocení musí vycházet z daného tvaru prvku. Stanovení mechanicko-fyzikálních parametrů konstrukčních pěn prvku standardního tvaru - desky, nevystihuje plně výhody těchto materiálů a srovnání mechanických parametrů s prvky z neporézních materiálů nebo normálních pěn má pouze informativní charakter (viz Tab. 8.4).

Tab. 8.4 Poměr tuhost/hmotnost u prvků z konstrukčních pěn a lehkých kovů.

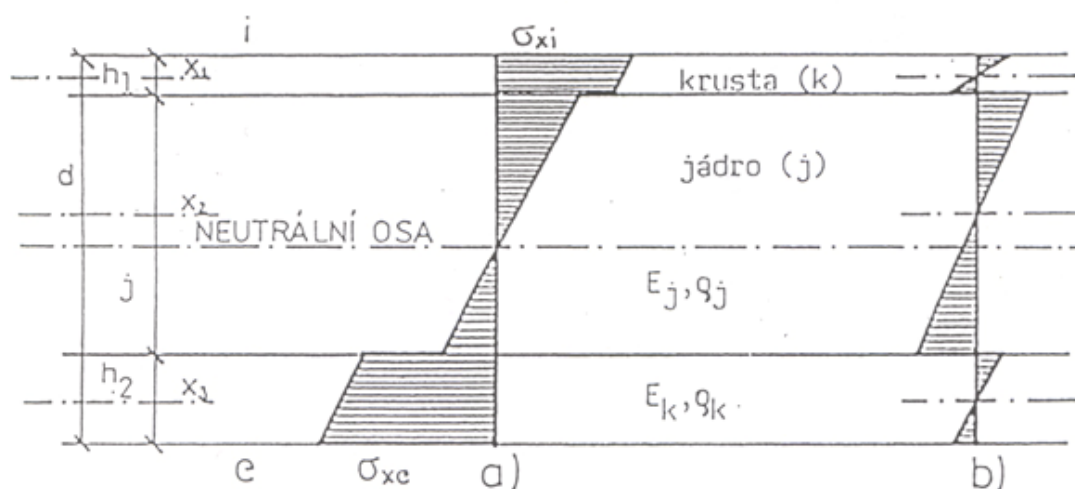
Vlastnost	KOVY slitiny hliníku	KONSTRUKČNÍ PĚNY			
		polyfenylenoxid	polykarbonát	polyester	polyuretan
Tuhost/hmotnost	1	4,8	14,9	6,1	9,0
Pevnost v ohybu/ hmotnost	1	0,95	2,3	1,6	2,2

Ekvivalentní tloušťka	1	3,4	2,1	3,2	3,1
-----------------------	---	-----	-----	-----	-----

Strukturní a integrální pěny jsou z konstrukčního hlediska speciálním typem sendvičů. Technologické postupy umožňující vyrábět konstrukční prvky v jedné pracovní operaci vyřešily hlavní problém provázející sendviče od samého vzniku, tj. kvalitní spojení pláště s jádrem. U klasických sendvičů stykové plochy vrstev nepřenášejí buď žádné, nebo jen smyková a normálová napětí a sendvičový prvek vykazuje velký průhyb při všech druzích zatížení.

Ideální sendvičový prvek by měl splňovat dvě základní podmínky:

- pevnost spoje na rozhraní daných materiálů by měla být minimálně rovná pevnosti lehčené hmoty tvořící jádro,
- vlastnosti systému po průřezu prvku by měly být proměnné podle průběhu napětí, tj. zjednodušeně vzato, nulová pevnost v neutrální ose a zvyšující se pevnost k povrchu (Obr. 8.8).



Obr. 8.8 Osová napětí v sendvičovém prvku namáhaném v ohybu.

Konstrukční pěny splňují obě podmínky: spoj mezi pláštěm a jádrem v pravém smyslu neexistuje a **fyzikálně mechanické vlastnosti se mění spojitě se změnou objemové hmotnosti** tj. postupně se stupněm napětění hmoty. Stanovení optimálního průběhu objemové hmotnosti je pak otázkou zadání vycházející ze způsobu a stupně zatížení konstrukce. Pro posouzení rovnoměrně zatížených stavebních prvků z konstrukčních pěn je možno vycházet z teorie sendvičových prvků odvozené Wiliamsem. Tuhost T vycházející

z modulů pružnosti (E_k , E_j) běžných pěnových hmot o různé objemové hmotnosti je možno vypočítat z rovnice, která platí pro případ stejné tloušťky krusty na obou stranách prvku ($h_1 = h_2 = h$)

$$T = \frac{b \cdot d^3}{12} \cdot E_k \cdot \left[1 - \frac{E_k - E_j}{E_k} \cdot \left(1 - 2 \frac{h}{d} \right)^3 \right].$$

Je zřejmé, že hlavním faktorem rozhodujícím o vlastnostech a chování prvků z konstrukčních pěn je poměr tloušťky povrchové vrstvy (krusty) h k celkové tloušťce prvku d . Vycházíme-li z požadavku co nejnižší hmotnosti stavebních prvků, je možno technické optimum h/d určit z porovnání vztahů pro tuhost a objemovou hmotnost lehčených hmot. Optima tohoto poměru se pohybují v rozmezí 1/11 až 1/7. Ukazuje se, že při vyšší objemové hmotnosti jádra, kdy dochází k výraznému zvýšení tuhosti z konstrukčních pěn, je třeba podstatně zvyšovat tloušťku krusty, aby bylo dosaženo optimální tuhosti. Toto zjištění má zásadní význam pro technologii výroby konstrukčních pěn.

Volbou rozdělovací křivky hmotnosti po průřezu stavebního prvku, jinými slovy řízením vypěňování hmoty, lze dosáhnout jak statických, tak i tepelně technických parametrů, které vyplývají z funkčních požadavků na prvek. Na rozdíl od tradičního pojetí, kdy se požadovaných parametrů zvolené vlastnosti dosahuje pasivní cestou - zvětšováním rozměrů, vrstvením rozdílných hmot aj. - lze týchž parametrů dosáhnout u strukturních pěn cestou programované volby průběhu křivky objemové hmotnosti.

V současné době nabývá na významu kritérium **energetické náročnosti výroby stavebních hmot**. Podíváme-li se z tohoto hlediska na stávající materiály pak je zřejmé, že energie vložená do jejich výroby není v dalším procesu zpracování na konstrukční prvky vyžita a do značné míry se ztrácí. Technologie výroby konstrukčních pěn tuto energii využívá v procesu napěňování. To je zásadní rozdíl od tradiční výroby stavebních prvků, kdy musíme vkládat další energii (např. při autoklávování) při formování požadovaných výrobků.

9 POLYMERY

9.1 KLASIFIKACE POLYMERŮ

9.2 VZTAH MEZI STRUKTUROU A VLASTNOSTMI

9.3 STRUKTURA A TEPELNÁ ODOLNOST

9.4 STRUKTURA A ODOLNOST PROTI POVĚTRNOSTI

9.5 STRUKTURA A HOŘLAVOST POLYMERŮ

9.6 MODIFIKACE STRUKTURY ZMĚKČOVADLY

9.7 HLAVNÍ UPLATNĚNÍ POLYMERŮ

9.8 VYZTUŽENÉ POLYMERY

9.9 PLASTBETONY

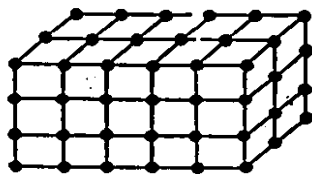
Vynález polymerních plně syntetických hmot a zvládnutí jejich průmyslové ekonomické výroby se považuje za druhý kvantitativní skok v materiálové základně stavebnictví. Struktura plastů je tvořena velkým počtem opakujících se jednotek uspořádaných do lineárního řetězce nebo prostorové mříže. Základními prvky zúčastněnými na tvorbě polymerů jsou uhlík, kyslík, vodík, dusík a síra. U nových typů polymerů se tento počet rozšiřuje o křemík, fosfor, fluor, bór i další prvky.

9.1 Klasifikace polymerů

Polymery rozdělujeme na typy za běžných podmínek tvrdé, které při zvýšené teplotě se mění na tvárné plastické hmoty známé pod souhrnným názvem **plasty**. Podle toho zda přechod z plastického stavu na tuhý je vratný mluvíme o **termoplastech**. Je-li změna stavu při zahřátí nevratná, většinou navíc provázena i změnou struktury způsobenou chemickou reakcí, mluvíme o **reaktoplastech (termosetech)**.

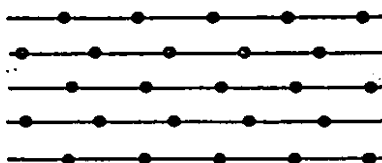
Elastické polymery deformovatelné při normální teplotě již působením pouze malé síly bez porušení a jejichž deformace je převážně vratná nazýváme **elastomery**. Hlavními zástupci této skupiny polymerů jsou kaučuky.

Makromolekulární řetězce mohou být lineární, rozvětvené nebo uspořádané prostorově do síťové struktury (Obr. 9.1a - d).



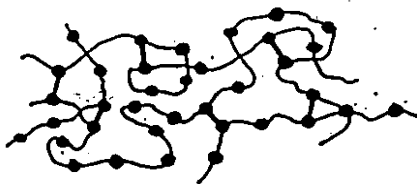
**krystalická mřížka, atomy
vzájemně spojeny chemickou vazbou**

Obr. 9.1a *Uspořádání krystalické struktury kovů a silikátů.*



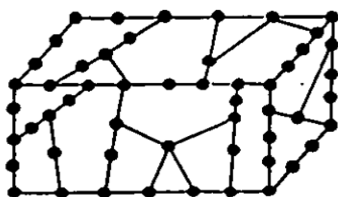
**lineárně vláknité makromolekulární
řetězce vzájemně spojené málo pev-
nými silami fyzikálního charakteru**

Obr. 9.1b *Uspořádání makromolekulárních řetězců termoplastů.*



**lineární, ale v rovině rozvětvené
molekulární řetězce**

Obr. 9.1c *Uspořádání makromolekulárních řetězců elastomerů.*



**trojrozměrné zesíťované makromo-
lekulární řetězce**

Obr. 9.1d *Schematické upořádání makromolekulárních řetězců reaktoplastů.*

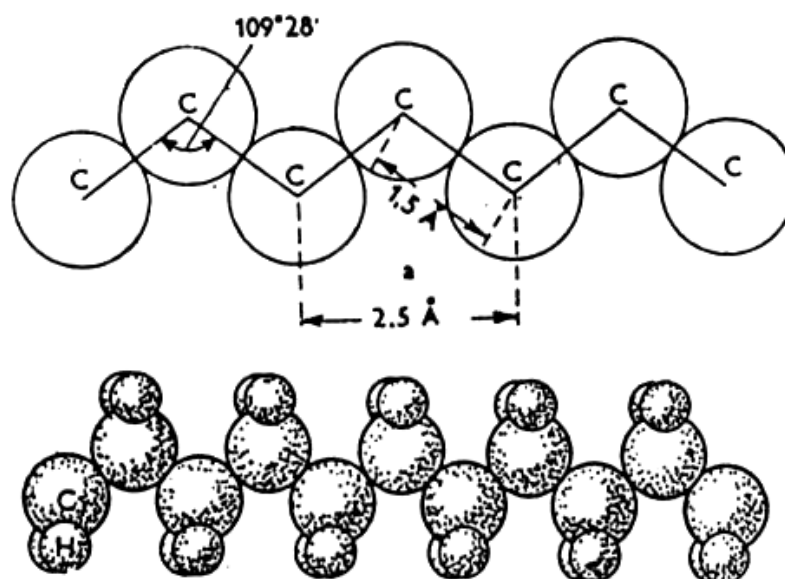
9.2 Vztah mezi strukturou a vlastnostmi

Odlišné chování a vlastnosti plastů jsou odvozeny od jejich struktury tvořené makromolekulami složenými z opakujících se molekulárních jednotek spojených v průběhu vzniku hmot **polymeračními, polyadičními a polykondenzačními reakcemi**. Hmota plastů

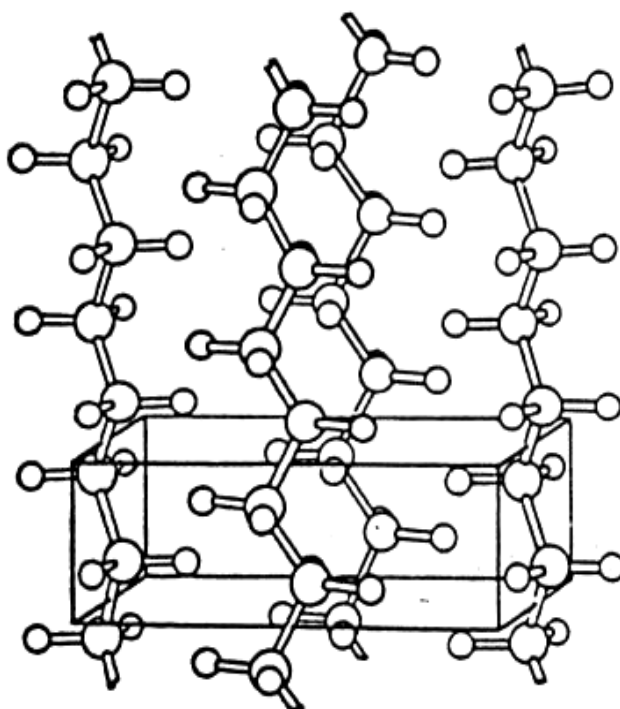
je kompaktní bez pórů (Pozn.: Porozita u silikátových hmot je jednou z určujících pro vlastnosti těchto hmot).

Pro polymery je charakteristický jejich **přechodový stav** mezi sklovitým a kapalným - **stav kaučukovitý**. Polymer lze v tomto stavu malou silou deformovat, takže jej nelze definovat ani jako kapalinu, protože při deformaci nedochází k nevratnému toku, který je charakteristický pro stav plastický - kapalný. Polymery tedy mohou existovat ve čtyřech různých fázových stavech: sklovitém, kaučukovitém, plastickém a krystalickém. O tom, ve kterém stavu se polymer za běžných podmínek nachází, rozhoduje chemické složení a molekulová hmotnost dané makromolekulární látky.

U lineárních a rozvětvených polymerů je dominantní jejich schopnost nebo neschopnost krystalizace. Polymery nekystalizující jsou většinou křehké, dobře zpracovatelné běžnými technologickými postupy. Patří sem polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS), polymethylmetakrylát (PMMA). Polymery se sklonem k samovolné krystalizaci jsou povětšinou termoplastické, vláknotvorné a filmotvorné, pevné a houževnaté. Mají úzkou oblast kaučukovitosti, tj. přecházejí rychle z tuhé fáze do taveniny. Do této skupiny náleží především polyethylen (PE), polypropylen (PP), polyamidy (PA) a polyformaldehyd. Polymery, které krystalizují teprve změnou teploty, nebo působením deformačních sil, mají za běžných podmínek kaučukovitý charakter, jsou termoplastické a elastické. Řadíme sem přírodní a syntetické kaučuky a polyizobutylen.



Obr. 9.2 *Struktura lineárního a krystalického polyethylenu.*



Obr. 9.3 *Struktura krystalického polyethylenu.*

Nejdůležitější vlastností, kterou se makromolekulární látky odlišují od nízkomolekulárních, je **molekulová hmotnost**. Teprve po překročení počtu 40-80 jednotek nabývá makromolekulární látka formy pevné hmoty s pro praxi významnými pevnostmi, přičemž se vzrůstající délkou makromolekulárního řetězce pevnost dále roste (Tab. 9.1).

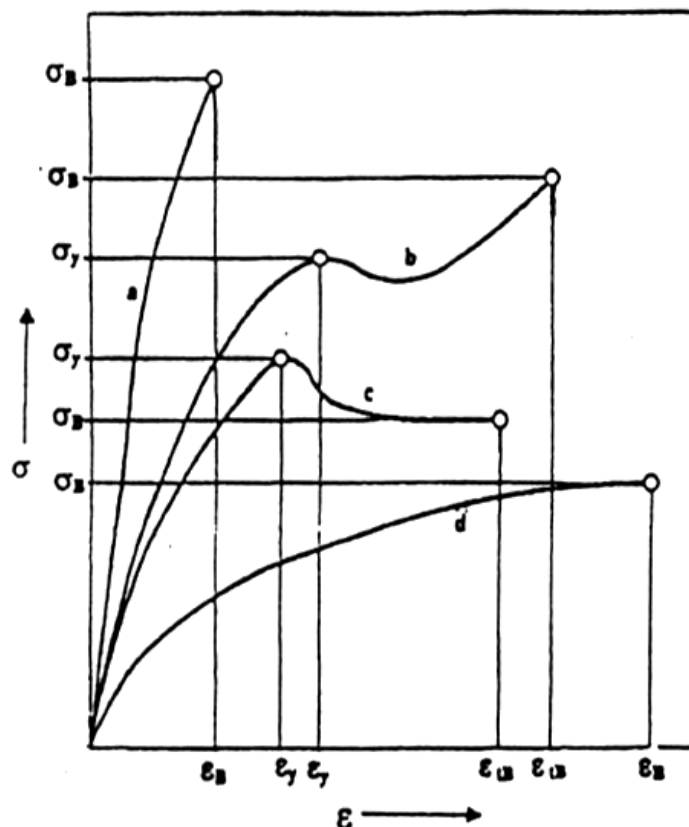
Tab. 9.1 *Srovnání vlastností základních druhů polyethylenu.*

Vlastnost	Nízkotlaký polyethylen	Vysokotlaký polyethylen
Molekulová hmotnost M_w	30.000-300.000	300.000-500.000
Hustota (kg/m^3)	915-935	941-967
Teplota tání ($^{\circ}\text{C}$)	106-112	130-133
Pevnost v tahu (MPa)	7-17	18-30
Prodloužení při přetržení (%)	100-700	100-1000
Modul pružnosti (MPa)	415-795	689-1654
Tvrdost (Sh)	45-60	60-70

Mechanické vlastnosti vyplývají ze vzájemné pohyblivosti makromolekulárních řetězců. Maximálních pevností se docílí takovým strukturním uspořádáním, které při namáhání

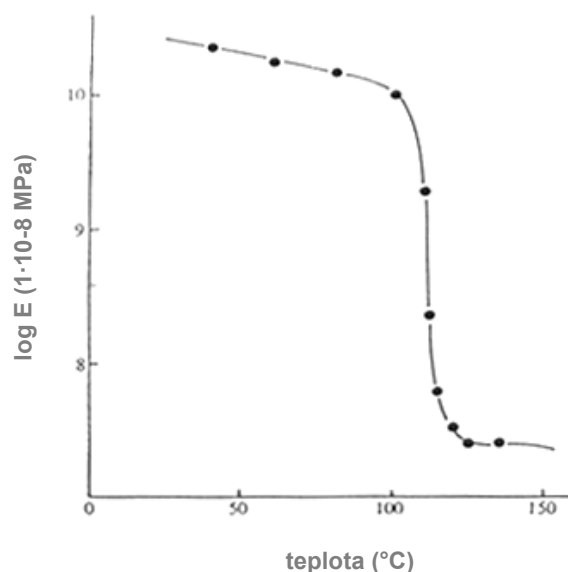
umožní rovnoměrné rozdělení sil při napínání hmoty. Tomu nejlépe vyhovuje vláknité uspořádání makromolekul.

Charakteristické křivky napětí - deformace ukazují zařazení polymerů mezi materiály významnými pro použití v konstrukčních aplikacích (Obr. 9.4). Deformace při zatěžování materiálů na bázi polymerních sloučenin jsou řádově větší, než u všech známých stavebních konstrukčních hmot.



Obr. 9.4 Charakteristické křivky napětí - deformace pro polymerní hmoty, a - křehké hmoty, b - houževnaté hmoty s napětím na mezi kluzu nižším než napětí při přetržení, c - houževnaté hmoty s napětím na mezi kluzu vyšším než napětí při přetržení, d - houževnaté hmoty bez meze kluzu.

Závislost prakticky všech vlastností na teplotě je značná (viz např. Obr. 9.5), což zvláště termoplasty vyřazuje z kategorie konstrukčních stavebních materiálů.



Obr. 9.5 Modul pružnosti jako funkce teploty pro PMMA (plexisklo).

9.3 Struktura a tepelná odolnost

Odolnost polymerů proti působení zvýšených teplot je pro jejich využití ve stavebnictví zcela zásadní. Některé polymery jako na příklad polystyren nebo polymetylmetakrylát (plexisklo) se dokonce vlivem působení deformující síly během měsíců až let nevratně samovolně přetvářejí již při teplotě místnosti. Proto je snaha zvyšovat tvarovou stálost za tepla provedením změn v základním řetězci makromolekul, které mohou omezit pohyblivost řetězců. Postupy, jak toho docílit jsou v zásadě tyto:

- modifikovat strukturu makromolekulárního řetězce zavedením objemných postranních skupin bránících volné otáčivosti kolem vazeb $-C-C-$, nebo polárních skupin vyvolávajících mezimolekulární sekundární vazby mezi segmenty řetězce,
- zesíťováním dosáhnout toho, že polymer netaje ani při vysokých teplotách, ale přímo se rozkládá.

9.4 Struktura a odolnost proti povětrnosti

Povětrnost je komplexním označením souhrnu mnoha faktorů, jakými jsou sluneční záření, kyslík a ozon, střídání teplot a vlhkosti, déšť, vítr a působení atmosférických nečistot. Zásadním nepříznivým faktorem pro trvanlivost polymerů je ultrafialové záření. Největší vliv má UV-záření o vlnové délce 290-400 nm, jehož podíl činí asi 5% z celkové sluneční radiace dopadající na povrch Země. Většina polymerů v procesu průmyslového zpracování vyžaduje

přídavek **stabilizátorů**. K nejdůležitějším stabilizačním metodám patří **reflexe**, tj. přídavek plniv, která jsou nepropustná pro UV-záření a toto odrážejí (např. titanová běloba) a **absorpce**, což je přídavek pigmentů absorbujících sluneční záření škodlivých vlnových délek (např. saze).

Universální stabilizátor pro polymerní hmoty neexistuje a je třeba poznamenat, že účinnost i nejlepších stabilizátorů po určité době klesá. Podle odolnosti proti stárnutí na povětrnosti lze polymery rozdělit do tří skupin. Do skupiny nejlépe odolávajících polymerů patří především fluoroplasty - polytetrafluoretylen (teflon), polyvinylfluorid a dále polymetakrylát a chlorsulfonovaný polyetylen. K dobře odolávajícím polymerů vůči povětrnostním vlivům patří polyesterové skelné lamináty, fenol a melaminoformaldehydové pryskyřice a silikonový kaučuk. Za málo odolné se z nejznámějších polymerů považuje polyetylen, polypropylen, polystyren i polyamidy a polyuretany.

9.5 Struktura a hořlavost polymerů

Hořlavost polymerů je silně omezujícím faktorem při jejich aplikaci ve stavebnictví. Téměř všechny organické polymery jsou za daných podmínek hořlavé a odstranění této skutečnosti je nereálné. Stupeň hořlavosti souvisí se strukturou polymerů. Nejlépe odolávají ty, které spotřebovávají na vznik plynných produktů pyrolýzy nejvíce tepla a při jejich oxidaci se naopak uvolní co nejméně tepla (proces hoření). Úprava struktury **vrůstáním halogenů** (chlór, bróm) je metoda, která do určité míry inhibuje řetězové reakce při hoření.

9.6 Modifikace struktury změkčovadly

Přídavek změkčovadel umožňuje dosažení vysokého stupně pružné deformace (významné pro výrobu fólií a filmů). Změkčováním se snižuje tuhost při normální nebo zvýšené teplotě, zvětšuje míra protažení při přetržení a zvyšuje houževnatost. Vnitřní změkčování, tj. kopolymerace dvou polymerů obvykle reakcí s monomerem, jehož polymer má nízkou hodnotu teploty T_g skelného přechodu (např. PS má $T_g = 100^\circ\text{C}$ + PMMA s $T_g = 8^\circ\text{C}$, kopolymer 60°C). Vnější změkčování (plastifikace) se provádí přidáváním změkčovadel (např. ftaláty) při zpracování pro zlepšení vláčnosti, rázové houževnatosti, tažnosti (např. při výrobě hydroizolačních fólií).

9.7 Hlavní směry uplatnění polymerů

Z obecného hodnocení polymerů jako samostatné skupiny stavebních hmot a z jejich porovnání s tradičními stavebními materiály vyplývá, že jejich využití v praxi je limitováno:

- velkým dotvarováním,
- závislostí pevnosti na teplotě,
- nižší trvanlivostí na povětrnosti,
- hořlavostí.

Polymery mají však některé specifické vlastnosti, které tradiční stavební hmoty postrádají. Jde především o výhodné tepelně-technické parametry, nepropustnost, pružnou deformaci a snadnou zpracovatelnost přímo na stavbě, přičemž dosahují požadovaných vlastností v časově krátkém období. Z tohoto pohledu rozdělujeme plasty do tří aplikačních sfér:

1. plasty pro aplikace konstrukčního charakteru,
2. kompozity plastů a tradičních stavebních hmot,
3. plasty, které díky svým specifickým vlastnostem umožnily podstatné zlepšení stávajících technologických postupů.

Do první skupiny nepochybně patří **vyztužené reaktoplasty** známé v technické praxi pod vžitým názvem **skelné lamináty** (i když jsou dnes i jiná kvalitnější výztužná vlákna než skelná, např. uhlíková). Stejný význam pro konstrukční aplikace mají i **plastbetony**, u kterých tradiční hydraulická pojiva betonů jsou zaměněna za polymerní pryskyřice.

Druhá skupina polymerních hmot je reprezentována **kompozitními materiály**. Kompozity polymerů a tradičních stavebních hmot jsou dnes hlavním směrem rozvoje materiálové základny stavebnictví. Jedná se především o kombinace silikátových a polymerních látek, jejichž proměnné zastoupení ve struktuře umožňuje ovlivňovat (regulovat), a v některých případech i podstatně měnit chování a technické parametry vlastností tradičních stavebních hmot.

Třetí skupina polymerů, které přinesly stavební praxi někdy i revoluční změny v provádění staveb, se stále rozšiřuje. Na první místo je vhodné zařadit **elastomery** uplatněné jako tmely dilatačních spojů v konstrukcích. Dále sem patří hydroizolační fólie znamenající ve své době skutečný posun při řešení problémů spadajících do oblasti rekonstrukčního stavitelství.

Široká je skupina polymerů, které jsou základem pro výrobu nátěrových hmot. Nejčastější aplikace polymerů ve stavební výrobě shrnuje Tab. 9.2.

Tab. 9.2 *Aplikace polymerů ve stavební výrobě.*

Polymer	Příklad použití
Akrylonitril-butadien-styren (ABS)	plošné konstrukční prvky, sendviče, bytové zařízení
Polyacetáty	domovní instalace
Polyakryláty	konstrukční díly, okenní tabule, světlíky, potrubí
Polyethylén (PE)	vodotěsné izolační fólie, potrubí, instalační prvky
Polyamidy (PA)	instalační díly, dopravní pásy
Polykarbonáty	klimatizační zařízení, světlíky, instalační díly, ochranné povlaky
Polyimidy	vysokoteplotní instalace
Polyestery	laminátové konstrukční prvky, střešní díly, nábytek, plastbetony
Polypropylén	vyztužené konstrukční prvky, instalace
Polystyrén (PS)	tepelné izolační prvky, konstrukční pěny, nábytek, sendviče
Polyuretan	tepelné izolace, konstrukční pěny, sendviče
Polyvinylchlorid (PVC)	vodotěsné izolační fólie, dekorační prvky, izolační trubky, konstrukční pěny
Flouropolymery	ochranné povlaky
Epoxidy	tmely a lepidla, ochranné povlaky, laminátové konstrukční prvky, sendviče, plastbetony
Melaminové a močovinnové pryskyřice	dřevolamináty, povrchové úpravy, laky, lepidla
Silikony	laky, impregnace, fasádní nátěry

9.8 Vyztužené polymery

Je zřejmé, že vláknitou výztuž nelze považovat za běžný typ plniv polymerů, ale za složku, která vytváří novou strukturu. Do jaké míry se vyztužením vlákny mění vlastnosti plastů je nejlépe vidět ze srovnání tří nejčastěji využívaných polymerů uvedených v tabulce 9.3.

Tab. 9.3 *Změny vlastností plastů po vyztužení struktury skelnými vlákny.*

Vlastnost	Polyester		Epoxid		Akrylát	
	litý	60% skla	litý	60% skla	litý	60% skla
Hustota (kg/m^3)	1250	1900	1300	2100	1200	1880
Pevnost v tahu (MPa)	85	450	60	550	80	400
Pevnost v ohybu (MPa)	180	620	100	700	180	550
Pevnost v tlaku (MPa)	250	400	100	500	170	400
Rázová houževnatost (KJ/m^2)	5	140	15	240	20	240
Modul pružnosti (MPa)	4000	32000	3500	30000	4500	25000

Z konstrukčního pohledu je významné zvláště podstatné zvýšení tuhosti. Modul pružnosti se řádově liší od původních hodnot plastů před vyztužením. Významný je i příznivý vliv vyztužení na únavu laminátů při dynamickém namáhání. Nelze opominout také snížení součinitele teplotní roztažnosti, který je u laminátů srovnatelný s hodnotami uváděnými pro slitiny lehkých kovů.

Změna vlastností mechanicko-fyzikálních vlastností je odvislá druhu výztužných vláken, jejich obsahu, homogenity a formy v jaké je výztuž aplikována (Tab. 9.4). Se zvyšujícím se obsahem výztuže stoupá i pevnost a modul pružnosti. Maximální podíl výztužných vláken je odvislý od dokonalosti výroby (smočení povrchu vláken a rovnoměrnosti jejich rozptýlení) a homogenitě laminátu. Za mezní hodnotu obsahu vláken se považuje 60 hmot. %.

Tab. 9.4 *Vliv typu výztuže na vlastnosti polyesterového skelného laminátu.*

Vlastnost	rohož	tkanina	roving	vinuté vlákno
Pevnost v tahu (MPa)	170	450	760	1430
Pevnost v ohybu (MPa)	270	620	620	-
Modul pružnosti (MPa)	13000	32000	36000	43000

Výztuž prostupuje polymerní maticí buď ve formě sekaných, nahodile rozložených vláken (rohože), nebo je nosná kostra tvořena pramenci vláken orientovaných ve směru namáhání stavebního prvku (roving), či je tvořena ze samostatných vláken uspořádaných jako tkanina.

Za vrcholnou technologii výroby vyztužených reaktoplastů považujeme vinutí nekonečných vláken za současné impregnace předpolymerem.

Je třeba uvést, že k vyztužování plastů lze použít vlákna přírodní (bavlněná, sisalová, asbestová), chemická (celulosová, polyamidová, polyesterová, uhlíková) a hutnická (ocelová, strusková, skleněná). Z ekonomického hlediska jsou nejvýhodnější skleněná vlákna, ale podstatně vyšší mechanicko-fyzikální parametry mají lamináty na bázi uhlíkových vláken. Podle údajů firmy Union Carbide Corp. epoxidový laminát s obsahem 58,2 hmot. % uhlíkových vláken při tloušťce výrobní desky 3 mm vykázal neuvěřitelně vysoké hodnoty modulu pružnosti v tahu 170.000 MPa a ve smyku 5.000 MPa.

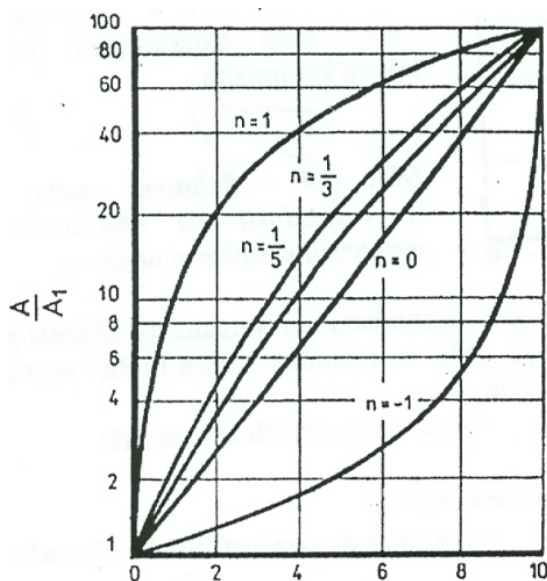
I když vyztužení plastů zvyšuje podstatně tuhost, nesmíme zapomínat, že mechanické parametry těchto materiálů jsou funkcí teploty a času a dlouhodobé hodnoty modulu pružnosti budou zřejmě dosti podstatně nižší. Při komplexním posuzování vhodnosti stavebních hmot nemohou tenkostěnné laminátové prvky nikdy splnit požadavky především tepelně technické a zvukově izolační a jejich užívání bude vždy omezeno na plášťové díly.

9.9 Plastbetony

Vlastnosti plastbetonů obecně závisí na fyzikálních parametrech výchozích složek tj. anorganických plniv a organických pojivech, jejich objemovému zastoupení a strukturním uspořádání ve výsledném materiálu. Pro danou vlastnost A platí základní vztah

$$A^n = A_1^n \cdot \phi_1 + A_2^n \cdot \phi_2, \quad -1 > n < 1$$

kde ϕ_1 a ϕ_2 značí objemové zastoupení výchozích složek ($\phi_1 + \phi_2 = 1$) a n je konstanta, která zahrnuje vliv tvaru částic plniva, povahu interakce složek a morfologii výsledné struktury, tj. strukturní rozložení, orientaci částic plniva a porozitu. Horní mez, kdy $n = +1$, je teoretickou hranicí dokonalého spolupůsobení složek v kompozitní struktuře a platí součtové pravidlo. Tak by tomu mělo být například při výpočtu výsledné objemové hmotnosti plastbetonu. Ani v tomto případě však součtové pravidlo neplatí přesně, protože nelze předem určit porozitu závislou na technologii výroby. Záporná mez kdy $n = -1$ vyjadřuje teoretický protiklad, kdy zvyšováním obsahu složky s vyššími fyzikálními parametry ve směsi by docházelo k poklesu vlastností. K takovéto situaci by snad mohlo dojít v důsledku nežádoucích chemických reakcí výchozích složek. Grafické vyjádření výše uvedeného vztahu ukazuje Obr. 9.6.



Obr. 9.6 Relativní změna vlastnosti A v závislosti na objemovém poměru výchozích složek pro možná n .

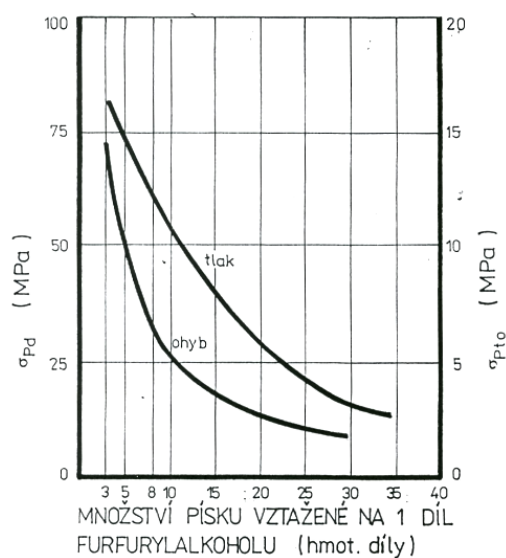
Z vlastností, které mají zásadní důležitost pro stavební hmoty lze s poměrně dobrou shodou s praxí předpovídat modul pružnosti a tepelnou vodivost. Zcela anomální chování vykazují plastbetony při zkouškách pevnostních parametrů, kdy zřejmě určují vliv na naměřené hodnoty má strukturní uspořádání složek a existence, nebo neexistence, chemických vazeb mezi složkami daných typů plastbetonů.

Plastbetony vyrobené z tradičních silikátových plniv a syntetických termoreaktivních pryskyřic mají dnes ve stavebnictví již pevné postavení. Podobnost s klasickým betonem je však do značné míry pouze vzhledová. Cementové pojivo je u plastbetonů nahrazeno polymerem, který udílí této stavební hmotě vlastnosti v mnoha směrech rozdílné od vlastností betonů. Nejméně příznivou vlastností většiny plastbetonů je vysoký stupeň dotvarování a změna pevnosti s růstem teploty prostředí.

Z technologického hlediska lze vidět význam plastbetonů především v možnosti:

- zkrácení výrobního cyklu stavebních úprav,
- dosažení vyšších tahových pevností stavebních prvků,
- výroby architektonických dekorativních prvků v široké barevné škále,
- provádění náročných bezespárých podlahových úprav zvláště při rekonstrukcích staveb, možnosti zpracování i méně kvalitních plniv.

Hodnoty všech fyzikálních parametrů jsou u plastbetonů ovlivňovány typem použitého polymeru, ale především poměrem mísení plniva s polymery (viz Obr. 9.7). Mezní obsah plniva z ekonomického hlediska je dán požadavkem, aby kritická objemová koncentrace polymeru byla v souladu s požadavkem dokonalého obalení zrn plniva. Pokud nedojde k plnému pokrytí povrchu zrn daného plniva, zhoršuje se prudce zpracovatelnost čerstvé směsi a po vytvrzení i vlastnosti plastbetonu. Naopak při vysokém obsahu polymerní složky se objevují potíže dané velmi rozdílnými vlastnostmi obou složek plastbetonu (především smrštitivost, teplotní roztažnost). V současné době nejvýznamnější aplikací plastbetonů jsou průmyslové podlahy a stavební prvky odolávající působení agresivních látek (např. velkoprofilové potrubní roury).



Obr. 9.7 Pevnost furanového plastbetonu v závislosti na poměru základních složek ve výchozí směsi.

10 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

10.1 PROMĚNNÉ DEFINUJÍCÍ VLASTNOSTI ČISTÝCH LÁTEK

10.2 ROZDĚLEN KOMPOZITŮ

10.3 VLÁKNOVÁ VÝZTUŽ KOMPOZITŮ

10.4 VLÁKNOBETONY

Cesta k vývoji lepších materiálů znamenala původně hledání mezi stávající materiálovou databází. S rozvojem poznání o struktuře a z ní odvozeného chování materiálů můžeme dnes vytvářet materiály vyšších užitných vlastností, buďto zlepšováním vlastností stávajících materiálů či řízenou výrobou zcela nových materiálů. V souvislosti s rozvojem technologických možností zpracování a výroby materiálů nacházejí v technické praxi stále větší uplatnění **složené materiály – kompozitní materiály** nových vlastností s podstatně účinnějším využitím materiálové hmoty a vložené energie a surovin při výrobě jednotlivých složek kompozitů. Můžeme obecně říci, že převážná většina materiálů, které se v současné stavební praxi používají, patří mezi kompozitní materiály, v závislosti na tom, jakou definici použijeme pro popis kompozitního materiálu.

V odborné literatuře se pro definici kompozitního materiálu nejčastěji používá následující formulace: jakýkoli materiál, který není čistá látka a obsahuje více než jednu složku, může být teoreticky klasifikován jako kompozitní materiál. Ve smyslu této teorie by mezi kompozity patřily téměř všechny přírodní látky a také většina syntetických materiálů. Nedostatkem této definice je, že mezi kompozity zahrnuje jakoukoli směs materiálů, bez označení její specifčnosti, které by ji odlišily od běžných heterogenních směsí. Z tohoto důvodu můžeme výše uvedenou definici označit jako chybnou, neboť jako kompozity klasifikuje většinu materiálů, které však se současnými moderními kompozity nemají nic společného. Pod pojmem kompozity tedy budeme rozumět **heterogenní materiály**, složené ze dvou nebo více fází obvykle rozdílného chemického složení, které se vzájemně liší svými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Kompozity jsou tedy **multifunkční materiálové systémy**, které mají charakteristiky neobdržitelné žádným z jednotlivých materiálů – jsou to **kohezivní struktury**, vytvořené fyzikální kombinací dvou nebo více kompatibilních materiálů, lišících se vlastnostmi a někdy i tvarem. Chceme-li definovat kompozitní materiál z pohledu většího

důrazu na **návrhovou filozofii**, můžeme je popsat jako heterogenní materiály, u kterých se po smíšení materiálů se zcela odlišnými vlastnostmi vytvoří jediná struktura. Jestliže se tyto vlastnosti doplňují, vzniká kompozitní materiál s přídatnými nebo lepšími vlastnostmi, než mají jednotlivé složky samy, nebo smíšené dohromady.

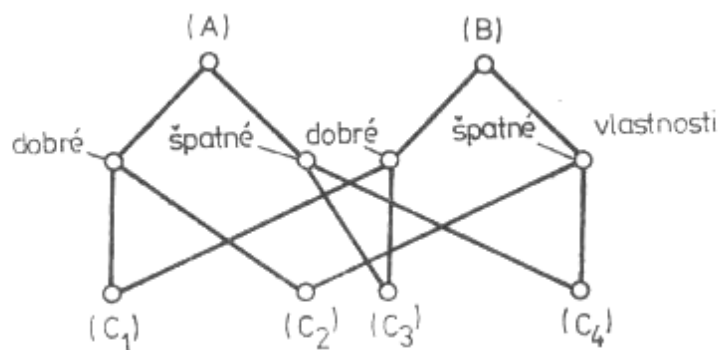
Obvykle je jedna z fází kompozitu spojitá a nazýváme ji **matrice**. V porovnání se zpevňující fází má nižší pevnostní charakteristiky, obecně však má vyšší plasticitu a houževnatost. Nespojitá fáze se nazývá **výztuž**. V porovnání s matricí má obvykle výrazně lepší mechanické parametry (modul pružnosti, pevnost, tvrdost, atd.). Hlavním cílem vyztužení matrice je tedy cílené zlepšení specifických vlastností kompozitů.

Nejznámějším přírodním kompozitem aplikovaným ve stavebnictví je bezesporu **dřevo**. Je tvořeno **celulózovými vlákny** (přenášejí především napětí v tahu) uloženými v ligninu – plní hydrofobní funkci, zpevňuje celulózové molekuly v rámci buněčných stěn a dodává pevnost především v tlaku.

Syntetické kompozitní materiály se vyrábějí **mechanickým mísením** nebo **spojováním jednotlivých složek** – odlišnost od slitin, kde jednotlivé fáze vznikají fázovými přeměnami, např. při tuhnutí. Pro kompozitní materiály je charakteristický **synergismus** – vlastnosti kompozitu jsou lepší, než by odpovídalo poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek a jejich geometrickému uspořádání. Některé vlastnosti částicových kompozitů však můžeme na základě jednoduchých směšovacích pravidel stanovit, například objemovou hmotnost, modul pružnosti apod. Na druhé straně jejich pevnost, tvrdost a další parametry již vykazují synergické působení a není je možné z poměrného zastoupení složek kompozitu určit. Všechny parametry, na nichž závisí výsledné vlastnosti kompozitních (synergických) materiálů souvisí buď s jejich strukturou, nebo mezi-fázovými vztahy (vnitřním povrchem). Jednotlivé fáze kompozitu ovlivňují výsledné vlastnosti materiálu jednak svými vlastními charakteristikami, jednak vzájemnou interakcí, případně interakcí tuhých a tekutých struktur. Tyto **interakce** jsou převážně **fyzikální** nebo **fyzikálně chemické**, nemůžeme však vyloučit ani **chemické** – na fázových rozhraních se může vytvořit nebo může být úmyslně vytvořena **mezifáze** (vnesena např. obalením, pokrytím, chemickou reakcí), jejíž fyzikální vlastnosti mohou být i značně odlišné od vlastností výchozích materiálů.

Snahou při výrobě kompozitů je získat použitím například dvou základních materiálů A a B nejlepší vlastnosti jednotlivých složek, aniž vytvářený kompozit převeze jejich nedostatky.

Při výrobě je tedy nutné dosáhnout toho, aby byly zdůrazněny výhodné vlastnosti složek kompozitu a potlačeny jejich nevýhodné vlastnosti podle potřeb navrhovaného prvku či konstrukce. Při samotné výrobě kompozitu použijeme tedy vhodnou kombinaci materiálů, popřípadě vytvoříme vhodnou mezivrstvu, která by zabránila nežádoucím reakcím na fázovém rozhraní a vzniku křehkých intermediárních fází na rozhraní jednotlivých složek kompozitu. Přenos vlastností jednotlivých složek (fází) do celkových vlastností kompozitu je patrný z Obr. 10.1.



Obr. 10.1 *Přenos vlastností jednotlivých složek (fází) do celkových vlastností kompozitu, převzato z Bareš R. A. 1988, Kompozitní materiály, SNTL, Praha, 325 s.*

Typickým příkladem synergického chování je kompozit složený z keramické matrice (Al_2O_3) vyztužené keramickými vlákny (SiC). Přestože jsou matrice i vlákna samostatně velmi křehké, výsledný kompozit je charakteristický určitou mírou houževnatosti. Toto chování je způsobeno tím, že šířící se lomová trhlinka je bržděna **na rozhraní matrice a vláken**, kde dojde jednak k odklánění směru šíření trhliny a také k intenzivnímu vzájemnému tření mezi maticí a vytahujícími se vlákny. Kvalita rozhraní mezi maticí a výztuží má tedy zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu.

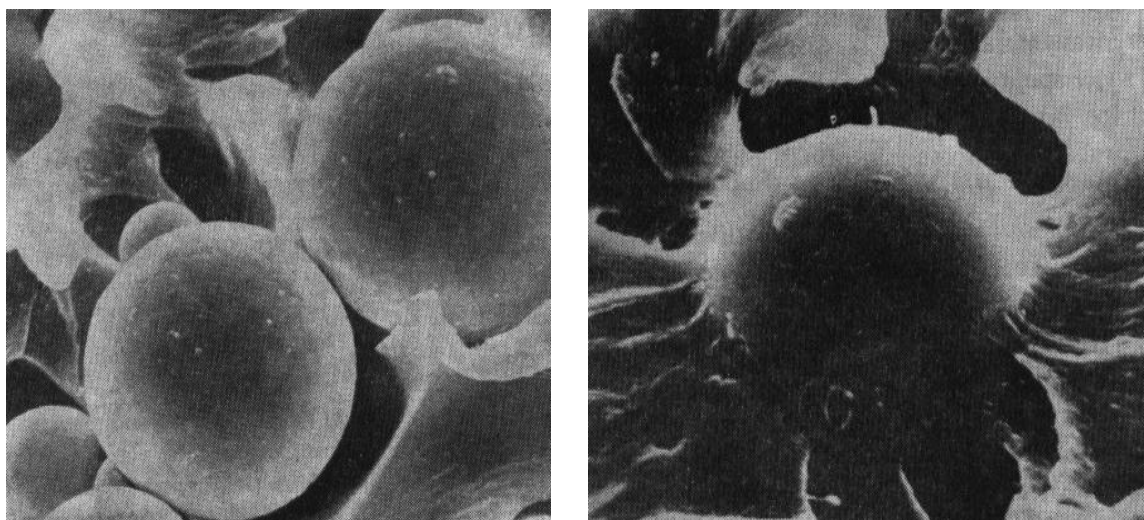
Právě **kontrolu rozvoje trhlin** můžeme považovat za jeden z hlavních přínosů kompozitů. Vláknové kompozity získávají synergickým působením matrice a výztuže výše pospanou houževnatost a rozlišujeme u nich dva mechanismy absorpce energie: část energie je absorbována vytahováním vláken z matrice, druhá část energie je spotřebována na oddělování vláken od matrice v důsledku stáčení vznikajících trhlin podél styku matrice a vláken. Matrice zároveň plní i úlohu ochrany výztuže od vnějšího prostředí a od povrchového poškození.

10.1 Proměnné definující vlastnosti kompozitů

Výsledné vlastnosti kompozitů závisí na celé řadě vnitřních i vnějších parametrů, jejichž vzájemné spolupůsobení definuje chování kompozitu ve specifických podmínkách stavební konstrukce. Mezi základní faktory ovlivňující vlastnosti kompozitu patří:

- vlastnosti fází včetně jejich pórů – mechanické vlastnosti a jejich poměr (pevnost, modul pružnosti, Poissonův součinitel, pracovní diagram, mezní přetvoření), vlhkostní vlastnosti, tepelné vlastnosti, akustické atd.,
- objemové zastoupení fází, jejich geometrický tvar a jejich geometrické uspořádání v systému včetně pórů (množství, orientace a průměrné vzdálenosti dispergované fáze),
- interakce jednotlivých fází a vlastnosti jejich styku – schopnost přenosu zatížení z matrice m do vyztužujících částic f a naopak (soudružnost na kontaktu fází), soudružnost je do značné míry ovlivněna poměrem součinitele teplotní roztažnosti α (K^{-1}) jednotlivých fází α (K^{-1}), je-li rozdíl $(\alpha_m - \alpha_f) > 0$, je při snížení teploty matrice tažena, je-li rozdíl $(\alpha_m - \alpha_f) < 0$, má vložená fáze snahu oddělit se od matrice, velký vliv mají také viskoelastické vlastnosti fázového rozhraní a anizotropie vlastností vložených částic (např. uhlíková vlákna mají součinitel teplotní roztažnosti ve směru vláken $\alpha = 0$, kolmo na vlákna $\alpha = 8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$),
- interakce s okolním prostředím – do značné míry závisí na předcházejících parametrech,
- historie materiálu i fází od jejich vzniku – časové faktory, technologie výroby, změna vlastností vlivem změny teploty, vlhkosti, rychlost změny vnějšího prostředí, okolní podmínky.

Při bližším zkoumání kompozitů je nutné zohlednit i další vlivy, například že pevnost závisí na délce vlákna, na průměru vláken, na smykové pevnosti matrice, velikosti kompozitního tělesa a na typu vláken. Velikost koncentrace napětí na hranicích závisí na objemovém poměru fází, na poměru modulů pružnosti, Poissonových součinitelů a na způsobu vnějšího namáhání. Pokrytím inkluzí vazebným činidlem je možné snížit napětí na styku jednotlivých fází a tím zvýšit soudružnost (zvýšení kompatibility) mezi jednotlivými složkami materiálu (viz Obr. 10.2).



Obr. 10.2 *Povrch skleněných kuliček v epoxidové matrici bez vazebného činidla a po aplikaci vazebného činidla, převzato z Bartkus E. J., Kroekel C. H. 1970, Low shrink reinforced polyester system, Polyblends and composites, New York, 113 s.*

Úpravou mezifázové reakce se obvykle (vedle zvýšení soudružnosti) sníží i pevnost substrátu. Je proto nezbytné omezit chemické reakce na mezipovrchu fází tak, abychom získali maximální zvýšení soudružnosti při minimálním znehodnocení substrátu. Jelikož problematiku kompozitů je z materiálového hlediska velmi složitá zavádějí se často v technické praxi jejich **specifické vlastnosti**:

- specifická pevnost (poměr pevnosti k hmotnosti),
- specifický modul (poměr modulu k hmotnosti),
- specifický vnitřní povrch (poměr kontaktních povrchů k objemu dispergovaných částic),
- například i cena (nebo spotřeba energie) za jednotku specifické vlastnosti apod.

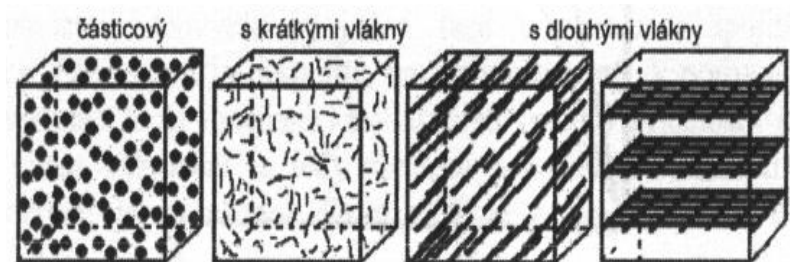
10.2 Rozdělení kompozitů

Jelikož vlastnosti kompozitních materiálů určuje celá řada faktorů, můžeme je klasifikovat podle řady parametrů, například dle tvaru výztuže, typu výztuže, uspořádání výztuže a makrostruktury, typu matrice, technologie výroby atd. Podle geometrického tvaru výztuže dělíme kompozity na:

- **kompozity částicové** - jeden rozměr útvarů výztuže nesmí výrazně přesahovat ostatní, vyztužující částice mají tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý případně nepravidelný,

- **kompozity vláknové** - útvary výztuže (vlákna) jsou v jednom směru výrazně rozměrnější než v ostatních směrech.

Podle délky vláken můžeme dále rozlišovat kompozity s **krátkými vlákny**, u kterých je délka vláken výrazně menší v porovnání s velikostí výrobku a kompozity s **dlouhými, kontinuálními vlákny**, kde je délka vláken srovnatelná s rozměry výrobku. Uspořádání kontinuálních vláken má řadu variant (Obr. 10.3). Vlákná mohou být uspořádána v jednom směru, spletena do rohoží, čímž se vytvoří vrstevnatá struktura kompozitu apod.



Obr. 9.3 Rozdělení kompozitních materiálů podle geometrického tvaru výztuže, převzato z Kratochvíl, B., Švorčík, V., Vojtěch D. 2005, Úvod do studia materiálů, VŠCHT v Praze, Praha, 190 s.

- **vrstvené – sendvičové kompozity** - tvořené dvěma, popř. více vrstvami (lamelami) s rozdílnými vlastnostmi, často slouží vrstvené kompozity ke zlepšení odolnosti proti korozi při zachování nízké ceny výrobku, vysoké pevnosti nebo nízké hmotnosti, používají se také v aplikacích, kde je požadována vyšší odolnost proti mechanickému opotřebení, zejména proti abrazi, použití při zlepšení vzhledu povrchové vrstvy, příp. získání nestandardních charakteristik teplotních vlastností (např. roztažnosti).

Hlavním určujícím faktorem vlastností kompozitu je jeho tzv. **superstruktura** (nadstruktura). Toto označení se používá k odlišení od struktury fází, která ovlivňuje vlastnosti materiálu zejména na vnitřním rozhraní fází. Základním hlediskem pro hodnocení superstruktury je určení, je-li dispergovaná fáze vložená do matrice **segregována**. To znamená, že jednotlivé složky této fáze nejsou v přímém kontaktu, díky čemuž je v některém směru **fázově nespojitá**. V případě, že je dispergovaná fáze **agregována** (jednotlivé její součásti jsou

v přímém kontaktu) může tvořit vlastní vnitřní strukturu a je **fázově spojitá**. Z pohledu superstruktury pak rozlišujeme kompozity I., II. a III. typu.

Kompozity dále můžeme dělit podle typu matrice:

- kompozity s kovovou maticí (metal matrix composites MMCs),
- kompozity s polymerní maticí (polymer matrix composites PMCs),
- kompozity s keramickou maticí (ceramic matrix composites CMCs),
- kompozity se silikátovou maticí (silicate matrix composites SMCs).

10.2.1 Kompozity s kovovou maticí

Použití kovové matrice má proti nejčastěji používané polymerní matici řadu výhod: elektrická vodivost, teplotní vodivost, nehořlavost, smyková pevnost, tvárnost (zpomalující mechanismus rozvoje trhlin), odolnost proti obrusu, možnost povlakování, spojování, tvarování, vyšší tepelná odolnost, odolnost erozi a povrchovému poškození. Nejvýznamnějšími zástupci jsou lehké slitiny hliníku (případně hořčíku a titanu). Jako výztuž kovových maticí se nejčastěji používají bórová, uhlíková nebo křemíkokarbidová vlákna. Matrice může být vytvářena z prášku (např. plazmové nanášení), fólie (lisování za tepla, válcování), popř. taveniny (infiltrace, lití). Výrobní postup je třeba volit tak, aby došlo k dokonalému smíšení matrice s vlákny bez jejich mechanického poškození, degradace, zkřehnutí matrice, s dostatečnou soudružností ve styku matrice – vlákna a matrice – matrice. Postup při výrobě je obvykle dvoufázový – nejdříve se vyrobí jednoduché tvary (např. jednovrstvá páska) a následně se vytvářejí složitější žádané struktury. Kvalita a vlastnosti těchto typů kompozitů závisí značně na výrobních metodách – vliv na pórovou strukturu, poruchy vláken, promísení, soudružnost. Například modul pružnosti hliníkových slitin s 50ti % objemem jednosměrně uspořádaných bórových vláken je v podélném směru 140 – 320 GPa a v příčném směru 85 – 250 GPa. Na výsledné pevnosti hliníkových kompozitů má vliv i rychlost zatěžování, přičemž při rychlejším nárůstu zatížení dochází k vyššímu nárůstu napětí ve vláknech než v matici (5 – 6x). K dosažení vysoké rázové pevnosti hliníkových slitin s kovovými vlákny je nutné, aby matrice byla tvárnější a umožnila dostatečnou disipaci energie smykovými deformacemi a vícenásobné přetržení (příp. protažení) vláken. K rázové pevnosti vláken přispívá i použití vláken většího průměru. Výhodnou se jeví také možnost využití hybridizace kombinováním oblastí s maticí s nízkou a vysokou smykovou pevností – možnost dosažení vysokých statických pevností kompozitů.

10.2.2 Keramické matrice

Keramické matrice kompozitů jsou materiály lehké a tvrdé, většinou však křehké. Keramické matrice jsou atraktivním materiálem pro svou vysokou pevnost při vysokoteplotních aplikacích a odolnost proti oxidaci. Pro aplikaci v keramické matici jsou použitelná pouze některá vlákna – vznik nekoherentního styku mezi maticí a vlákny – trhliny se šíří především podél vláken než přes ně. Pokud vlákna mají vyšší tepelnou vodivost než matrice, mohou zlepšit odolnost proti teplotnímu šoku. Pro matici odolnou vyšším teplotám se používají oxidy, nitridy nebo karbidy různých prvků (nejčastěji Al, Si, Mg) – např. mulit, Al_2O_3 , ZrO_2 , sklo, grafit. Pro vlákna je vhodný molybden, wolfram, případně niob. K vyztužování keramické matrice se mohou použít také **whiskery**, což jsou svou podstatou tenké monokrystaly o průměru $< 1 \mu\text{m}$ a délky 10 – 80 μm . Mají vysoké pevnosti v tahu, které si zachovávají do vyšších teplot než vlákna. Použití whiskerů v kompozitních materiálech je obecně méně časté z důvodu jejich složitější výroby a podstatně vyšších nároků na bezpečnost práce při jejich použití.

Zpevnění keramické matrice je závislé na poměru délky vláken l k jejich průměru d a na jejich objemu. Poměr l/d by měl být optimálně > 50 . Obsah vláken (případně výztužných whiskerů) by měl být v rozsahu 30 – 50 obj. %. Je důležité, aby mezi keramickou maticí a výztuží nedošlo k chemické reakci, neboť chemickou reakcí by mohlo dojít k poškození výztuže. Je-li koeficient teplotní roztažnosti vláken nebo whiskerů vyšší než součinitel teplotní roztažnosti matrice, může dojít při vyšším teplotním zatížení k úplnému oddělení vláken od matrice, takže adheze podél hranice fází je nulová. Na druhé straně součinitel teplotní roztažnosti vláken nesmí být ani příliš malý, neboť rovnoběžně s vlákny mohou vzniknout vysoká tahová napětí, která vedou až ke vzniku trhlin. Hlavním přínosem vyztužení keramické matrice vlákny je zvýšení její houževnatosti.

10.2.3 Silikátové matrice

Kromě výše zmíněných kompozitních matic lze vyztužovat také matrice založené na hydratačních produktech anorganických pojiv. Konkrétně se jedná o materiály na bázi cementové pasty, malty, betonu a sádry. Jak jsme uvedli v kapitole č. 6, týkající se struktury a vlastností betonu, je matrice na bázi portlandského cementu silně alkalická, což ve svém důsledku způsobuje korozi většiny skleněných vláken. Z tohoto důvodu musí být výztužná vlákna buď chráněna, nebo se používají speciální typy alkalicko-odolných skel. V sádrové

matrici jsou skleněná vlákna obvykle pokryta polyvinylacetátovým povlakem, který zvyšuje soudružnost s matricí (smyková pevnost styku se poté pohybuje v rozmezí 1 – 7 MPa). Množství vláken musí být obvykle menší než 6 obj. %, aby nedošlo k neúnosnému zhoršení zpracovatelnosti. V Tab. 10.1 jsou uvedeny typické vlastnosti vlákny vyztuženého cementového kamene po 28 dnech (převzato z Bareš R. A. 1988, Kompozitní materiály, SNTL, Praha, 325 s.).

Tab. 10.1 *Vlastnosti cementového kompozitu v závislosti na použitém typu výztuže.*

Vlákna	Objemový podíl (%)	Pevnost (MPa)			Houževnatost (kJ m ⁻²)
		tahová	ohybová	tlaková	
skleněná	6	19	52	52	18
ocelová	2	—	20	60	20
azbestová	9 až 12	18	32	73	2
aramidová (Kevlar)	1,9	16	44	—	17
kámen bez vláken	0	7	13	52	0,1

Vyztužení cementové malty nebo betonu 1% ocelových drátů průměru 0.4 mm, dlouhých 40 mm, přinese zvýšení ohybové pevnosti o 30 – 70%. Vyztužení skleněnými vlákny poskytuje přibližně vzrůst ohybové pevnosti o 20% na každé 1% výztuže. Sádra vyztužená 6% skleněných vláken má téměř stejné pevnosti jako cementový kámen vyztužený sklem, tj. v tahu 18 MPa, v ohybu 35 MPa, v tlaku 40 MPa, houževnatost je však značně vyšší (cca 50 kJ/m² proti 2 kJ/m² bez výztuže). Sklocement je málo odolný vůči působení vody – není to způsobeno pouze chemickým porušením skleněných vláken, ale také tím, že vlhkost podporuje kontinuální růst CAH gelu do mezer ve svazcích vláken – to vede ke zvýšení smykového napětí na rozhraní matrice a výztuže a tím se snižuje houževnatost kompozitu, neboť vlákna se spíše přetrhnou, než vytáhnou.

10.2.4 Polymerní matrice

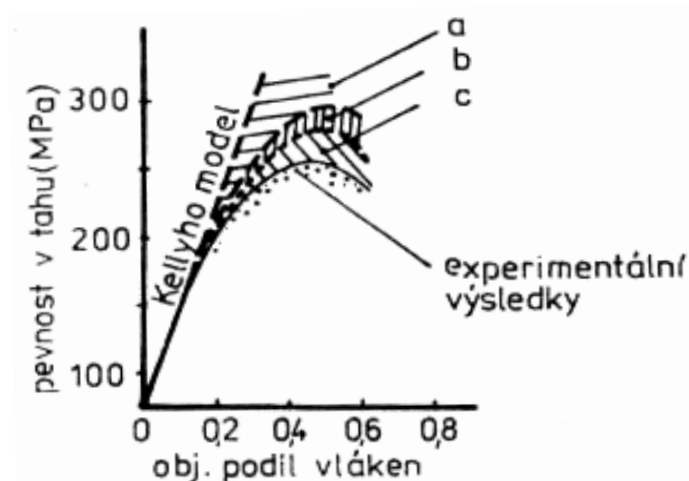
Vláknové kompozity na bázi polymerních matric mají nejdelší tradici (první patent byl udělen již v roce 1916). Podle vlastností i podle výrobního postupu se vlastnosti kompozitů na bázi

polymerních matic výrazně liší podle toho, je-li použitý polymer termoplast nebo termoset (reaktoplast).

10.2.4.1 Termoplastové matrice

Termoplastové polymery pro matrici mohou značně zredukovat cenu kompozitů (o 25 – 80% proti termosetovým, 20 – 50% proti hliníku). Jejich nízká cena je dána snadným způsobem jejich výroby i při složitých tvarech finálních produktů. Další výhody spočívají v poměrně dobré dimenzionální stabilitě, malém obrusu, zvýšené pevnosti, modulu pružnosti a houževnatosti. Pro vyztužení vláken se nejčastěji používají jako matrice polyamidy (nylon), polyethylen, polypropylen, polykarbonát, polysulfon atd. K jejich vyztužení se používají vlákna skleněná, uhlíková, aramidová nebo jejich kombinace (**hybridní kompozity**).

Vlastnosti těchto kompozitů, jež jsou nehomogenní a anizotropní, velmi závisí na postupu výroby (ovlivňuje rozložení vláken, orientaci vláken, distribuci délek, stupeň porušení vláken), na pevnosti a na dalších vlastnostech vláken (např. teplotní vodivosti, roztažnosti, houževnatosti), na povrchové úpravě vláken (vliv na soudružnost vláken s matricí) a na viskoelastickém chování matrice (v závislosti na teplotě). Při větších obsazích vláken (> 40 obj. %) je jejich příspěvek k pevnosti značně redukován zmenšením délky vláken (porušováním při výrobním postupu), náhodným uspořádáním vláken, předčasnou ztrátou soudružnosti (vytváření pórů na konci vláken) a změnou lomového chování (Obr. 10.4).



Obr. 10.4 Mechanismy ovlivňující tahovou pevnost polyamidu vyztuženého skleněnými vlákny, a – zkrácení vláken při výrobě, b – nerovnoměrnost koncentrace a orientace vláken, c – předčasné oddělení vláken během deformace, převzato z Bareš R. A. 1988, *Kompozitní materiály*, SNTL, Praha, 325 s.

Povrchové úpravy vláken (např. termoplasty, termosety – epoxidy, pryskyřice atd.) výrazně zlepšují smáčení vláken a jejich adhezi k matrici – snížení reziduálních napětí na rozhraní fází – zvýšení výsledné pevnosti. Značný vliv na pevnost i tuhost má zvýšená teplota – snížení na 10 – 30% původní hodnoty při teplotách nad 100°C (pokles pevnosti kompozitů s uhlíkovými vlákny je podstatně nižší než u skleněných vláken).

10.2.4.2 Termosetové (reaktoplastové) matrice

Termosety vyztužené vlákny jsou nesporně nejrozšířenější konstrukční kompozity. Zasahují do všech odvětví průmyslu s širokým rejstříkem matricí, výztuží, uspořádání, způsobů výroby a vlastností. Výztužná vlákna jsou buď cíleně uspořádána, nebo náhodně orientována. V poslední době se nejvíce uplatňují vlákna uhlíková, bórová, keramická, kovová, aramidová nebo jejich kombinace. Při aplikaci skleněných vláken není dosahováno dostatečné tuhosti výsledného kompozitu. Pro některé aplikace (zejména z důvodu snížení ceny) se využívají i přírodní vlákna (juta, sisal), nejčastěji v kombinaci se skleněnými vlákny. Matricemi jsou nejčastěji polyesterové, epoxidové, melaminové a siloxylové pryskyřice. Vlastnosti těchto typů kompozitů mohou být značně ovlivněny podle přání konstruktéra. Kromě typu, množství, orientace a délky vláken, typu matrice a kvality mezipovrchu můžeme výsledné vlastnosti kompozitů ovlivnit **kombinací různých druhů vláken** – např. získání optimální tuhosti a houževnatosti synergickým působením uhlíkových a aramidových vláken.

10.3 Vláknové výztuže kompozitů

Pro vyztužování matrice k vytvoření kompozitu je k dispozici široké spektrum vláken, které je stále rozšiřováno. Vedle přírodních vláken z bavlny či celulosy se používají vlákna kovová, slitinová, whiskery z keramických a metalických materiálů, polykrystalická vlákna z různých keramických materiálů, skleněná a minerální vlákna, polymerní vlákna. Materiál vlákna má být pevným tuhý, lehký, má mít vysokou teplotu tání a vysokou hodnotu poměru pevnosti k objemové hmotnosti a poměru modulu pružnosti k objemové hmotnosti. Vlastnosti vyztužujících vláken v závislosti na materiálu vláken jsou uvedeny v Tab. 10.2.

Nejvyšší modul pružnosti mají materiály s nízkým atomovým číslem a s kovalentní vazbou mezi atomy (např. grafit a bór). Mají také vysokou pevnost a teplotu tání.

Pro výztužná vlákna je charakteristické, že jejich pevnost v tahu ve směru osy je výrazně vyšší, než je pevnost stejného materiálu v kompaktní formě (deska, tyč, apod.). Příčiny vysoké pevnosti vláken jsou následující:

- **pokles velikosti a pravděpodobnosti výskytu defektů** (mikrotrhlin, dutin atd.) ve vláknech – z tohoto důvodu se pevnost vláken zvyšuje s jejich klesajícím průměrem,
- orientace defektů ve směru osy vláken – defekty orientované ve směru osy vláken mají výrazně méně škodlivý vliv než defekty orientované kolmo k ose vláken,
- orientace pevných vazeb ve směru osy vláken – tato vlastnost se uplatňuje především u polymerních vláken, u nichž se provádí tzv. dloužení, což je mechanické natahování vláken, při kterém dojde k orientaci polymerních řetězců.

Tab. 10.2 *Vybrané vlastnosti vláknových výztuží.*

Materiál vlákna	Modul pružnosti E	Pevnost v tahu R_m	Hustota $\rho \cdot 10^3$	Pořadí výhodnosti podle kriteria	
	[GPa]	[MPa]	[kg·m ⁻³]	E/ρ	R_m/ρ
Sklo E ¹⁾	70	3 500	2,5	7	3
Sklo S ²⁾	80	4 500	2,5	6	1
Bor ³⁾	450	2 400	2,4	2	6
Uhlík ⁴⁾	385	2 000	1,9	4	5
Uhlík ⁵⁾	200	2 500	1,8	5	4
Ocel	210	2 500	7,8	8	8
Berylium	315	1 300	1,8	3	7
Wolfram	350	2 500	19,0	9	9
Kevlar	120	2 750	1,5	1	2

Pozn.: ¹⁾ Eutektický systém o složení: 62 % SiO₂ - 14,7 % Al₂O₃ - 23,3 % CaO

²⁾ Eutektický systém o složení: 65 % SiO₂ - 25 % Al₂O₃ - 10 % MgO

³⁾ Na wolframové podložce (drátu $\varnothing$ 0,01 mm)

⁴⁾ Vláknó s vysokým modulem pružnosti a se sníženou pevností v tahu

⁵⁾ Vláknó s vysokou pevností v tahu a se sníženým modulem pružnosti

Pro vlákna je rovněž charakteristická **anizotropie vlastností** – pevnost i modul pružnosti bývají ve směru osy vyšší než ve směru kolmém k ose. Z tohoto důvodu mají kompozity nejvyšší pevnost ve směru vyztužujících vláken. Vyztužení vlákny je využíváno zejména ke zvýšení pevnosti, modulu pružnosti (tuhosti) a v některých případech rovněž houževnatosti (odolnost proti křehkému porušení).

Podle typu struktury materiálu lze vlákna dělit na **amorfní** (sklo, křemen, bór), **monokrystalická** (keramická, kovová), **polykrystalická** (keramická, kovová, uhlíková), **multifázová** (amorfní B na C nebo W, karbidy) a **makromolekulární** (organická).

Vlákna můžeme třídit také podle toho, jaké maximální teplotě mohou být vystavena bez jejich vnitřní degradace:

- do teploty 100°C lze použít všechny typy vláken,

- od 100°C do 400°C skleněná, bórová, uhlíková a keramická,
- od 400°C do 700°C uhlíková, keramická a kovová,
- nad 700°C grafitová a keramická.

Je však nezbytné vzít také v úvahu i vliv okolního prostředí, které hraje velmi podstatnou úlohu z pohledu tepelné odolnosti vláken – např. grafitová vlákna odolávají teplotám až do 2000°C, ale musí být dokonale chráněna před oxidací. Bórová vlákna začínají krystalizovat až nad 600°C, ale oxidace a reakce s kovy neumožňuje jejich použití při teplotě nad 450°C. Také u kovových vláken vznikají problémy, když reagují při vysokých teplotách s keramikou.

10.4 Vláknobetony

Vláknobetony představují klasický příklad kompozitního materiálu se silikátovou matricí a rozptýlenou výztuží. Jedná se o speciální typy konstrukčních betonů, u kterých se již při výrobě k běžným složkám přidávají vhodná vlákna plnící funkci rozptýlené výztuže. Pro zajištění optimální funkce je nutné, aby vlákna byla ve struktuře betonu rovnoměrně rozptýlena a nedocházelo tak k vytvoření shluků vláken. V případě homogenního rozptýlení vláken může dojít k výraznému zlepšení vlastností, které jsou u standardních druhů betonů považovány za nedostatky. Je to především vyšší schopnost přenášet účinky tahového napětí a zmírnění křehkého charakteru porušení. Další výhodou vláknobetonu je jeho schopnost odolávat objemovým změnám betonu vlivem smršťování a působení okolní teploty, a to nejen během tuhnutí čerstvého betonu, ale při použití vhodných vláken i po ztvrdnutí betonu.

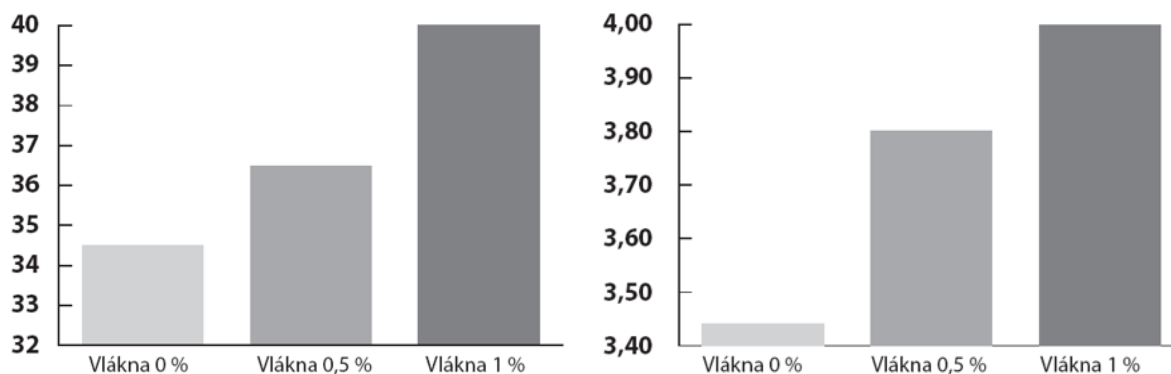
Při návrhu betonu je nezbytné zohlednit vhodnost jednotlivých typů vláken nejen z pohledu jejich materiálové podstaty, ale i s ohledem na odpovídající množství vláken, v závislosti na požadovaných vlastnostech betonu a jeho předpokládaném umístění ve specifických podmínkách konstrukce. Důležitá je také technologie výroby, zejména problém vmísení výztužných vláken do čerstvého betonové směsi. Dle funkce v betonu můžeme výztužná vlákna rozdělit na:

- **ocelová, alkalickovzodorná skleněná, uhlíková vlákna** - vyznačují se dostatečnou pevností, ohybovou tuhostí a vysokým modulem pružnosti, zlepšují pevnost ztvrdlého betonu v tahu (cca o 50 – 100%) i pevnost v tlaku (cca o 10%) – tím se omezuje nebo zcela zamezuje vzniku trhlin, snižují také riziko křehkého lomu ztvrdlého betonu (zvyšují odolnost proti dynamickému zatížení),

- **organická vlákna přírodní nebo syntetická** - charakteristická malou mechanickou pevností a nízkým modulem pružnosti, zvyšují odolnost tuhnutí betonu proti vzniku a šíření smršťovacích trhlin.

Vyztužení betonu vlákny výrazně změní jeho vlastnosti, ale obvykle nemůže konkurovat klasickému vyztužení prutovou výztuží. Z hlediska dosažení trvalých změn vlastností betonu jsou pro vyztužování betonu nejvíce používána ocelová vlákna – drátky (**drátkobeton**). V případě štíhlých nebo tvarově modelovaných prvků se uplatňují i vlákna skleněná – **sklocement**. Zvláštní skupinu představují vláknobetony s extrémně vysokým obsahem vláken – SIFCON (Slurry Infiltrated Fibre Concrete) – shluky obvykle ocelových vláken vyplněné pouze cementovou jemnozrnnou kaší. Vláknobetonové průřezy lze rovněž vyztužovat prutovou betonářskou výztuží a dále tak zlepšovat vlastnosti betonových konstrukcí.

Příkladem vláken do drátkobetonu jsou ocelová vlákna FIBREX, které se vyrábějí v rozměrech 0,4 x 0,6 x 25 mm z ocelových plechů ve dvou pevnostních modifikacích (350 MPa, 450 MPa). Tato vlákna mají obdélníkový průřez, který zvyšuje jejich povrchovou plochu oproti povrchové ploše vláken kruhového průřezu. Díky tomu jsou vlákna pevněji zakotvena ve struktuře betonu a je zabezpečena jejich dostatečná soudružnost s betonem a tím i jejich účinnost. Vláknem v dostatečném množství náhodně rozptýlená ve struktuře betonu mění křehký beton na houževnatý vláknobeton s kvaziplastickými charakteristikami chování po vzniku trhlin. Na Obr. 10.5a, b jsou uvedeny pevnosti betonu v tlaku a příčném tahu v závislosti na obsahu ocelových výztužných vláken.



Obr. 10.5a) *pevnost betonu v tlaku (MPa)*, b) *pevnost betonu v příčném tahu (MPa)*.

11 TECHNICKÉ SKLO

11.1 DEFINICE SKLA

11.2 KLASIFIKACE ANORGANICKÝCH SKEL PODLE SLOŽENÍ

11.3 ZÁKLADY SKLÁŘSKÉ TECHNOLOGIE

11.4 HLAVNÍ TYPY STAVEBNÍCH SKEL A JEJICH POUŽITÍ

Materiály na bázi skla zaujímají v současnosti ve stavebním průmyslu velice důležitou roli. Ještě před sto lety se ze skla vyráběly pouze užitkové předměty. Využití skla v technických odvětvích se omezilo na optický průmysl. S rozvojem vědních oborů jako je astronomie, mikrobiologie, zoologie, botanika, medicína atd. se současně rozvíjel i sklářský průmysl, který zajišťoval složité optické přístroje, levné, praktické a hygienické obaly. S vynálezem žárovky nastal rozkvět vakuové elektrotechniky. Ze skla se vyrábí široká paleta světelných filtrů, signalizační zařízení, optické přístroje a umělecké předměty.

Sklo našlo uplatnění také ve stavebním průmyslu, kde využíváme jeho výhodné vlastnosti jako je malá objemová hmotnost, vysoká pevnost, výborné tepelné a zvukově izolační vlastnosti. Běžně se sklo využívá ve stavebnictví ve formě plochých transparentních tabulí pro zasklívání, na vnitřní glazované přepážky a různé architektonické prvky. Sklo však můžeme použít také jako stavební materiál, např. výplňové nosníky a sloupy, případně jako výztuž proti působení větru ve formě vyztužených skleněných výplní oken a velkorozměrových výloh obchodů. Z odpadního skla se vyrábí pěnové sklo, které se uplatňuje jako lehký tepelně izolační materiál s vysokou pevností v tlaku, např. tepelně - izolační vrstvy střeš, podlah, stěn a podhledů. Jako izolační materiály, podlah a zdí, se používají skelná vlákna. Ze skleněných vláken se také vyrábí výztuže, např. v betonu, tkají se rouna (rohože) a ze skleněných nití tkaniny, např. výroba tapet, promítacích pláten, nehořlavých záclon a opon.

Skleněná vlákna ve spojení s organickými pryskyřicemi, sklolamináty, vynikají pevností srovnatelnou s ocelí, přičemž jsou 4x lehčí. Z těchto výrobků se zhotovují lodě, autokaroserie, cisterny, dílce pro elektrické lokomotivy a nejrůznější průmyslové součástky. Další uplatnění nachází skleněná vlákna ve vláknové optice, v telekomunikační technice, při výrobě tkanin a

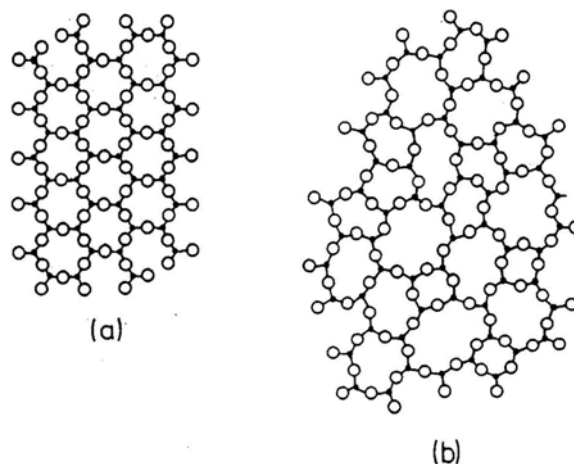
tepelných izolací. Nevýhodou skla je jeho křehkost, avšak pomocí tepelně-chemického zpevnění skleněných výrobků docílíme zvýšení odolnosti i proti ohybu. Z těchto výrobků jsou nejpožívanější bezpečnostní skla do automobilů a letadel. Cestou řízené krystalizace jsme získali skelně krystalické výrobky, které pevností předčí normální skla 4-10x a odolávají i prudkým změnám teploty až do 1 000°C, např. sklokeramické desky. Studium struktury skla umožnilo vyvinout speciální skla, např. fotosensitivní, fotochromní, laserová skla atd. V elektrotechnickém průmyslu se používají skleněné izolátory a polovodivé skelné materiály na bázi sirníků a selenidů arsenu, antimonu, V₂O₅ atd. Vyvinutí speciálních skel odolných vůči působení kyselin a zásad rozšířilo použití skla také v chemickém průmyslu.

Z historického hlediska je sklo velice starý materiál, archeologové našli sklovité glazury na keramice staré 14 tisíc let a doklady o výrobě skla ze 7. tisíciletí př.n.l. v Egyptě. U nás je znalost sklářského řemesla doložena již v 9. století. Nicméně základy sklářského průmyslu byly položeny v Benátkách kolem roku 1300, odkud se znalosti technologie výroby skla šířily po celé Evropě. V polovině 14. století se v Čechách vyrábělo tvarově různorodé a bohatě dekorované duté sklo, skleněná kolečka jako okenní výplň a ploché skleněné panely zdobené malbou. Chemicky se jednalo o draselnovápenatý křemičitan. K dalšímu rozmachu došlo v 17. století, kdy se produkovalo řezané a malované barokní sklo. V 19. století přišel F. Egermann se žlutou a rubínovou lazurou a lithyaliny, Meyrové se sklem barevným a lisovaným. První automat na výrobu lahví sacím způsobem byl uveden do provozu v roce 1907, žárovky se začaly vyrábět v roce 1928. První skleněná vlákna se podařilo vytáhnout v roce 1938, pro přenos signálů byla použita až v roce 1965. Hlavní rozmach tavení skla průchodem elektrického proudu nastal po roce 1952.

11.1 Definice skla

Sklo můžeme definovat jako **amorfní pevnou látku**. Pevnou, protože vykazuje mechanické vlastnosti pevných látek. Amorfní, neboť neexistuje větší molekulární uspořádání než v měřítku několika základních strukturních skupin (viz. Obr. 11.1a, b). Dále můžeme sklo definovat jako vychlazenou kapalinu, která nezkrytalizovala, nebo jako anorganický produkt tavení, ochlazený do pevného stavu, aniž by zkrystaloval. Proto je výstižnější sklo označovat jako stav než jako materiál. Obecná definice skelného stavu podle Fanderlika zní takto: “**Skla jsou látky v amorfním stavu, které jeví při přechodu z pevné konzistence ve viskózně**

plastickou konzistenci a opačně, transformační přeměny.“ S teplotou se tedy mění měrný objem, index lomu atd.

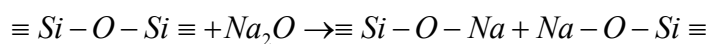


Obr. 11.1 Schematické dvojrozměrné znázornění struktury a) hypotetické krystalické sloučeniny b) skelné formy té samé sloučeniny.

Tvorbu skla můžeme označit jako kinetický jev. Tato skutečnost vede k faktu, že se neptáme, zda chlazením kapaliny může vzniknout sklo, ale **jak rychle** je třeba kapalinu chladit, aby nezkryštovala. Snadnost tvořit sklo definujeme „pomalostí“, s jakou je třeba chladit taveninu, aby vzniklo sklo. Termodynamicky je každé sklo bez ohledu na své chemické složení definováno obecně tím, že jeho struktura není v rovnovážném stavu. Teprve zahřátím nad transformační interval přejde do metastabilního rovnovážného stavu podchlazené kapaliny. Transformační teplota je tedy mezní teplota pro existenci pro skelný stav.

11.2 Klasifikace anorganických skel podle složení

Téměř každá látka, je – li dostatečně rychle chlazená, může vytvářet sklo. Většina látek se však spontánně vrátí do stabilnějšího krystalického stavu. Sklo musí obsahovat **sklotvorný prvek nebo oxid** (tvoří síť) a **modifikátory skelné sítě** (CaO , MgO , BaO , atd.):



Siloxan modifikátor depolymerace skelné sítě

11.2.1 Prvková skla

Prvkovými skly se nazývají skla složená z atomů téhož prvku. Ve stavu podobnému sklu je možné získat síru, selen, arsen a fosfor, dále telur a kyslík. Například roztavená síra při rychlém zchlazení na teplotu místnosti poskytne kaučukovitý průzračný produkt, selen dává

temně zbarvené sklo. Skelný fosfor se získá cestou zahřívání bílého fosforu na 250°C při tlaku > 7 kbar.

11.2.1 Oxidová skla

Hlavní složkou oxidových skel je tzv. **sklotvorný oxid**: B_2O_3 , SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 , As_2O_3 , Sb_2O_3 , tavením s jinými oxidy tvoří dále skla (tzv. sklotvorné oxidy druhého typu, nebo-li podmíněné, sklotvorné oxidy) TeO_2 , SeO_2 , MoO_3 , WO_3 , B_2O_5 , Al_2O_3 , Ga_2O_3 , V_2O_5 . podle hlavních sklotvorných oxidů rozlišujeme třídu křemičitých, boritých, fosfátových a dalších skel. Každá třída se dále člení na skupiny podle doprovodných oxidů typu Li_2O , Na_2O , K_2O , CaO , MgO , BaO , ZnO , CdO , PbO atd.

Zdroje surovin

Podobně jako u cementu, vyjadřujeme chemické složení skla pomocí oxidů. Následující přehled uvádí typické složky skla a jejich původ ve sklářském kmeni.

SiO_2 : přírodní křemenný písk (β – křemen)

CaO , MgO : přírodní jemně mletý vápenec a dolomit (nízké obsahy Fe)

Na_2O : Na_2CO_3 (soda)

K_2O : K_2CO_3 (potaš)

Li_2O : Li_2CO_3

B_2O_3 : H_3BO_3 a borax $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$

BaO : $BaCO_3$

PbO : Pb_3O_4 (minium, suřík)

Al_2O_3 : jako $Al(OH)_3$ kaolinem, nebo živcem

Látky se zvláštními účinky: fosforečnany a fluoridy (zákal), barvicí látky (sloučeniny Cu, Co, Cr, Ni, Ag)

Čeřiva: As_2O_3 , Sb_2O_3 , sírany (sodný, vápenatý a barnatý) a dusičnany (draselný, vápenatý a barnatý).

Střepty: vlastní i cizí střepty se přidávají až v množství 30%, urychlují tavení a šetří náklady na vstupní suroviny.

11.3 Základy sklářské technologie

Podle typu skloviny a požadovaného tvaru a typu výrobku je nutné zvolit správnou metodu přípravy či výroby skla. Technologie oxidových skel zahrnuje sestavení **sklářského kmene**, tavení a čření skla, tvarování skla a řízené tavení. Speciální skla připravujeme i jinými technikami než tavením, např. diaplektická skla jsou připravována působením mechanických šokových vln tlaku asi 40 GPa na krystalický SiO_2 , meteoritická skla. Z plynného stavu se skla připravují metodou nereaktivní depozice a z kapalného stavu metodou sol-gel.

Při výrobě menšího množství speciálních skel nebo pro výzkumné testovací účely se využívá laboratorní tavba skel. Sklovina se taví v keramických (korund, mulit) kelímcích, kelímcích z křemenného skla nebo ze slitiny PtRh v malých elektricky vytápěných pecích. Pece jsou otápěny elementy SiC (do 1 575°C), hlavně však elementy z MoSi_2 , tzv. superkantaly (do 1 800°C). Po utavení se sklo vylévá do bločků, nebo se po rychlém ochlazení z kelímku vyklepne. Pro malovýrobu a výrobu užitných a okrasných skleněných předmětů, např. bižuterie, křišťálová vázy a sklenice, se používá tavení v šamotových pánvích vysokých 50 – 80 cm. Ty jsou v počtu 4 – 12 kusů rozmístěny po obvodu pánvové pece. **Tavicí cyklus** trvá většinou 24 hodin, přes noc se do jednotlivých pánví nadávkuje příslušná vsázka, utaví se sklovina a denní směna pak sklo ručně tvaruje a chladí. Pro velkovýrobu plochého a obalového skla se využívá **kontinuálního tavení skel**. Kmen se nakládá ve vstupu do tavicí pece na hladinu skloviny. Tavicí pece (vany) jsou 10 – 40 m dlouhé, 4 – 12 m široké, vrstva skloviny dosahuje 1 – 1.5 m a bývají vyloženy žáruvzdornými materiály (zejména zirkoničito – hlinitými). Vany mohou být vyhřívány plynem a olejem, ale také průchodem elektrického proudu taveninou pomocí Mo nebo SnO_2 elektrod. Sklovina prochází vysokoteplotní tavicí částí a nízko-teplotní pracovní částí odkud je formována.

Z technologického hlediska lze pochody přípravy a úpravy **sklářské vsázky** rozdělit na míchání s předběžnou homogenizací kmene a na úpravu granulometrie kmene. Kmen se nadávkuje do tavicího zařízení, kde dochází k interakcím pevné a plynné fáze, odchází voda (fyzikálně vázaná do 400°C, chemicky až do 600°C), vyhořívají organické látky, probíhají modifikační přeměny ($\text{SiO}_2 \alpha \rightarrow \beta$ při 573°C), reakce hydrotermální a v pevném stavu za vzniku nových krystalických fází, vyvíjí se plyny H_2O , CO_2 , N_2 . Výsledkem první fáze tavení je tavenina obsahující žáruvzdorné částice a bubliny. V další fázi tavicího procesu se tyto

žáruvzdorné částice rozpouští a dochází k odstranění bublin, **čeření**. Oba děje probíhají současně a vzájemně se ovlivňují.

Další etapou výroby skla je **chlazení**. Jedná se o řízený tepelný děj, při němž se ve výrobku odstraňují nepřípustná mechanická napětí, nebo se vzniku napětí zamezuje. K samovolnému vyrovnaní teplotních gradientů uvnitř výrobku dochází v tzv. chladicím intervalu, který je ohraničený **horní chladicí teplotou** (viskozita taveniny je 10^{13} dPas) a **dolní chladicí teplotou** (viskozita taveniny je $10^{14,5}$ dPas). V důsledku ohřívání skla pod dolní chladicí teplotou vzniká tzv. **přechodné napětí**, vždy takové, že v oblastech s nejvyšší teplotou je tlakové, naopak v oblastech s nižší teplotou je tahové. Na povrchu skla je tedy při ohřívání napětí tlakové, při chlazení napětí tahové. Protože sklo má o řád menší pevnost v tahu než v tlaku, dochází často při ochlazování k prasknutí výrobku. Právě z těchto důvodů je nutné používat **řízené chlazení**, které můžeme rozdělit do několika etap:

1. Ohřátí výrobku (je – li to potřeba) na horní chladicí teplotu.
2. Výdrž na horní chladicí teplotě – minuty až hodiny.
3. Řízené ochlazování v intervalu 10^{13} - $10^{14,5}$ dPas.
4. Rychlejší ochlazení na normální teplotu.

V praxi je pro daný typ skla a výrobků definována tzv. **chladicí křivka**. Pro její výpočet se používají matematické modely a chlazení je řízeno počítačem. Většinou se pro chlazení používají tunelové pece s pohyblivým pásem z kovového pletiva (délka 15 – 30 m, šířka 1 – 3 m), výjimečně komorové pece s nastavitelným teplotním režimem. Na počátku se v peci topí, postupně se teplota snižuje a poslední úsek může být ochlazován vzduchem.

Zvláštní režim se používá pro **chlazení tvrzených skel**, u kterých vhodně rozložené napětí zvyšuje jejich pevnost. Provádí se orientovaným ochlazením proudem vzduchu nebo ponořením do olejové lázně. Na povrchu dojde k vyvolání trvalého tlakového a uvnitř trvalého tahového napětí. Při mechanickém namáhání, např. ohyb, musí vnější síla nejprve překonat povrchové tlakové napětí.

Základními ději při tvarování je tuhnutí skloviny změnou viskozity s klesající teplotou, které je ovlivněno samotným složením skla. Technologie tvarovacího procesu závisí na daném typu skla a na formě, v jaké sklo produkujeme. Tvarování je omezeno rychlostí odvodu tepla, jinak chladnou velké kusy, jinak tenkostěnné sklo, protože při nadměrně rychlém odvodu tepla a velkém napětí při tvarování vznikají ve skle trhliny. Ruční tvarování zaujímá širokou škálu technik od prostých náběrů spojených s tvarováním sklářskou píšťalou až po mnohastupňové ruční postupy. Strojní tvarování se využívá ve velkoobjemových výroбах od tvarování sklenic, lahví, přes tabulové sklo a tažení vláken. Zvláštní místo zaujímají spíše techniky laboratorní pro výrobu optických vlnodů a nanášení skelných povlaků metodou sol – gel.

Dále se budeme zabývat pouze technologiemi a typy skel, které nacházejí uplatnění ve stavebním průmyslu. Podle typu provedení můžeme vyrábět od plochých skel nestejnětlou tloušťky až po skla s výbornou optickou kvalitou a minimem vad, např. automobilová a optická skla. **Plochá skla** se vyrábějí třemi způsoby, jedná se jednak o **Fourcaultův způsob**, kdy se kontinuálně táhne nepřetržitý pás skla z hladiny utavené skloviny. Takto se vyrábí tabule tloušťky 0.8 – 10 mm a šířky kolem 2 m. Tento způsob výroby umožňuje i produkci tzv. sandwichových skel (tři vrstev, uprostřed opálové sklo s vyšší roztažností), ze kterého se formuje domácí nádobí odolné vůči teplotním šokům. Dalším způsobem je **kontinuální liti** proudu skloviny na otáčivé válce a tvarování nekonečného pásu skla. Používá se při výrobě tlustostěnných tabulí a skel s drátěnou vložkou (drátoskla).

Dnes se většina plochého skla vyrábí **procesem Float**, který zavedla jako výsledek dlouhodobého výzkumu firma Pilkington. Proud skloviny je uváděn do jednotky s kontrolovanou atmosférou ($N_2 + H_2$) s lázní roztaveného cínu. Sklovina se roztéká do šíře a tloušťka je výsledkem působení gravitační síly a rychlosti tažení. Obě strany pásu se automaticky vyhladí, spodní stykem s lázní a horní účinkem povrchového napětí. Konečné tloušťky dosahují 2 – 15 mm a šířky až 3 m při průměrném výkonu 1 000 m/h. Výhodou tohoto procesu je vysoká kvalita skla, velký výkon, dlouhodobý provoz a možnost využití dodatečných povrchových úprav, např. Spektrofloat, Electrofloat povrchově obohacené o Cu a Pb (pohlcují část slunečního záření a zabraňují přehřívání prostorů v budovách), IR reflexní skla zabraňují naopak unikání tepla z vytápěných prostor a antireflexní skla jsou důležitá pro sluneční kolektory.

Pro **výrobu trubic** se používají čtyři způsoby. **Daunerův proces**, kdy sklovina natéká na rotující trn (píšťalu) a za současného foukání vzduchu píšťalou a tažení se vytahuje trubice o průměru cca 40mm. Dále se sklovina může táhnout vzhůru přes **dutý žáruvzdorný kužel**, kterým profukuje vzduch. Takto se vyrábí tlustostěnné trubice větších průměrů. Nebo může sklovina vtékat do **kruhové komory**, v níž obtéká formovací kužel, kterým profukuje vzduch. Tento způsob umožňuje výrobu širokého rozmezí průměrů a tloušťky stěn. Posledním způsobem výroby trubic je **Vello proces**, kdy je sklovina tažena přes kužel směrem dolů a ohýbána do horizontálního směru. Takto vyrobené trubice mají vysokou kvalitu. Proces umožňuje změny příčných průřezů a vytváření barevných pásů.

Široké uplatnění našla ve stavebnictví také skleněná vlákna. Nejčastěji se z kuliček skloviny přetavených v PtRh peci vytahuje malými otvory (průměr 3 – 13 μm) ve dnu pece svazek vláken, která se po lubrikaci sdružují do pramene a navíjejí. Skleněná vata pro tepelné a zvukové izolace vzniká litím pramínku skloviny na rotující keramický kotouč, průměr vláken je 20 – 30 μm . Odfukováním vláken z PtRh pece proudem vzduchu nebo páry vzniká stříž pro výrobu filtračních tkanin a izolačních rohoží, průměr vláken je 5 – 12 μm a délka 5 – 30 cm. Mikrovlákna o průměru 1- 3 μm pro speciální filtrační a izolační účely se získávají rozvlákněním primárního vlákna taženého z PtRh pece proudem spalin.

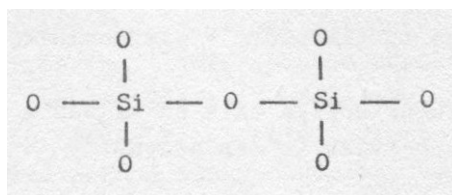
Rozvoj telekomunikační techniky s sebou přinesl i požadavek na výrobu vláken s jádrem. První krok při výrobě optických vlnodů spočívá v přípravě skleněné preformy (obvykle skleněný váleček) s požadovanými vlastnostmi. V druhé etapě se obvykle laserem ohřívá špička válečku a zároveň se vytahuje vlákno. Vlákna se vyrábějí metodou dvojitého kelímku, vlákno se táhne z dvojitého kelímku se dvěma koncentrickými otvory ze dvou tavících se preforem, nebo metodami CVD. Vlákna se v poslední fázi výroby lubrikují polyamidy, akryláty a teflonem. Optické vlnovody nacházejí uplatnění v telekomunikacích, jako senzory, sondy a lasery.

11.3.1 Vlastnosti křemičitých skel

Sklo je pevná, amorfnní, homogenní, zpravidla průhledná látka s malou tepelnou a elektrickou vodivostí, vysokou nepropustností a odolností vůči vzduchu, vodě i chemickým a jiným

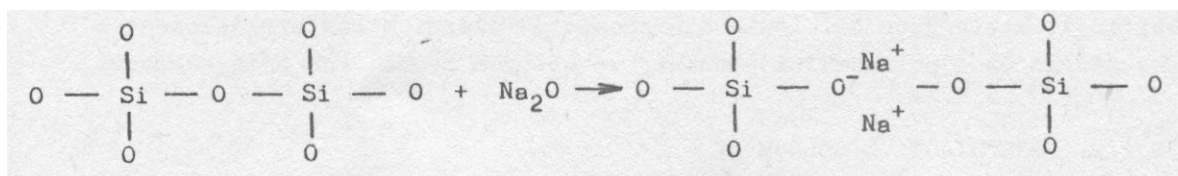
látkám. Sklo nemá pevný bod tání, ale taje v určitém teplotním intervalu daném rychlostí ohřívání. Sklo také vykazuje pružnost pevných látek, avšak pod velkým napětím teče. Můžeme tedy říci, že sklo se vyznačuje krátkodobými vlastnostmi pevných látek s dlouhodobými vlastnostmi kapalin.

V čistém křemičitém skle se nacházejí pouze vazby Si – O (418 kJ/mol), síť sestává z tetraedrů $[\text{SiO}_4]$:



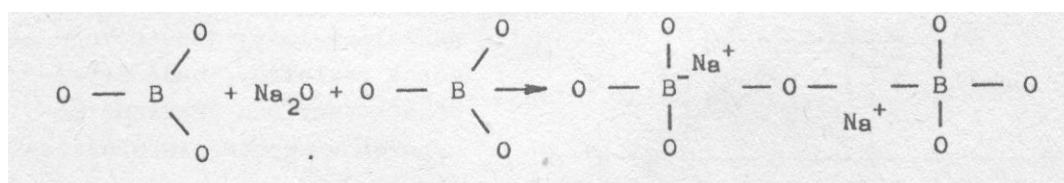
Obr. 11.2 Síť tetraedrů $[\text{SiO}_4]$.

Jestliže se do SiO_2 skla přidá Na_2O , dojde v mřížce ke změnám, které se dají znázornit takto:



Obr. 11.3 Modifikovaná síť sodno-křemičitého skla.

Mřížka se rozštěpí a tím uvolní, čímž dojde tak k oslabení vazby Si – O (209 kJ/mol). Pokud přidáme do skla B_2O_3 , dojde ke změně mřížky, která je poněkud odlišná od změn u křemičitého skla.



Obr. 11.4 Modifikovaná síť sodno-boritého skla.

Střední **součinitel délkové roztažnosti** u skel bývá definován v rozmezí $20 - 300^\circ\text{C}$, jeho velikost závisí na pevnosti vazby. Obecně vazba Si – O je velmi pevná, a proto křemenné sklo a vysoce křemičitá skla mají malou teplotní roztažnost. Vnesením TiO_2 do syntetického křemene bylo získáno sklo s nulovou teplotní roztažností (Zerosil). Teplotní závislost délkové roztažnosti vyjadřujeme **křivkou teplotní roztažnosti**, na které můžeme odečíst

transformační teplotu a deformační teplotu. V teplotě bodu měknutí dochází k deformaci vzorku nebo výrobku, v hodnotě transformační teploty začíná sklo přecházet v taveninu.

Viskozita je vlastností skla silně závislou na jeho struktuře, zejména na stupni jeho polymerace, prostorovém zesíťování a uspořádání strukturní mřížky. Viskozita má mimořádný význam pro průběh technologických pochodů tavicích reakcí a rozpouštění pevných částic, odstraňování bublin a deformaci šlír. Pro sklářskou výrobu je proto průběh viskozity skla v závislosti na teplotě rozhodujícím faktorem. Znalost tohoto průběhu je nezbytná při posuzování vhodnosti skloviny pro daný druh výroby jak z hlediska tavení, tak vzhledem ke tvarování. Metody měření viskozity můžeme rozdělit na absolutní a relativní, a nízko a vysokoteplotní. Relativní metody vyžadují kalibraci viskozimetru látkami o známé viskozitě (oleje, sirupy atd.). Nejužívanějšími metodami k měření viskozity skla při nízkých teplotách je sledování prodlužování skleněného vlákna při určitém zatížení, dále metoda ohybu tyčinky nebo trámečku při známém kolmém zatížení a metoda penetrační, vnikání tělíska (tvaru kužele, polokoule nebo válce) do destičky skla. Při vysokých teplotách se používají v zásadě metody dvě: metoda koncentrických válců (Margulesova absolutní metoda) a metoda zavěšené kuličky (relativní metoda). Všechna tato měření jsou však časově i přístrojově náročná, proto se pro kontrolu viskozitní křivky provádí měření zcela konkrétních viskozitních vztažných bodů, ze kterých po dosazení do empirických rovnic pro vyjádření závislosti viskozity na teplotě můžeme určit konstanty těchto rovnic a tudíž následně zrekonstruovat průběh celé viskozitní křivky.

Při nízkých teplotách se sklo vyznačuje velmi nízkými hodnotami měrné elektrické vodivosti, nachází tedy uplatnění jako elektroizolační materiál v elektrotechnickém průmyslu. Pro praxi je ale velmi důležitá znalost závislosti měrné elektrické vodivosti na teplotě. Při postupném zahřívání skla dochází až k řádovým změnám jeho elektrické vodivosti. Jedná se o vodivost iontovou, kdy se na vodivostní pochod můžeme dívat jako na výměnu místa iontů. Vodivost pak závisí na energii, která je potřebná k odloučení iontů, na počtu iontů a na rychlosti pohybu iontů v elektrickém poli.

Mezi důležité vlastnosti tavenin patří jejich povrchové vlastnosti. Taveniny se snaží minimalizovat svůj povrch. Uvnitř skloviny jsou částice obklopeny okolními částicemi a ze

všech stran na ně působí přitažlivé síly. Na povrchu jsou částice ovlivněny pouze přitažlivými silami částic uvnitř skloviny. Výslednice těchto sil způsobuje, že částice na povrchu jsou vtahovány dovnitř skloviny. Tato výsledná síla je tím větší, čím větší jsou přitažlivé síly mezi částicemi. Povrchové napětí definujeme jako tečnou sílu, působící v povrchu taveniny na úsečku o délce 1m. Rozměr povrchového napětí je N/m. Povrchové napětí provází výrobu skla od samého vzniku skloviny. Je důležité v počáteční fázi tavení, ovlivňuje tvarování, má důležitý podíl na účinnosti různých rafinačních technik, při otavování ostrých hran výrobků atd.

Další důležitou vlastností sklovin je hustota a její závislost na teplotě a chemickém složení. Hustota ovlivňuje technologii tavení a tvoří základ pro poznání struktury sklovin.

U skla stanovujeme chemickou odolnost vůči vodě, alkáliím a kyselinám. Zkouška odolnosti vůči vodě je založena na vyluhování drti skla vroucí vodou za normálních podmínek a nitřního povrchu výrobků za zvýšené teploty a tlaku v autoklávu. Pro zjištění odolnosti skla vůči alkáliím se vzorky skla zahřívají ve směsi 1:1 roztoků NaOH a Na₂CO₃ po 3 hodiny. Odolnost vůči kyselinám se posuzuje při zahřívání vzorků ve vroucím roztoku HCl po 3 hodiny. Při působení vody na sklo dochází k výměně alkalických iontů Na⁺, K⁺, Li⁺ za ionty H⁺ nebo H₃O⁺. Částečně se účastní i ionty Ca²⁺, Mg²⁺ a Ba²⁺. Výsledkem je vrstvička gelu kyseliny křemičité na povrchu skla, která brání další korozi povrchu. Alkálie rozrušují vazby Si – O – Si, dochází k odbourání základní sítě a rozpouštění skla. Před tímto působením není povrch nijak chráněn a koroze pokračuje stále dále. Kyselina na sklo působí podobně jako voda, navíc však dochází k rozpouštění dalších složek skla Al³⁺ a Ca²⁺.

Křemenné sklo má vysokou odolnost vůči vodě, na jeho povrchu se tvoří koloidní H₂SiO₃. Chemickou odolnost silně zvyšují Si, Zr, Ti, Zn, Al, středně zvyšují Mg, Ca a Ba, naopak snižují Na, K a Li.

Stavební sklo má pevnost v tlaku 5x větší než žula, 2 až 3x větší než ocel a 50x větší než pevnost v tlaku betonu.

11.4 Hlavní typy stavebních skel a jejich použití

Nejvýznamnější komerční skla jsou **sodno – vápenato – křemičitá skla**, která jsou levná a chemicky odolná, navíc se dobře taví i formují. Jako minoritní přídavky se používá **Al** pro zvýšení chemické odolnosti a snížení devitrifikace, **B** zlepšuje zpracovatelnost a způsobuje nízkou tepelnou roztažnost.

Tvrzené sklo

Tepelně tvrzené sklo (sklářsky nazývané – kalené sklo) je sklo, u kterého je speciálním řízeným procesem ohřevu a ochlazení vyvoláno **permanentní povrchové tlakové napětí** s cílem značně zvýšit odolnost vůči mechanickému a tepelnému namáhání a zároveň získat předepsané vlastnosti rozpadu. Tepelně tvrzené sklo si získalo své výhradní postavení především v interiéru budov a to díky svému charakteristickému rozpadu po rozbití. Když se řekne **bezpečnostní sklo**, většina z nás si představí rovnou tepelně tvrzené sklo.

Izolační sklo

Izolační skla jsou neodmyslitelnou součástí moderní architektury. Tato skla musí splňovat celou řadu zejména tepelně a zvukově izolační, ale i protipožární kritéria. Izolační skla se skládají minimálně ze dvou a více tabulí skla s pokovem na bázi stříbra a odpovídajícího množství distančních rámečků, 1 - 2. Rámeček je vyplněn vysoušedlem, které zajišťuje suchý vzduch v meziskelním prostoru a zabráňuje nechtěné kondenzaci vodní páry. Meziskelní prostor je podle míry požadavků na izolační vlastnosti vyplněn jedním ze vzácných plynů, Ag, Kr, Xe, nebo jejich směsí. Tloušťka distančního rámečku má podstatný vliv na výsledné izolační vlastnosti, avšak meziskelní prostor větší než 16 mm nemá již vliv na vyšší izolační vlastnosti elementu. Celková tloušťka izolačních skel dosahuje hodnoty až 36 mm. Utěsnění izolačního elementu je provedeno primárním a sekundárním tmelením. Pro tmelení se používá např. polysulfid, polyuretan, UV silikon a další.

Izolační skla v současné době splňují požadavky jako:

1. podstatné snížení energetických tepelných ztrát,
2. ochrana proti slunečnímu záření,
3. zvýšení tepelné pohody uvnitř objektu,

4. zamezení rosení skel,
5. zvukově izolační vlastnosti.

Pochůzné sklo

Jedná se o vícevrstvé sklo, které speciální metodou výroby získá vlastnosti stálé pochůznosti, avšak nesmí být vystaveno dlouhodobému statickému zatížení.

Pěnové sklo

Výroba pěnového skla byla patentována v roce 1936 ve Francii a od té doby prošla spolu s technickými parametry značným vývojem. Od roku 1958 bylo pěnové sklo vyráběno i u nás, avšak v současné době je jediným výrobcem, který výrobu pěnového skla v České republice zajišťuje, příbramská společnost Recifa, a.s., pod značkou REFAGLASS. Společnost se zaměřila i na svoz odpadu, tudíž na rozdíl od svých zahraničních konkurentů může pro výrobu pěnového skla využívat vlastní vstupní materiál. Jedná se o **tepelně izolační materiál**, který je vyrobený ze stoprocentně recyklovaného skla. Výrobní technologie je založena na zpracování odpadových střepek z obalového skla. To je rozdrceno na skelnou moučku s velikostí zrna v průměru 80 mikrometrů a ta je posléze smíchána s chemickými činidly. Po procesu roztavení pokračuje řízené tavení při teplotách 800°C a následné ochlazení. Tím se vytvoří umělé sopečné sklo, pemza, nebo-li pěnové sklo. **Uzavřené póry** jsou naplněny směsí různých plynů vzniklých při výrobě.

Toto sklo stále více nachází uplatnění především pro své vynikající technické vlastnosti. Vnitřní stavba pěnového skla se skládá z malých uzavřených skleněných buněk, které drží pevně u sebe. Díky tomu sklo dokonale zabraňuje prostupnosti chladného či teplého vzduchu z okolí, který by mohl negativně ovlivnit teplotu izolovaných prostor. Výpočtová hodnota tepelné vodivosti pěnového skla REFAGLASS je 0.075W/m² K a specifická tepelná kapacita 850 J/kg K. Navíc sklo obsahuje velké množství skleněných můstků, které mu zaručují vynikající pevnost v tlaku. Únosnost materiálu po ztuhnutí je 0.64–1.3 MPa. Po zatížení zátěžovou deskou při tlakovém napětí 250 kPa si pěnové sklo REFAGLASS sedá o 1–3 mm. Struktura buněk zamezuje absorpci vlhkosti, tudíž nemůže dojít k poškození mrazem. Další nespornou výhodou pěnového skla je jeho nehořlavost. Na rozdíl od extrudovaného

polystyrenu, který je zařazen do třídy hořlavosti C1, se může pěnové sklo pyšnit třídou hořlavosti A1. Bod měknutí pěnového skla je nad 700°C. Z tohoto důvodu je nedostačující polystyren stále častěji nahrazován právě pěnovým sklem, které je navíc odolné vůči chemickým i mechanickým vlivům, jako jsou povětrnostní podmínky, organické a anorganické chemikálie, hmyz, či hlodavci. Stavební firmy ocení i nízkou objemovou hmotnost pěnového skla. Objemová hmotnost sypaného materiálu je jen 150 kg/m³, což představuje 1/10 až 1/20 váhy kamenného štěrku.

Pěnové sklo se může použít ve formě štěrku, nebo desek. Štěrka z pěnového skla je vhodný zejména do spodních částí staveb, jako izolace nádrží (bazény, atd.), lehké drenáže, izolační materiál pod ohřívání nebo ochlazované plochy, nebo jako lehký stavební prvek při stavbě plochých střech. Desky z pěnového skla se používají především na zateplení fasád.

Ploché sklo

Tažené ploché sklo je rovné, hladké a čiré se slabým odstínem do zelena, nebo do šeda. Používá se k zasklívání oken a dveří ve větších tloušťkách. Tažené ploché sklo determinální se vyrábí v tloušťkách 5, 6 a 7 mm o velikosti 1800 x 2000mm. Je schopné absorbovat 45 – 55% infračervených paprsků.

Lité ploché sklo se dodává ve dvou typech. Jako vzorkované sklo, např. valchové, šňůrkové, katedrál tepaný, krepové, plastové, kosočtvercové, hvězdicové, perličkové, tečkované, vláknité, lávové apod. A jako nevzorkované sklo s oběma plochami hladkými nepravidelně nerovnými. Používá se především v interiéru, všude tam, kde má být zamezen průhled, ale zachována světelná propustnost.

Lité ploché sklo válcové s drátěnou vložkou se vyrábí nevzorkované, přičemž je do skla zaválcována drátěná vložka, která při rozbití skla drží sklo v celku.

Ploché sklo tvrzené barevně smaltované se vyrábí tažením i litím; po jedné straně je opatřeno vrstvou barevného smaltu. Tvrzením skla se stává odolnějším a přibližuje se vlastnostmi sklu bezpečnostnímu. Je určeno pro lehké fasádní panely nebo mezi okenní vložky.

Ploché sklo válcové opakní je sklo zabarvené ve hmotě. Je neprůhledné, s vrchní stranou lesklou a spodní stranou rýhovanou. Používá se k obkladům interiéru s exteriérů tam, kde se požaduje omyvatelnost.

Izolační dvojsklo Connex je ploché sklo ze dvou nebo více tabulí s vloženou deskou z polyvinylbutyralu (PVB). Používá se v místech, kde je zvýšené nebezpečí rozbití skla s možností úrazu.

Zrcadlové ploché sklo se vyrábí plavením nepřetržitého pásu skla po hladině roztaveného kovu. Používá se ve školách, nemocnicích apod.

Skleněné tvarovky

Duté skleněné tvarovky se označují jako **stěnovky**. Dodávají se jako uzavřené nebo otevřené duté tvárnice v různých barvách.

Plněné tvarovky se dělí podle účelu použití na:

- **stěnovky** pro vnější i vnitřní použití (příčky, výplně oken atd.),
- **dlaždice** pro krytí chodbových podlah nebo pro stropní rovné i klenbové konstrukce,
- **vlýsky** pro podlahové konstrukce, mají umožnit propouštění světla,
- **kruhové tvarovky** (čočky) mají podobné uplatnění jako vlýsky, dále se používají jako tvarovky pro světlíkové konstrukce.

Skleněné vlákno

Je výborným polotovarem pro řadu výrobků používaných jako tepelně i zvukově izolační materiál. Běžná skleněná vlákna pro elektroizolační účely a lamináty se vyrábějí z bezalkalické skloviny (do 1% Na_2O a K_2O) zvané **sklo E** (Eutal). Agresivní sklovina se taví v kontinuální vanové peci při 1 550°C, vyrábí se přímo vlákna, nebo nejprve skleněné kuličky a z nich se pak táhnou vlákna, např. nehořlavý a filtrační papír. Izolační, filtrační a akustická vlákna neobsahují většinou B_2O_3 , který se přidává místo části CaO pro zvýšení chemické odolnosti. Vlákna do stavebních hmot obsahují ZrO_2 , který zvyšuje odolnost skla vůči působení alkalického prostředí. **Optická vlákna** (vlnovody) vyžadují skla mimořádné čistoty, která se vyrábějí speciálními technikami (CVD, MCVD).

Skleněná mozaika

Dodává se ve formě obdélníkových výlisků o velikosti 16 x 12 x 4,5 – 6 mm nalepených na papírovém podkladu. Vyrábí se v různých barvách a odstínech a je vhodná k vnějším i vnitřním obkladům stěn, sloupů, stropů a podlah jako ochrana před vlivem povětrnosti.

Sklokeramika

Sklokeramika se získává **řízenou krystalizací** v celém objemu skla. Výsledný produkt pak obsahuje malé množství skelné fáze. Sklovina se připravuje tavením a dalším tepelným zpracováním se získá sklokeramika, která se vyznačuje vysokou pevností, nepatrnou tepelnou roztažností a možností plynulých změn vlastností podle složení výchozího skla. Tepelné zpracování probíhá ve dvou stupních. Sklovina se ochladí na teplotu, při které se začínají tvořit zárodky krystalů, tzv. **teplota nukleace**. Jakmile vznikne dostatečné množství zárodků, produkt se ohřeje, aby krystaly dostatečně narostly.

Nízkoroztažné materiály jsou vyráběny na základě skloviny z oxidů $\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Základem sklokeramiky cordieritového typu $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ je cordierit. Materiál se vyznačuje vysokou pevností, vysokým elektrickým odporem a nízkou roztažností. Pájky ve vakuové elektronice jsou vyráběny ze skla $\text{PbO} - \text{ZnO} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Ferroelektrická sklokeramika se vyrábí ze skla $\text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$.

Sklokeramiku můžeme vyrábět také z přírodních a odpadních surovin. Výrobky z taveného čediče mají vysokou odolnost vůči ohřevu a vysokou chemickou odolnost, jsou to např. dlaždice, trysky, trouby, mlecí tělesa atd. výchozími surovinami pro tzv. **petrositaly** jsou čedič, žula, znělec, písek, hlína, vápenec a nukleátor Na_2SiF_6 . Přetavením strusky a její následnou krystalizací vznikají struskosilikáty.

12 DEGRADACE STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

12.1 TYPY DEGRADACE

12.2 DEGRADACE VYBRANÝCH STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ

V poslední kapitole věnujeme pozornost procesu zcela opačnému než je příprava a výroba stavebních materiálů, jímž je **degradace materiálu**. Degradací rozumíme nezáměrné poškození struktury látek, na rozdíl od vandalizmu, přičemž se jedná o samovolný proces počínající již v okamžiku výroby či instalace daného materiálu. Většinou dochází nejprve k poklesu pevnosti, v poslední fázi až k rozpadu struktury materiálu. Někdy bývá degradace doprovázena i vizuálními změnami, např. výkvěty, šednutím skla atd. Degradace značně ovlivňuje trvanlivost materiálu a životnost celé konstrukce. Díky degradačním procesům vznikají nemalé náklady na rekonstrukce a sanace budov. Tento proces zastavit neumíme, ale snažíme se alespoň zpomalit jeho rychlost nebo výrazně omezit jeho dopady.

12.1 Typy degradace

Prvotně bychom měli rozlišovat, jaký činitel degradaci materiálu způsobil. Je důležité si uvědomit, že „zhoršené životní prostředí“, je zapříčiněno zvýšenými koncentracemi škodlivých látek v ovzduší, půdě i vodě, které svými reakcemi se složkami materiálu tvoří degradační produkty. Samotné složení materiálu, jeho výroba, použití a instalace souvisejí primárně s tzv. **vnitřní degradací materiálu**. Volba vhodných surovin, jejich chemické a mineralogické složení a specifický povrch jednotlivých složek rozhodují o kvalitě výstupního materiálu. Snažíme se snížit obsah vody, neboť čím více vody použijeme do záměsi, tím poréznější materiál vyrobíme, tím snadněji bude přístupný k degradačnímu působení roztoků a plynů. Dnes používáme také řadu přísad a příměsí za účelem zlepšení vlastností. Ale jejich nadměrné užívání a nevhodné dávkování může naopak působit opačně a významně urychlit degradaci materiálu. Konečné úpravy povrchu stavebních materiálů, např. nanášení glazur na keramiku, různé impregnace a nátěry, výrazně redukuje degradaci a prodlužují životnost.

Vnější degradaci stavebních materiálů rozdělujeme na **fyzikální** (změny vyvolané působením sil na materiál, změny a rozdíly teplot a vlhkosti), **chemickou** (změny chemického složení materiálu vyvolané reakcemi s chemickými látkami z prostředí) a **biologickou** (fyzikální – chemické změny materiálu vyvolané působením živých organismů). V reálných

podmínkách však obtížně rozlišíme, o jaký konkrétní typ degradace se jedná, např. při krystalizaci a rekrystalizaci dochází jak k chemickému tak i fyzikálnímu působení (značné krystalizační tlaky), živé organismy působí nejprve fyzikálně (mechanicky) a následně produkcí agresivních chemikálií, chemicky a biologicky. Většinou platí, že jednotlivé degradační procesy spolu souvisejí, nebo probíhají zároveň.

12.1.1 Vnitřní degradační působení

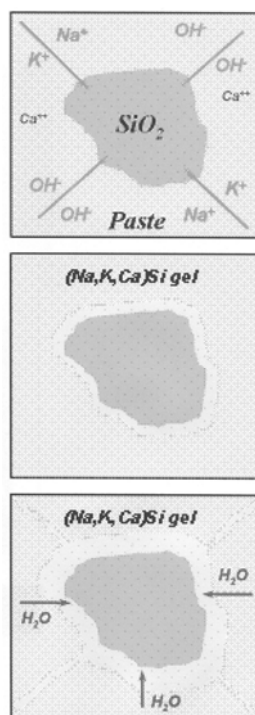
12.1.1.1 Alkalicko křemičitá reakce v betonu (alkáliové rozpínání)

Důsledek reakce kameniva s alkáliemi (sodík, vápník, atd.) byl objeven poprvé v USA ve čtyřicátých letech minulého století, kdy se našly trhliny na betonovém krytu dálnice. Konstrukce postižené alkalicko křemičitou reakcí (alkali – silica reaction, ASR) se nedají opravovat, neboť dochází k vnitřnímu roztrhání materiálu. Alkalickou reakcí v betonu rozumíme soubor složitých fyzikálně – chemických reakcí mezi reaktivními částicemi SiO_2 v kamenivu a alkalickými roztoky v betonu. Nejčastěji takto degradují betony vyrobené z vysocealkalických cementů (nad 0.90 % Na_2O ekv.). Alkálie se do betonů mohou dostat také z vnějšího prostředí a zapojit se do ASR.

Aby došlo k reakci kameniva s alkáliemi, musí být splněny následující podmínky:

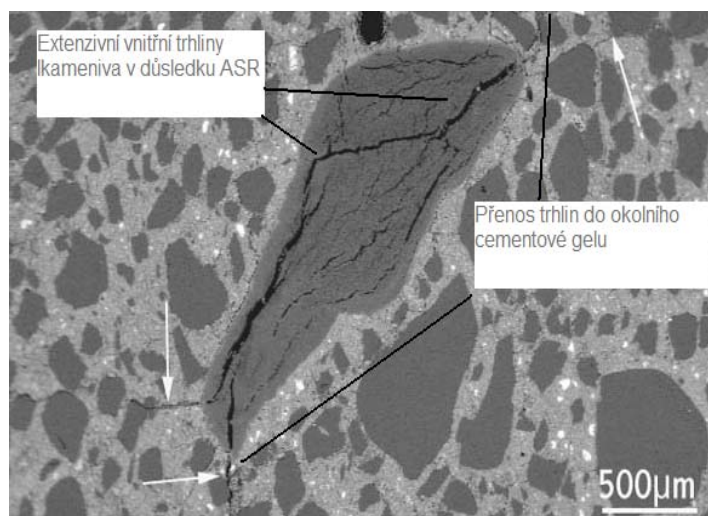
- Existence reaktivní formy SiO_2 (ve formě cristobalitu, opálu, chalcedonu, tridymitu, křemence atd.) – rozhoduje množství a velikost částic.
- Vyšší obsah alkálií – více než 3 kg Na_2O ekv. na 1m^3 betonu, nezáleží na původu.
- Vysoká vlhkost betonu.

Při ASR reaguje reaktivní kamenivo SiO_2 s hydroxidy NaOH a KOH za vzniku alkalického křemičitanového gelu, tzv. **polymerního křemičitanu sodného**. Tento gel následně přijímá vodu a bobtná, čímž zvětšuje svůj objem a dochází ke vzniku trhlin uvnitř zrn, které se šíří k povrchu. Trhlinky běží po povrchu zrna v kontaktu s cementovým tmelem až k povrchu betonu. Dochází ke značnému zvětšování objemu betonu, rozpínání, u vyztužených konstrukcí se zvyšuje tahové napětí výztuže. Trhlinky na zrnech kameniva se šíří maltou a spojují se do souvislých ploch a dochází k poškození struktury betonu. V konečné fázi se na povrchu betonu objeví tenké vlasové trhlinky, ze kterých vyvěrá průhledný až mléčný gel, který postupně zasychá, viz Obr. 12.1.

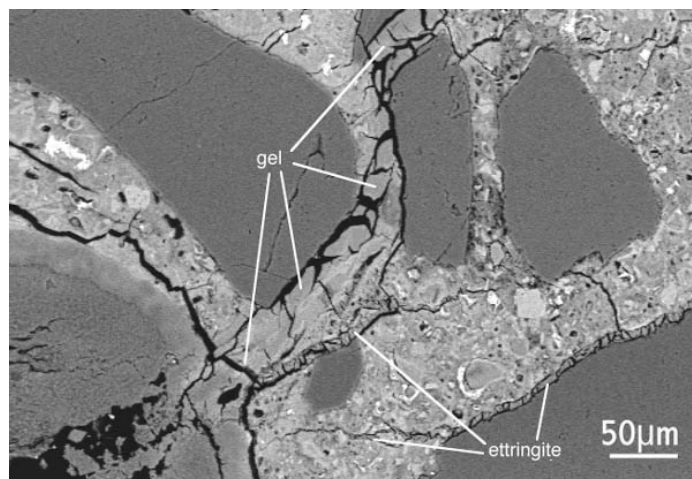


Obr. 12.1 Schéma alkalicko – křemičité reakce.

Nebezpečí ASR spočívá v dlouhodobém vývoji, který dle daných fyzikálně – chemických podmínek trvá 5 až 40 let. Nejefektivnějším způsobem kontroly vzniku ASR je v první řadě používání kvalitního kameniva bez reaktivních složek a nízkoalkalického cementu. Minerální příměsi jako je popílek, struska, mikrosilika či přírodní pucolány, které přednostně reagují s hydroxidy, mohou ASR zabránit. Můžeme také použít přísady do betonu obsahující lithiové a baryové soli pro potlačení rozpínání alkalicko – křemičitého gelu. Příklady projevu ASR detekované pomocí elektronového mikroskopu (SEM) jsou uvedeny v následujících obrázcích.



Obr. 12.2 Pozorování a detekce alkalicko-křemičité reakce v betonu pomocí SEM

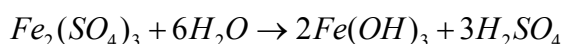
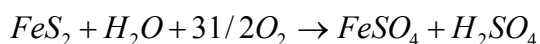


Obr. 12.3 Pozorování a detekce alkalicko-křemičité reakce v betonu pomocí SEM

Na Obr. 12.3 je patrná tvorba alkalicko-křemičitého gelu v trhlinách betonu. V části trhlín je přítomen také ettringit.

12.1.1.2 Degradace kameniva

Vyvřelé horniny, např. žula, čedič, diabas atd., nejsou za normálních podmínek ve stavebním díle napadány. Některé usazené horniny velice dobře odolávají, např. hutné vápence, jiné jsou odolné málo, např. jílovité pískovce. Velice rychle zvětřávají metamorfované horniny, jako jsou břidlice a ruly, naopak velice stabilní je mramor. Za přítomnosti pyritu, FeS_2 , může v hornině docházet jeho oxidací ke vzniku hnědého zabarvení:



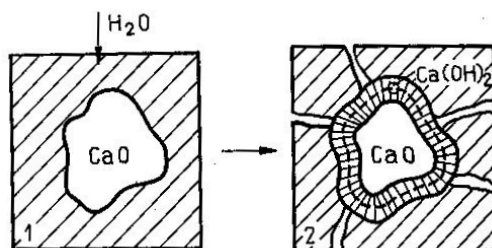
12.1.1.3 Rozpínání cementového tmelu

Rozpínání se objevuje v případě, kdy složky obsažené v tmelu reagují za vzniku objemných sloučenin. Nejčastěji dochází k rozpínání vápenatému, hořečnatému, alkáliovému či síranovému (sádrovcovému). Při tomto jevu vzniká tahové namáhání betonu velikými silami (až stovky MPa), což má za následek porušení betonu.

Vápenaté rozpínání

Obsahuje – li cement volné vápno, které v průběhu tvrdnutí nehydratuje dostatečně rychle, může zůstat v betonu nebo maltě ve formě reaktivního nezhydratovaného CaO . Pokud vniká do betonu vlhkost, začne CaO hydratovat a vzniká objemnější $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Při obsahu 2% CaO

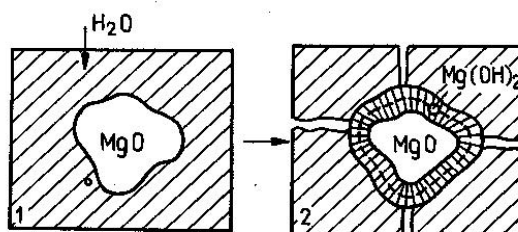
ve slínku vede tato reakce vlivem velkých krystalizačních tlaků až k porušení betonu rozpínáním, viz Obr. 12.4.



Obr. 12.4 Vápenaté rozpínání. 1) CaO jako volné vápno v zatvrdlém cementu nebo maltě, 2) rozrušení trhlinami vlivem pomalé hydratace CaO za zvětšení objemu.

Hořečnaté (magneziové) rozpínání

Pokud portlandský cement obsahuje ve slínku více než 6% MgO, může nastat hořečnaté rozpínání. Méně než 2% MgO jsou totiž vázána ve slínkových minerálech v podobě tuhých roztoků, zbytek zůstává přítomen jako periklas. Působením vody jeho zrna zvolna hydratují za tvorby $Mg(OH)_2$. Dojde tedy opět k rozpínání uvnitř zatvrdlého cementového tmelu a ke vzniku trhlin, viz Obr. 12.5.



Obr. 12.5 Hořečnaté rozpínání. 1) Periklas v zatvrdlém betonu, 2) rozrušení vlivem pomalé hydratace za zvětšení objemu.

Alkáliové rozpínání

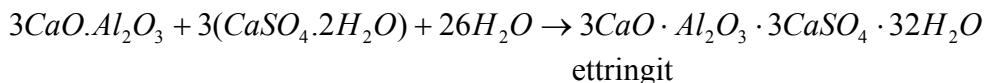
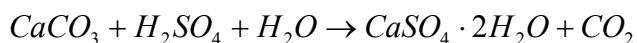
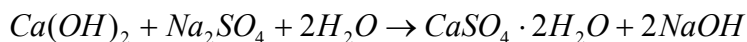
Toto rozpínání nastává u dolomitického kameniva, proto ho nazýváme též „**dedolomitizace**“ kameniva:



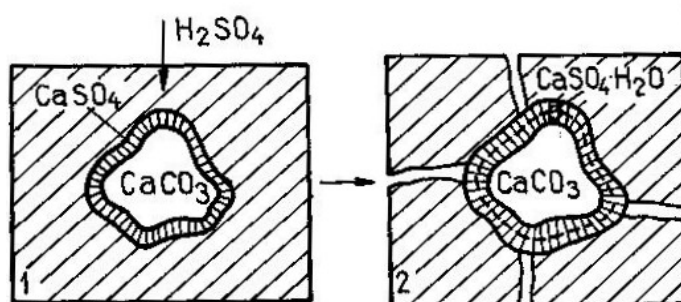
Síranové (sulfátové) rozpínání

Silné síranové rozpínání nastává, když se použije kamenivo obsahující sádrovec, anhydrit. Může se objevit i u cihel, které obsahují rozpustné sírany. Vyskytuje se také u kameniva zněčištěného pyritem, který zoxidoval na síran. Proniknutím vlhkosti do materiálu se síran

rozpouští a reaguje s hydroxidem vápenatým (omítky, cement), či s aluminátovou fází v cementovém tmelu:



Vlivem úbytku hustoty se zvětší objem reakčních produktů a nastane síranové rozpínání, viz Obr. 12.6.



Obr. 12.6 Sulfátové rozpínání. 1) vznik CaSO_4 při vniknutí síranových iontů do betonu,
2) rozrušení vlivem vzniku sádrovce.

12.1.2 Vnější degradační působení

12.1.2.1 Mechanické zatěžování

Do skupiny mechanického zatěžování můžeme zařadit degradaci způsobenou deformací, lomem, únavou a opotřebením materiálu. Při malých zatíženích se materiál deformuje elasticky, při větších plasticky. **Plastickou deformaci** již považujeme za degradaci materiálu, neboť dochází k trvalé změně tvaru a zdeformovaný materiál obvykle nemůže plnit svou funkci v konstrukci. Z tohoto důvodu je nutné navrhovat konstrukční části tak, aby při provozním zatížení nebyla překročena mez kluzu materiálu. Působením mechanické síly na materiál dochází také k **lomu**, kdy jsou porušeny chemické vazby materiálu. Síla potřebná k lomu však neodpovídá pevnosti vazeb, díky defektům, vadám, v materiálu, např. mikrotrhliny, dutiny atd., je mnohem nižší. Rozlišujeme dva druhy lomů – **houževnaté** (tvárné), typické pro kovy, které jsou doprovázeny plastickou deformací, a **křehké**, charakteristické pro reaktoplasty, sklo a keramiku. Křehký lom nastává náhle a probíhá rychle, proto jsou materiály s křehkým lomem zvláště nebezpečné v nosných konstrukcích.

Odolnost materiálu proti křehkému porušení označujeme jako **houževnatost**. Vysokou houževnatostí se vyznačují kovy, naopak nízkou houževnatost mají křehké materiály. S klesající teplotou houževnatost klesá, např. u uhlíkových ocelí dochází k výraznému křehnutí. Změny vlastností materiálů vedoucí až k jejich porušení vlivem cyklického namáhání označujeme pojmem **únavu materiálu**. Únavový lom materiálu může vzniknout dokonce působením zatěžovacího napětí nižšího, než je na mez pevnosti a mezi kluzu. I když je materiál cyklicky zatěžován pouze v elastické oblasti, dochází v okolí přítomných defektů ke koncentraci napětí a k mikroplastické deformaci. Nejprve se změní mechanické vlastnosti, následuje vznik únavové trhliny, většinou na povrchu, ta se dále šíří (i řadu let) až dojde k rychlému odlomení části materiálu. Na únavové chování má výrazný vliv kvalita povrchu materiálu, proto je dobré omezit místa vzniku únavové trhliny, např. ostré vruby, nedokonalé svary atd.

12.1.2.2 Opotřebení

Souhrn nežádoucích změn povrchu a rozměrů materiálu vlivem kontaktu s jiným materiálem nebo médiem označujeme jako opotřebení, které může být abrazivní, erozivní a kavitační. Poškozováním povrchu materiálu tvrdými částicemi nebo tvrdým drsným povrchem jiného materiálu vznikají rýhy, vrypy, důlky atd., navíc částice mohou vnikat i do povrchu materiálu, tím dochází k jeho **abrazi**. Velikost abrazivního opotřebení roste s rostoucí rychlostí abrazivních částic a klesá s tvrdostí povrchu materiálu. Voda a vítr s sebou unášejí jemnozrnné částice, které obrušují a posléze hloubkově narušují povrch konstrukcí, hovoříme o **erozivní degradaci**, např. potrubí, ventilátory. Částice mohou být i poměrně měkké, na povrch materiálu totiž působí svojí vysokou kinetickou rychlostí. Jsou – li konstrukce vystaveny působení rychle tekoucí vody, dochází ke **kavitaci**, např. přepady jezů, potrubí, kanály atd. Kavitační koroze je způsobena rázy, které vznikají zanikáním bublin ve vodě, tzv. implozí bublin.

12.1.2.3 Působení teploty

Stavební konstrukce jsou vystaveny cyklickým změnám teploty okolního prostředí. Většinou se jedná o přirozené kolísání teploty během dne a v průběhu roku. Za extrém můžeme považovat požár či konstrukce vystavené vysokým teplotám jako jsou komíny, krby, pece atd. Stavební konstrukce představují složitý heterogenní systém, přičemž jeho jednotlivé složky reagují na změnu teploty rozdílně, neboť materiály mají odlišné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti (délkové a objemové změny). Na jejich spoji pak vzniká napětí, které může vést až k prasknutí na styku dvou složek.

Díky rozdílným hodnotám měrné tepelné kapacity a schopností různou měrou absorbovat světelné záření (černá >>> bílá) dochází k vytvoření **teplotních gradientů**. Průzkumy prokázaly, že největší teplotní rozdíly se vyskytují mezi povrchem a vnitřkem materiálu a mezi osluněnou a zastíněnou stranou konstrukce. Vzniká tak vnitřní pnutí na rozhraní částic a krystalů, objevují se trhliny, které se šíří v praskliny. Začne narůstat pórovitost materiálu, klesat jeho pevnost a snižovat se jeho odolnost.

12.1.2.4 Působení větru

Větrné proudění podmiňuje vytváření krust, napomáhá usazování pevných emisí a aerosolů na povrchu materiálů. Vítr také výrazně ovlivňuje rozložení vlhkosti v povrchových vrstvách, podporuje pronikání vody do struktury na návětrné straně a naopak urychluje odpařování vody z povrchu. Tím ovlivňuje transport roztoků solí k povrchu, následné vytváření výkvětů a krust.

12.1.2.5 Působení vody

Voda se v podobě plynné i kapalně vyskytuje ve všech stavebních materiálech a působí na všechny typy stavebních konstrukcí. Primárně zapříčiňuje fyzikální degradaci (mrazové poškození, abraze), podmiňuje degradaci chemickou (rozpuštění, transport solí) a podporuje existenci živých organismů, tedy degradaci biologickou.

Za běžných podmínek, tj. určitá teplota a tlak, obsahuje materiál rovnovážné množství vlhkosti, např. dřevo až 20%. Obsah rovnovážné vlhkosti je daný zejména chemickým složením materiálu a jeho porózitou. **Vázaná vlhkost** zahrnuje molekuly vody adsorbované (chemicky či fyzikálně vázané) v materiálu, včetně povrchu pórů. Tento druh vody se nepohybuje, nemrzne, a tudíž nepředstavuje pro materiál ohrožení.

Volná vlhkost představuje kapalnou vodu nacházející se v pórech materiálu. Vzniká buď jako produkt kondenzace vodní páry, nebo vniká do materiálu zvenku (z podzákladí, deštěm). V pórovém prostoru se volná voda pohybuje vlivem gravitační síly (směrem dolů) a kapilární vztlakovosti (směrem nahoru). Výška, do jaké voda vzlíná, je nepřímo úměrná průměru pórů, cca 1 – 2 metry. Klasifikaci obsahu vlhkosti předkládá norma ČSN P 73 0610 (2000) – Hydroizolace staveb – sanace vlhkého zdiva, základní ustanovení, viz Tab. 12.1.

Tab. 12.1 Klasifikace obsahu vlhkosti dle ČSN P 73 0610 (2000).

Obsah vlhkosti u (hm. %)	Klasifikace
$u < 3.0$	Velmi nízký obsah vlhkosti
$3.0 \leq u < 5.0$	Nízký obsah vlhkosti
$5.0 \leq u < 7.5$	Zvýšený obsah vlhkosti
$7.5 \leq u < 10.0$	Vysoký obsah vlhkosti
$10.0 < u$	Velmi vysoký obsah vlhkosti

Vodní pára jako součást vzduchu sama o sobě nepředstavuje žádné nebezpečí. Při poklesu vnější teploty (zima) či vlivem pórového prostředí však může **kondenzovat** na kapalinu. Cyklická kondenzace a vypařování vody působí jednak fyzikální (narušování pórového systému materiálu), jednak chemickou (tvorba výkvětů) degradaci materiálu.

Mrazové porušení porézních materiálů vzniká v důsledku opakovaného zamrzání vody obsažené v pórové struktuře. Po nasycení pórů vodou se při následné přeměně vody z kapalné do pevné fáze zvyšuje objem vody o cca 10 %. Led působí na stěny pórů krystalizačním tlakem o velikosti několika desítek MPa. Pokud je tento tlak vyšší než pevnost materiálu, dochází k prasknutí stěny póru. Při opakovaném procesu zamrzání vody vznikají mikrotrhliny, do kterých při rozmrzání vnika voda, která následně zamrzá a zvětšuje je. K zamrzání vody dochází nejprve v povrchových vrstvách, avšak postupně se zóna zamrzání posunuje dovnitř materiálu a zvětšuje se prostor obsazený ledem. Postupně dochází ke snižování pevnosti materiálu a později k jeho úplnému rozpadu.

Látky obsažené ve vodě rozrušují zdivo, korodují kovy atd. Silnou korozi kovů způsobuje kyslík obsažený ve vodě při vyšších teplotách a tlacích, např. parní kotle.

Vzlínáním spodní vody z podzákladí, posypem vozovek a chodníků, či ve formě metabolických produktů živých organismů se do konstrukcí dostávají vodorozpustné soli. Jedná se zejména o kationy Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} a NH_4^+ a aniony Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} a NO_3^- . Chování solí v pórech závisí na obsahu vlhkosti v materiálu, na rozpustnosti konkrétní soli, na teplotě a vlhkosti okolního prostředí atd. Soli, nad jejichž roztoky se ustavuje rovnovážná

vlhkost > 75% snadno a často krystalizují (NaCl, KCl), soli s rovnovážnou vlhkostí 50 – 75 % krystalizují zřídka (NaNO₂) a soli s rovnovážnou vlhkostí pod 50 % zůstávají v roztoku (K₂CO₃), jsou však hygroskopické a způsobují nárůst vlhkosti materiálu. Opakované navlhání a vysoušení konstrukce způsobuje krystalizaci a rozpouštění solí obsažených v pórovém roztoku, dochází ke vzniku nasycených až přesycených roztoků, překročení prahu rozpustnosti a k růstu krystalů.

Pro stavební materiály jsou nejvíce nebezpečné soli, které mění své formy během běžných klimatických podmínek, např. síran sodný, uhličitan sodný, dusičnan vápenatý. Jedná se o soli schopné vázat ve své krystalové mřížce daný počet molekul vody, tvoří tzv. **hydráty**. Přechod z jedné hydratované formy do druhé je vždy spojen s vázáním nebo ztrátou určitého množství molekul vody, což je doprovázeno i značnými změnami objemu. V důsledku toho dochází ke vzniku hydratačních tlaků. Např. bezvodý Na₂SO₄ má objem 0.373 cm³/g, zatímco hydrát Na₂SO₄·10H₂O má specifický objem 0.683 cm³/g. Pokud 1 g bezvodého Na₂SO₄ přejde na dekahydrát, vzroste jeho hmotnost na 2.27 g a objem z 0.373 na 1.549 cm³, to je více než čtyřnásobně. Schopnost pohlcovat a vázat za určitých klimatických podmínek vlhkost se u jednotlivých solí liší a je limitována relativní vzdušnou vlhkostí a množstvím vody, které je schopna sůl přijmout. Na stěny pórů tak působí poměrně vysoké krystalizační tlaky, viz Tab. 12.2, b.

Tab. 12.2a Krystalizační tlaky solí.

Sloučenina	Krystalizační tlak [MPa]
CaSO ₄ ·2 H ₂ O	28.2
MgSO ₄ ·2 H ₂ O	10.5
Na ₂ SO ₄ ·10 H ₂ O	7.2
NaCl	55.4

Tab. 12.2b Rekrystalizační tlaky solí.

Sloučenina	Konečný produkt	Rekrystalizační tlak [MPa]
CaSO ₄ ·0.5 H ₂ O	CaSO ₄ ·2H ₂ O	160
MgSO ₄ ·6 H ₂ O	MgSO ₄ ·7 H ₂ O	10
Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O	Na ₂ CO ₃ ·7 H ₂ O	64

Další nebezpečí představují soli, které jsou schopné přijímat vzdušnou vlhkost. V tomto případě se nejedná o chemickou (viz hydráty), ale fyzikálně vázanou vodu, jejíž množství

silně kolísá s relativní vlhkostí okolí. Při okolní relativní vlhkosti vzduchu dochází k pohlcování vody a k poklesu koncentrace roztoku. Obsah solí v materiálu tedy významně ovlivňuje jeho sorpční vlastnosti, musíme počítat se změnou průběhu sorpční izotermy a předpokládáme nárůst sorpce vlhkosti s nárůstem obsahu solí. Hygroscopicita solí také přispívá k celkovému zavlhčení materiálů. Často ani při aplikaci radikálních opatření proti vztlínající vlhkosti nedojde k vyschnutí zdiva.

Z hlediska volby způsobu sanace konstrukce je rozhodující znalost obsahu solí ve zdivu. Hodnocení je začleněno v technických normách, např. dle ČSN P 73 0610 (Hydroizolace staveb – sanace vlhkého zdiva - klasifikace vlhkosti a salinity zdiva, Tab. 12.3) případně podle klasifikace projektu EU EUREKA EU – 1270 (Tab. 12.4).

Tab. 12.3 *Klasifikace salinity dle ČSN P 73 0610.*

Stupeň zasolení	Množství soli v mg/g vzorku materiálu a v hm. %					
	Chloridy		Dusičnany		Sířany	
	mg/g	hm. %	mg/g	hm. %	mg/g	hm. %
Nízký	< 0,75	< 0,075	< 1,0	< 0,1	< 5,0	< 0,5
Zvýšený	0,75 – 2,0	0,075 – 0,2	1,0 – 2,5	0,1 – 0,25	5,0 - 20	0,5 – 0,2
Vysoký	2,0 – 5,0	0,20 – 0,50	2,5 – 5,0	0,25 – 0,50	20 - 50	2,0 – 5,0
Extrémně vysoký	> 5,0	> 0,50	> 5,0	> 0,50	> 50	> 5,0

Tab. 12.4 *Klasifikace salinity dle EUREKA EU – 1270, v hm. %.*

Sůl	Stupeň 0	Stupeň 1	Stupeň 2	Stupeň 3	Stupeň 4
Chloridy	0 – 0,01	0,01 – 0,03	0,03 – 0,09	0,09 – 0,28	0,01 – 0,28
Dusičnany	0 – 0,01	0,01 – 0,05	0,05 – 0,15	0,15 – 0,50	0,01 – 0,50
Sířany	0 – 0,02	0,02 – 0,08	0,08 – 0,24	0,24 – 0,77	0,02 – 0,77

- Stupeň 0 – odpovídá nízké koncentraci solí. Obsaženo je pouze stopové množství solí a ohrožení poškození zdiva je zde vyloučeno.

- Stupeň 1 – představuje velmi nízké zatížení stavební konstrukce solemi. Pouze v nepříznivých případech (např. u silné stěny se zdrojem konstantní kapilární vlhkosti) může dojít k poškození.
- Stupeň 2 – udává střední zatížení solemi, kde je již snížena trvanlivost omítek a nátěrů.
- Stupeň 3 – je považován za kritický vzhledem k trvanlivosti omítek a nátěrů. I přes aktivní vertikální izolační vrstvy zůstane zdivo díky hygroskopickým vlastnostem solí vlhké.
- Stupeň 4 – znamená extrémně vysoké zasolení, při kterém se poruchy objevují ve velice krátkém časovém horizontu.

Limitujícím faktorem z hlediska porušení struktury materiálu není jeho celková pórovitost, ale distribuce a velikost pórů. Nejvíce jsou ohroženy materiály, které mají velké množství malých pórů, v nich je udržována koncentrace nasyceného roztoku solí, ze kterého se formují a rostou krystaly ve velkých pórech. Pokud snížíme koncentraci solného roztoku, krystaly se přestanou formovat.

Z pohledu degradace stavebních materiálů je důležité, jestli ke krystalizaci dochází na povrchu materiálu či uvnitř jeho porézní struktury. Při pomalém vysychání solného roztoku dochází k transportu solí až na povrch materiálu, kde dochází k tvorbě výkvětů. Jedná se spíše o estetický problém či problém povrchových vrstev konstrukcí. Avšak výskyt výkvětů může informovat o problému vnitřní krystalizace, která je mnohem závažnější, protože je doprovázena destrukcí materiálů a snížením či ztrátou statické funkce konstrukce.

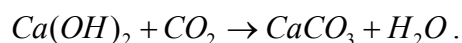
Výkvěty (eflorescence) vznikají, jestliže jsou v použitých stavebních látkách (cihly, beton, malty) obsaženy rozpustné soli, které se pohybem kapaliny porézní strukturou (vody) vynášejí na povrch materiálu. Výkvětotvorné soli se do zdí dostávají také vztlínáním zemní vlhkosti a podzemních vod, použitou vodou, záplavami apod. Po odpaření vody na povrchu nebo reakcí s plyny obsaženými ve vzduchu se na povrchu objevují bílé až špinavě žluté krystalické či amorfnní výkvěty, patrné zejména na tmavých podkladech. Jedná se nejen o estetickou vadu, ale může dojít i ke škodám na povrchu stavby. Chemické složení, místo výskytu a nejčastější příčiny výkvětů shrnuje následující Tab. 12.5.

Tab. 10.5 Složení a vznik výkvětů.

Vzorec	Příčiny vzniku	Výskyt
Ca(OH)_2	Vyplavení	Betony, malty
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Reakce síranů s vápnem, působení vzdušného SO_2	Betony, malty
Ettringit	Reakce síranů s C_3A	Betony, malty
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Reakce síranů z paliva (obsahovalo síru) a alkálií ze surovin	Cihly
$\text{MgSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Použití mořské vody jako rozdělovací	Betony, malty, omítky
$\text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Použití přísad jako urychlovačů tvrdnutí a protikoroze ochrany	Betony
KCl, NaCl	Z půdy	Staviva
CaCO_3	Vody s CO_2 (kyselina uhličitá) reagují s Ca^{2+}	Staviva s obsahem Ca(OH)_2 a CaCO_3
$\text{Ca(NO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Působení rozkladných produktů organických látek s obsahem N za přístupu vzduchu	Staviva s obsahem Ca^{2+}

Výkvěty můžeme odstranit mechanicky, okartáčováním a omytím, nebo chemicky, zředěnou HCl . Nově vznikajícím výkvětům zabráníme aplikací ochranného nátěru nebo impregnací, či izolací podloží.

S pojmem výkvěty úzce souvisí pojem výluh. Jedná se také o krystaly soli na povrchu konstrukce, avšak krystalizující sůl vzniká chemickou reakcí přímo na povrchu konstrukce. Typickým příkladem je kalcitový výluh (kalcit = uhličitán vápenatý), který se tvoří na betonu reakcí roztoku Ca(OH)_2 v pórové vodě s CO_2 ze vzduchu. Na povrchu jsou pak viditelné krystaly CaCO_3 :



12.1.2.6 Působení atmosféry

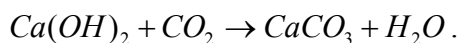
Česká republika patří stále k zemím se značně znečištěným ovzduším. V atmosféře se nachází řada exhalací, které se významnou měrou podílejí na degradaci stavebních materiálů. Kromě výše uvedené vodní páry se ve vzduchu nachází agresivní plyny, jako jsou CO_2 , SO_2 , NO_x , NH_3 , HF , HCl , chlór, kyselina octová a mravenčí atd. Plyny se dostávají difúzí dovnitř materiálu, kde se rozpouštějí v pórové vodě a způsobují chemickou degradaci.

Koncentrace CO_2 ve vzduchu je poměrně nízká (0,03 až 0,1 objemových %), výrazné zvýšení koncentrace pozorujeme zpravidla u velkých ložisek přírodních pramenů, ve spalínách a především v okolí velkých průmyslových měst. CO_2 způsobuje **karbonataci** a **rozpouštění uhličitanu vápenatého**, přítomného ve vápenných maltách a rovněž v horninách, zejména vápencích a opukách.

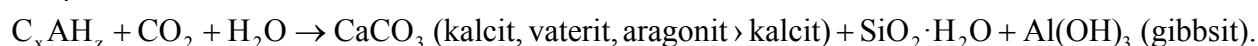
Karbonatace je proces, při kterém hydroxid vápenatý $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reaguje s atmosférickým CO_2 . Při této reakci vzniká mnohem pevnější a méně zásaditý uhličitan vápenatý CaCO_3 . Pro průběh karbonatace je nezbytná přítomnost vody, protože ta zaručuje rozpouštění CO_2 , který pak může reagovat s $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Bylo zjištěno těchto pět fází karbonatace:

1. difúze plynného CO_2 skrze pórovou strukturu materiálu,
2. rozpouštění CO_2 v pórové vodě,
3. rozpouštění $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v pórové vodě,
4. dosažení chemické rovnováhy rozpuštěného CO_2 v pórové vodě,
5. srážení CaCO_3 .

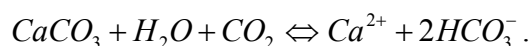
Zjednodušeně lze karbonataci vyjádřit následující rovnicí:



Karbonatace probíhá ve vápenné maltě při vytváření její pevné struktury a pro tvrdnutí vápenných malt se jedná o nezbytný děj. Rychlost karbonatace je ovlivněna velikostí difúzního koeficientu materiálu, velikostí pórů, vlhkostí okolního prostředí, vlhkostí materiálu a koncentrací oxidu uhličitého v okolním prostředí. CO_2 reaguje také s hydratačními produkty cementu, zejména s vápenatou složkou $\text{C} - \text{S} - \text{H}$ a $\text{C} - \text{A} - \text{H}$. Nejprve se tvoří jemnozrnný kalcit a termodynamicky nestálé formy CaCO_3 (vaterit, aragonit), které později rekrystalizují na velké krystaly kalcitu:



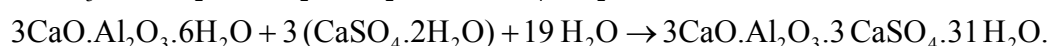
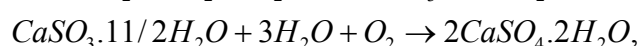
Působením CO_2 , zejména rozpuštěného v agresivní vodě, na uhličitán vápenatý dochází k degradaci vápence a ke vzniku krasových jevů:



Nerozpustný $CaCO_3$ reaguje s vodou a CO_2 za vzniku relativně rozpustného $Ca(HCO_3)_2$ (rozpustnost $1,6 \text{ g/dm}^3$), neboli iontů Ca^{2+} a HCO_3^- . Tyto ionty rozpuštěné ve vodě mohou být transportovány. Proces je rovnovážný, jakmile poklesne koncentrace CO_2 ve vodě nebo se voda odpaří, vznikne z iontů opět nerozpustný $CaCO_3$.

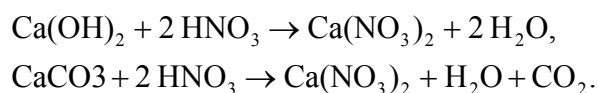
SO_2 , SO_3 a NO_x způsobující tzv. **kyselé deště** se dostávají do ovzduší jako následky lidské činnosti. Jejich koncentrace jsou mnohonásobně nižší než koncentrace CO_2 . Kyselé deště ohrožují zejména materiály na bázi $CaCO_3$ (vápenné malty, vápencové a opukové stavby a sochy). Kromě uhličitánů napadají kyselé deště i nedostatečně chránění ocelové stavební prvky.

Oxidy síry působí pouze místně, reagují s hydroxidem vápenatým:



Sádrovec reaguje s hydratovanými i nehydratovanými alumináty a způsobuje sulfoaluminátovou korozi, vzniká málo rozpustný ettringit, který tvoří jehlicovité krystaly (molární objem je $2,65 \times$ větší než molární objem původních látek). Protože vzniká až v zatvrdlém betonu, na rozdíl od ettringitu, který je příčinou zpomalení hydratace cementu, vede ke zvýšení tlaků uvnitř pórů a k degradaci betonu. Ettringit v pevné fázi vzniká jen při vysoké koncentraci $Ca(OH)_2$ v pórovém roztoku, při nízké koncentraci $Ca(OH)_2$ vznikají produkty, které nevedou k nežádoucím tlakům.

Oxidy dusíku se oxidují na kyselinu dusičnou, jejíž korozní působení spočívá v reakci H^+ iontů s Ca^{2+} :



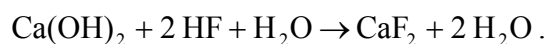
Vznikající dusičnan je rozpustný ve vodě a vyplavuje se ven z materiálu.

Amoniak (čpavek), NH_3 , vytváří s vodou hydroxid amonný NH_4OH , který sám o sobě není škodlivý pro beton, ale pokud se z něho vytvoří působením kyselin amonné soli, dojde k uvolnění plynného amoniaku za vzniku vápenatých solí bez vazebných vlastností.

Chlorovodík tvoří s vodou HCl , která neutralizuje hydroxid vápenatý a rozkládá hydratační produkty cementového slínku na rozpustné chloridy CaCl_2 , AlCl_3 , FeCl_3 a gel $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$:



Fluorovodík reaguje s vodou na velmi agresivní kyselinu, která neutralizuje hydroxid vápenatý za vzniku nerozpustného CaF_2 :



Vyšší koncentrace HF mohou napadat $\text{C} - \text{S} - \text{H}$ a $\text{C} - \text{A} - \text{H}$ gely za vzniku fluorokomplexů, které nemají vazebné vlastnosti.

12.1.2.7 Biologická degradace

Stavební materiály a konstrukce jsou v prostředí vystaveny nejen působení fyzikálních a chemických dějů, ale i působení organismů, tedy biologické degradaci. U některých typů organismů převládá biofyzikální působení, u jiných chemické, nicméně oba typy se vzájemně doplňují. Vyšší rostliny a primitivní formy řas a mečů tlakově destruuji materiál růstem kořenů i jiných vyživovacích orgánů (hyfy hub, rhizoidy mečů), změnami obsahu vody ve vláknech atd. Běžná hloubka osídlení kolísá mezi 5 – 10 cm od povrchu, nejbližší povrchu se nacházejí nitrifikační bakterie a půdní flóra, hlouběji siřné bakterie. Rekordních hloubek dosahují kořeny rostlin, až desítky metrů. Hloubka a rozsah osídlení závisí na stupni destrukce materiálu, na jeho pórovém systému a dostatku živin.

Bakterie jsou prakticky všudypřítomné mikroorganismy; pro stavební materiály jsou nejnebezpečnější bakterie siřné a nitrifikační. Tyto druhy získávají energii oxidací sloučenin síry a dusíku na síranové a dusičnanové ionty, které tvoří roztoky solí nebo kyselin. Tyto

bakterie ke svému životu potřebují zdroj sloučenin síry (dusíku), kyslík, uhlík, běžnou teplotu (nejvhodnější 5 – 30°C) a přibližně neutrální pH. Jsou běžně přítomné ve vodě a v půdě, silně se množí v hromadách holubího trusu na půdách. Ve chlévech bývají na stěnách krystaly dusičnanů (vápenatého, draselného) vzniklé bakteriální oxidací močoviny a amoniaku, které se uvolňují z výkalů a moče dobytka. Některé bakterie (chemoorganotrofní) vylučují, kromě jiného, také organické kyseliny (glukonovou, citronovou, jablečnou apod.), které napadají anorganický substrát, především uhličitany. Bakterie podporují vnikání vody do porézní struktury materiálů a přispívají tak k jejich navlhčení. Prevencí proti bakteriím je čistota, světlo a sucho.

Houby a plísně potřebují k životu organický materiál, vlhkost minimálně 60% a teplotu 15 – 30°C. Korozní působení plísní je způsobeno především organickými komplexotvornými kyselinami, které uvolňují. Ty rozkládají některé složky materiálů a uvolňují z nich kationty (hliníku, hořčíku, křemíku, železa atd.) a převádí je na komplexní sloučeniny rozpustné ve vodě. Nejznámější dřevokaznou houbou je dřevomorka, která rozkládá celulózní složky dřeva. Tento proces se označuje jako destrukční rozklad dřeva nebo též hnědá hniloba. Dřevo postupně hnědne uvolňovaným ligninem, křehne a stává se lámavým, ve finále se drobí a zcela rozpadá. Kromě tohoto přímého působení jsou houby nebezpečné nejen mechanicky, neboť vlákna podhoubí rozrušují materiál, ale i chemicky, protože houby produkují organické kyseliny (octovou, vinnou, šťavelovou), které rozpouštějí uhličitany vápenatý i jiné nerosty. Prevencí je ochrana dřevěných konstrukcí pomocí fungicidů, udržování sucha a čistoty konstrukcí.

Řasy jsou většinou autotrofní, ke zdárnému růstu potřebují světlo a dostatek vlhkosti. Rostou ve vlhkém prostředí, pokrývají povrch konstrukce slizkou vrstvou různě zbarvených povlaků. Na suchém vzduchu odumírají, ale jejich spóry přežívají, vyčkají na vhodné podmínky a znovu zaútočí. V době, kdy neasimilují, vydechují CO₂, který podporuje rozpouštění CaCO₃. Kromě toho mohou, při růstu v omezeném prostoru, působit na materiál svým rozpínáním a také mohou produkovat organické kyseliny, které opět rozpouštějí CaCO₃. Navíc působí i estetické škody, neboť produkují barviva (karoten, astξανtin aj.) a zachycují velké množství prachu, vznikají tak špinavé mokvající skvrny.

Lišejníky jsou symbiotické organismy tvořené vždy houbou a řasou, snášejí extrémní podmínky (-250°C – 100°C, dlouhé období sucha). Jejich hyfy fyzikálně a chemicky narušují

materiál, vylučují celou řadu organických kyselin (vinná, šťavelová, salicylová), které napadají uhličitánové složky.

Mechy potřebují k životu alespoň malé množství humusu, zadržují velké množství vody a produkují organické kyseliny, nebezpečné pro uhličitán vápenatý. Zvyšují množství humusu také zachytáváním prachu a nečistot z ovzduší.

Vyšší rostliny poškozují budovy zejména mechanicky. Byliny i stromy osídlují střechy a zdi budov a svými kořeny je poškozují. Na kritických místech budov vzniká vrstva zeminy, která je osídlována mikroorganismy, které také přispívají k poškozování stavby.

Živočichové se na degradaci stavebních materiálů podílejí hlavně mechanicky a chemicky svými exkrementy, které obsahují sloučeniny fosforu, dusíku, síry atd. Nejvýznamnější je poškození budov vlivem ptačího trusu, který se bakteriální činností stává zdrojem solí a kyselin.

Problematika biodegradace ve stavebnictví se soustřeďuje zejména na diagnostiku a likvidaci dřevokazných hub a likvidaci plísní v bytech. Působení přírodních činitelů na stavební díla je vždy komplexní, a proto je nutné přistupovat také k celkové ochraně.

Obecně je možné říci, že biodegradaci je možné účinně zabránit řádným užíváním budov: údržbou hydroizolací a střeš, větráním místností s vysokou vlhkostí vzduchu (koupelny, kuchyně), zabráněním přístupu ptactva do podstřešních prostor, čištěním okapů atd.

12.2 Degradace vybraných stavebních materiálů

Jednotliví degradační činitelé, popsaní v předchozí kapitole, se uplatňují více nebo méně při korozi všech stavebních materiálů. V této kapitole se zaměříme na některé z nich a zdůrazníme jejich specifika.

12.2.1 Degradace betonu

Jestliže je beton dobře navržen pro dané prostředí a je vyroben správně dle předepsané technologie, jedná se o materiál schopný odolávat vnějším vlivům bez zvláštních ochranných prostředků několik desítek let. Výjimku tvoří agresivní prostředí, ve kterém je vystaven chemické degradaci, např. spodní a odpadní průmyslové vody, exhalace. Důležité je, že agresivní látky působí na beton pouze ve formě roztoku. Účinek agresivního prostředí závisí na použitém cementu, vlastnostech a granulometrii plniva, způsobu přípravy, množství zadělavací vody, zpracování, stáří a stavu povrchu betonu a na složení a koncentraci

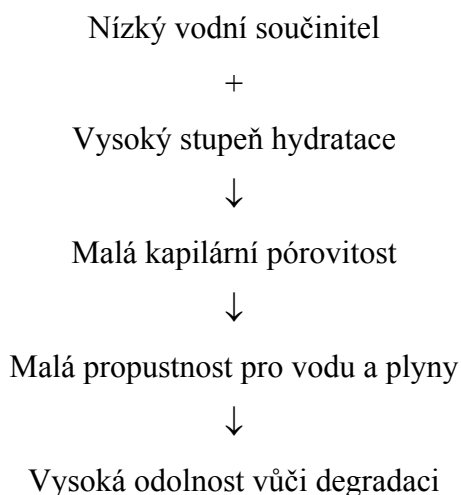
působících roztoků. Míru degradace ovlivňují také fyzikální faktory, které účinek zesilují nebo zeslabují (teplota, proudící voda atd.).

Degradaci betonu můžeme rozdělit na:

- **fyzikální** – zmrazování a roztávání, zvlhčování a vysušování, teplotní vlivy, otěr.,
- **chemickou** – vyluhování a výkvěty, síranová koroze, ASR, koroze kyselinami a zásadami, koroze ocelové výztuže.

Spolupůsobení těchto vnějších vlivů vede k rozkladu betonu na základní části, na cementový tmel, plnivo a výztuž. Vnitřní koroze je způsobena reakcemi uvnitř cementového tmelu (viz rozpínání) a na rozhraní tmelu a kameniva (ASR). Chemicky působí plyny, kyseliny, hydroxidy, roztoky solí a organických látek. K fyzikálním vlivům vliv působení tepla, mrazu, tekoucí vody, záření, větru, prachu atd. Na beton působí i většina biologických činitelů, bakterie, houby, mechy.

Odolnost betonu vůči působení agresivních látek ovlivňuje především chemické a fyzikální složení cementového tmelu, pórová struktura, minimální průřez konstrukce a vlastnosti povrchu přicházejícího do styku s agresivním prostředím. Největší vliv má však vodní součinitel, pokud je nízký, je nízká i pórovitost a tudíž propustnost cementového tmelu. Nižší vodní součinitel vede také ke zvýšení pevnosti, čímž vzrůstá schopnost betonu odolávat vnitřním tlakům způsobeným reakcemi uvnitř betonu:



Proudící voda způsobuje abrazi betonu, voda v pórovém systému se vlivem mrazu rozpíná a poškozuje tím strukturu betonu, zejména cementového tmelu (kamenivo bývá v našich

podmínkách hutné). Je zřejmé, že beton s menší porózitou bude více odolný působení zamrzající vody v pórech.

Změny teploty mají, kromě následků rozdílné teplotní roztažnosti komponent a zamrzání pórové vody, vliv i na složení cementového tmele. Jak víme z jiných kapitol, cementový tmel obsahuje rozmanité produkty hydratace cementu a hydroxid vápenatý. Všechny tyto sloučeniny jsou teplotně nestálé, již vlivem teplot nad 200° C se začnou rozkládat (dehydratovat) na sloučeniny, které nemají vazebné vlastnosti. To vede k poklesu pevnosti betonu, jejíž minimum je asi při 800° C.

Kromě toho se výrazně uplatňuje i rozdíl v teplotní roztažnosti tmelu (slinuje – zmenšuje objem) a kameniva (expanduje), který způsobuje ztrátu kontaktu tmelu a kameniva, což také přispívá k poklesu pevnosti. Zároveň roste poróznost betonu. Betony určené pro konstrukce namáhané vysokými teplotami se vyrábějí z hlinitanového cementu a jako kamenivo se používají horniny a minerály s nízkou teplotní roztažností (šamot).

Suché plyny degradují beton pouze ve vysokých koncentracích. Pokud však stoupne relativní vlhkost vzduchu, nebo je beton dostatečně vlhký, působí většina plynů ve formě kyselin:

HCl	$\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	vyluhování, CaCl_2 je lehce rozpustný ve vodě
HNO ₃	$\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{HNO}_3 \rightarrow \text{Ca(NO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	vyluhování, $\text{Ca(NO}_3)_2$ je lehce rozpustný ve vodě
H ₂ CO ₃	$\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca(HCO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	vyluhování, $\text{Ca(HCO}_3)_2$ je rozpustný ve vodě (1,7g/100g H ₂ O)
H ₂ SO ₃	$\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_3 \rightarrow \text{Ca(HSO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	vyluhování, $\text{Ca(HSO}_3)_2$ je rozpustný
H ₂ SO ₄	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	síranová koroze
H ₃ PO ₄	$3\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	bez vyluhování, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ je těžce rozpustný
HF	$\text{Ca(OH)}_2 + 2\text{HF} \rightarrow \text{CaF}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	bez vyluhování, CaF_2 je těžce rozpustný

Rozpouštěním složek cementového tmelu nebo vznikem rozpustných solí, které se vyluhují ve vodě, působí na beton např. měkká voda, organické oleje a tuky atd. Sírany a těžce rozpustné soli vyvíjejí vnitřní tlak a rozrušují strukturu cementového tmelu.

Korozivní účinky agresivních látek nejčastěji dělíme do několika skupin:

- **koroze prvního druhu** – zahrnuje všechny druhy koroze, při kterých účinkem vody nebo vodných roztoků dochází k rozpouštění a vyluhování složek cementového tmelu. Řadíme sem účinky vod s nízkou přechodnou tvrdostí, tzv. hladové vody.
- **koroze druhého druhu** – zahrnuje procesy, při kterých probíhají vzájemné reakce mezi složkami cementového tmelu a agresivního roztoku, přičemž vznikají produkty lehce rozpustné ve vodě nebo amorfní hmoty bez vazebných schopností. Jedná se zejména o korozi kyselinovou, karbonatací, alkalické a hořčnaté rozpínání.
- **koroze třetího druhu** – zahrnuje procesy, kdy se v pórech cementového tmelu hromadí a krystalizují málo rozpustné produkty, jejichž objem je značně vyšší než objem původních složek betonu. Protože dochází k pozvolnému zaplňování pórů je tato degradace spojena s „falešným“ ztuhnutím struktury, tedy s nárůstem pevnosti, což působí problémy při včasné diagnostice počínající degradace. Teprve značné krystalizační tlaky vedou ke snížení pevností, projeví se po několika týdnech až měsících, u vysokohodnotných betonů až letech, kdy může dojít až k totální destrukci betonu. K tomuto druhu řadíme síranovou a solnou korozi.

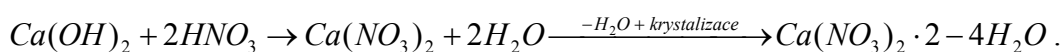
Koroze prvního druhu

Intenzivní vyluhování způsobuje zvýšení pórovitosti betonu a částečnou ztrátu pojivých vlastností cementového tmelu. Nejvíce rozpustnou složkou betonu je Ca(OH)_2 , gely kalciumsilikátů a kalciumaluminátů se rozpouštějí podstatně méně, avšak snižování koncentrace Ca(OH)_2 v důsledku jeho vyplavení se začnou tyto hydráty rozpadat až na oxidy (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) a ztrácet vazebné schopnosti. To vede k poklesu pevnosti betonu, v extrémních případech až k jeho rozpadu. Kromě toho, pokles koncentrace Ca(OH)_2 vede k poklesu pH betonu, což je nebezpečné pro ocelovou výztuž (viz dále). Je zřejmé, že koroze prvního druhu nejvíce ohrožuje vodní a podzemní stavby, zejména ty části, které jsou vystaveny prosakující vodě (voda proudící kolem konstrukce není tolik nebezpečná – neproniká do hloubky). Vnější projevem vyluhování je tvorba kalcitového výluhu, jakýchsi map z CaCO_3 vzniklého neutralizací vyluhovaného hydroxidu vápenatého.

Koroze druhého druhu

Výkvěty se tvoří na povrchu betonu, který je střídavě smáčen a vyluhován. Výkvěty sestávají ze solí vzniklých reakcí složek betonu a agresivního média, jejichž vodný roztok se na vzduchu odpařuje a reaguje s CO_2 z atmosféry. Typické soli výkvětů tvoří sírany a uhličitany sodné, draselné a vápenaté. Dále může reagovat Ca(OH)_2 rozpuštěný v pórové vodě s kyselinou, např. s kyselými složkami atmosféry.

Reakcí s kyselinou dusičnou (vzniká z oxidů dusíku NO_x) vzniká rozpustný dusičnan vápenatý $\text{Ca(NO}_3)_2$, který po odpaření vody tvoří výkvěty ve formě hydrátů $\text{Ca(NO}_3)_2 \cdot 2 - 4\text{H}_2\text{O}$:



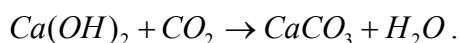
Podobně se chovají i organické kyseliny (octová, šťavelová, mléčná a další produkty činnosti organismů) a HCl :

Kyselina	Reakční produkt	K čemu dojde?
Mravenčí	$(\text{HCOO})_2\text{Ca}$	Produkt rozpustný, vyluhování
Octová	$(\text{CH}_3\text{HCOO})_2\text{Ca}$	
Mléčná	$(\text{CH}_3\text{CHOHCOO})_2\text{Ca}$	
Huminové sloučeniny z odpadních vod	Komplexní sloučeniny vápenatých solí	Vliv na hydrataci

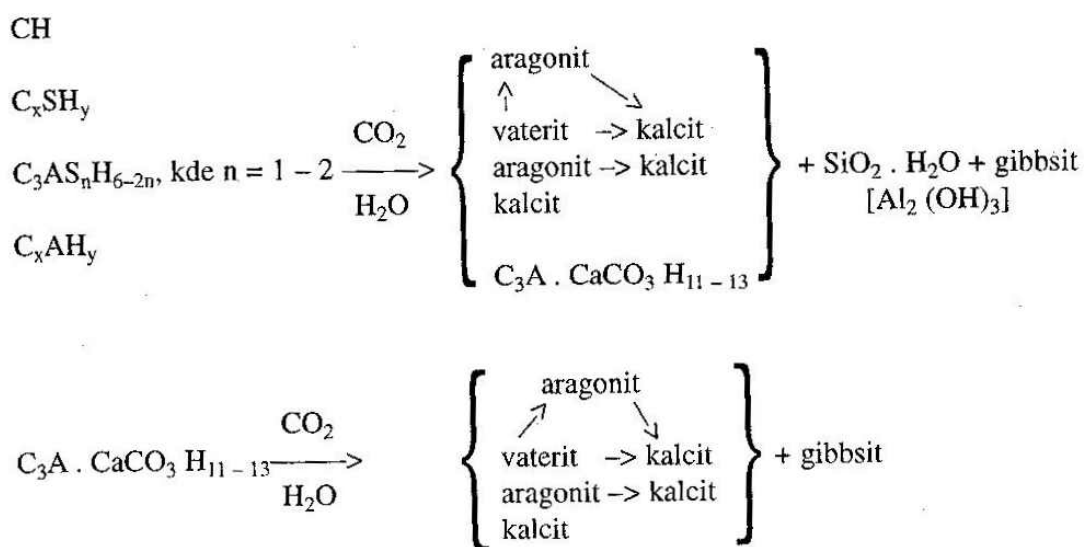
Vznikají rozpustné vápenaté soli, které tvoří výkvěty. Ze stejného důvodu jsou nebezpečné pro beton i mastné kyseliny přítomné v olejích a tucích (průmyslové objekty, potravinářství, skládky odpadů).

Naopak HF a H_3PO_4 tvoří nerozpustné vápenaté soli CaF_2 a $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Reakcí Ca(OH)_2 s kyselinou sírovou a siřičitou vzniká sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Působením CO_2 na beton dochází k chemickým a mineralogickým přeměnám kalciumsilikátů a aluminátů. Nejprve CO_2 napadá Ca(OH)_2 rozpuštěný v pórovém roztoku betonu a vzniká CaCO_3 , ve formě kalcitu:

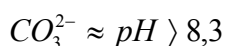
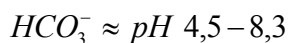
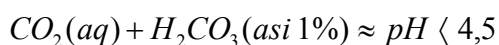


Kalcit krystaluje v pórech, kde je pro něj dostatek prostoru, proto tato fáze není nijak škodlivá. Snížení koncentrace hydroxidu vápenatého v roztoku vede k jeho dalšímu rozpouštění a reakce s CO_2 se opakuje. Postupně se zaplňují kapiláry, zvyšuje se hutnost cementového tmelu a dochází ke zlepšení odolnosti vůči agresivním vlivům a ke zpomalení karbonatace. Hodnota pH pórového roztoku klesá z 12,9 až na 9 a následuje koroze výztuže a destabilizace hydrátů vedoucí ke snížení pevnosti. Karbonatace v suchém betonu neprobíhá, nejrychlejší je při relativní vlhkosti vzduchu 40 – 90 %. Následné schéma, vypracované Matouškem, znázorňuje vznik a přeměny jednotlivých uhličitanových modifikací při karbonataci:



Konečná stádia karbonatace betonu se projeví tak, že se v celé struktuře cementového tmelu začnou objevovat četné velké krystaly aragonitu a kalcitu, vzniklé rekrytalizací. Po zreagování veškerého $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (řádově desítky let) probíhá karbonatace C-S-H a C-A-H hydrátů, vedoucí až k jejich rozpadu na oxidy SiO_2 , Al_2O_3 a CaCO_3 , a tím i k rozpadu celé betonové konstrukce.

Reakce betonu s agresivním CO_2 rozpuštěným ve vodě je poněkud složitější, než se vzdušným CO_2 , neboť zde hraje roli tzv. **uhličitanová rovnováha** (chemická forma CO_2 v závislosti na pH vody) i rozpouštění CaCO_3 na $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$:

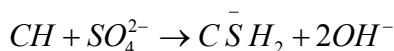


Ve stojatých vodách způsobuje agresivní CO₂ pouze vznik tenké a hutné vrstvičky CaCO₃, která brání postupu karbonatace dovnitř konstrukce. Pokud agresivní voda proudí kolem konstrukce, veškerý CaCO₃ vzniklý karbonatací se rozpouští na Ca(HCO₃)₂ a dochází ke korozi betonu. Ve vodě rozpuštěný oxid uhličitý působí degradaci, pokud je porušena rovnováha, pH > 8,3, vzniká tzv. agresivní (útočný) CO₂.

Koroze třetího druhu

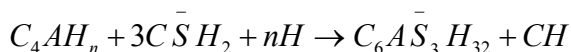
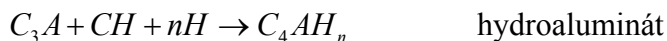
Nejčastěji se setkáváme se síranovou korozí, např. při působení spodních vod, zejména pokud je část zemin tvořena jíly, mořské vody, průmyslových odpadních vod atd. Síranová koroze představuje komplexní proces složený z řady reakcí:

1. vytvoření sádrovce



Vznik sádrovce je provázen objemovou expanzí o 17 %.

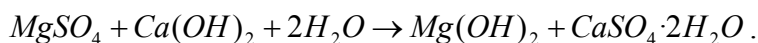
2. vytvoření hydratovaného sulfoaluminátu - ettringitu



V dalším kroku sádrovec reaguje v betonu s trikalciualuminátem C₃A (složka cementu) i jeho hydráty, např. C₃AH₆, a vodou. Tento krok se nazývá sulfoaluminátová koroze. Produktem této koroze je ettringit (3CaO.Al₂O₃.CaSO₄.32H₂O). Tato reakce je spojena s velkým nárůstem objemu až na 2,65 násobek, přičemž 32 molekul vody v ettringitu je maximum, podle podmínek vznikají i hydráty s menším množstvím vázané vody. Při těchto reakcích dochází k velkému zvětšení objemu v pevné fázi a k expanzi cementového tmelu, která vede ke vzniku vnitřních napětí až trhlin v betonu.

Ochrana proti síranové korozi spočívá především v zamezení kontaktu síranových vod s betonem. Pokud se tomuto nedá zabránit, používá se cement s nízkým obsahem C₃A (do 5 %, síranovzdorný cement). Další možností je přidavek pucolánově aktivní složky, která přednostně reaguje s Ca(OH)₂ rozpuštěným v pórové vodě a ten tedy nemůže tvořit sádrovec.

Se síranovou korozí úzce souvisí **hořečnaté rozpínání**. Hořečnaté ionty Mg^{2+} jsou obsažené v podzemních vodách a ve velkých množstvích i v mořské vodě. Soli $MgSO_4$ a $MgCl_2$ jsou dobře rozpustné, pronikají tedy do betonu a zde reagují s $Ca(OH)_2$ za vzniku nerozpustných a objemných produktů $Mg(OH)_2$ a $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (eventuelně rozpustného $CaCl_2$, závisí to na složení korozního prostředí, zejména na obsahu síranů a chloridů). Tento proces označujeme také jako „hořečnaté rozpínání“:



Kromě rozpínání způsobují hořečnaté ionty rozklad C-S-H fází za vzniku nevazebných produktů, což snižuje pevnost betonu.

Velmi častá je **solná koroze**, např. napadání betonu mořskou vodou, mineralizovanou podzemní vodou nebo „chemickými rozmrazovacími látkami“ (CHRL), což jsou roztoky nebo prášky s obsahem $NaCl$, $CaCl_2$ používané v zimě k údržbě silnic nebo na letištích. V betonu představují velké nebezpečí chloridy Cl^- , které způsobují měknutí betonu. Při vysokých koncentracích chloridů (útok CHRL) vzniká v betonu reakcí mezi rozpustnými chloridy ($NaCl$, $CaCl_2$) a C-A-H hydráty **Friedelova sůl** $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$. Tím jednak klesá vazebná schopnost cementového tmelu a jednak probíhá rozpínání Friedelovy soli.

Při korozi mořskou vodou dochází k vyluhování $Ca(OH)_2$, následnému rozpadu hydrátů C-S-H a C-A-H, síranové korozi (rozpínání sádrovce a ettringitu), hořečnatému rozpínání, krystalizaci a hydrataci vzlínajících solí v pórovém prostoru atd. Prevencí solné koroze je použití betonů s nízkou porózitou, s nízkým obsahem $Ca(OH)_2$ (docílí se přidáním pucolánově aktivní látky). Odolnost betonu také zvyšuje jeho vytvrdnutí v atmosférických podmínkách a teprve následné vystavení mořské vodě.

12.2.1.1 Koroze ocelové výztuže v betonu

Pro výztuž v železobetonových konstrukcích jsou důležité hlavně chemická, elektrochemická a interkrystalická koroze. Podle rozrušení se objevuje koroze rovnoměrně i nerovnoměrně, plošně či místně. V alkalickém prostředí (při $pH > 9,5$) se ocelová výztuž **pasivuje** tenkou vrstvou korozních produktů (zejména Fe_2O_3), které brání přístupu kyslíku k oceli, a tím zamezují její další korozi. pH pórového roztoku čerstvého betonu je díky vysokému obsahu $Ca(OH)_2$ asi 12,6. V oblasti pH 9,5 až 13 je ocel pasivována, resp. **imunizována** a korozi

nepodléhá. Snížení koncentrace OH^- iontů může nastat při energetickém zpracování betonu (hydrotermální zpracování), u silikátového betonu a pórobetonů, kde se vyváže všechny $\text{Ca}(\text{OH})_2$, při karbonataci reaguje hydroxid na uhličitán vápenatý a pH klesá na 9. Avšak díky pomalému postupu karbonatace je kvalitní (dobře zhutněný, nepopraskaný) beton o tloušťce cca 3 – 5 cm dostatečnou ochranou výztuže proti korozi (životnost minimálně 70 let).

Porušením pasivace oceli nastává oxidace, **rezivění**, spojená s objemovým nárůstem (2,5x):



Toto zvětšení objemu způsobuje odprýskání betonu od výztuže.

Na pasivaci působí nepříznivě také chloridy a sírany, kdy z nerozpustného Fe_2O_3 vznikají FeCl_3 a $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, které jsou dobře rozpustné a tedy nepasivují ocel. Vyvolávají tzv. **důlkovou korozi** v nekarbonatované oblasti nebo **odprýskání** v karbonátované oblasti. Proto bývá omezen obsah chloridů v cementu ($< 0,1\%$), v přísadách ($< 0,2\%$) i ve vodě ($< 600 \text{ mg/l}$).

Povrch výztuže je většinou znečištěn různými látkami na bázi oxidů, sulfidů atd., které způsobují elektrochemickou a strukturní nehomogenitu povrchu. Tím se tvoří za přítomnosti vody, kyslíku či roztoků solí **místní galvanické články**, při nichž se železo stává anodou a oxiduje na oxidy či hydroxidy. V alkalickém prostředí jsou tyto reakční produkty stálé a ocel se opět pasivuje. V neutrálním prostředí jsou stabilní velice málo, rozpouští se za uvolňování kyslíku, který za přítomnosti vlhkosti způsobuje další intenzivní korodování.

Při **interkrystalické korozi** postupuje koroze po hranicích krystalických zrn napjaté oceli, tzv. **koroze pod napětím**. Při oxidaci se uvolňují vodíkové ionty, které pronikají mezi krystaly oceli a tvoří trhliny vedoucí k náhlému porušení oceli. Při válcování za tepla se na povrchu oceli tvoří oxidický ochranný povlak. Korozi podporuje křehkost, zakalení a mechanické napětí oceli, vady na povrchu oceli, vnitřní pnutí a místní trhliny.

Životnost ocelové výztuže je vyšší v betonu méně pórovitém a nepopraskaném, kde je dostatečně chráněna proti pronikání kyslíku i vlhkosti, a tím před korozi. Tam, kde takto nemůžeme výztuž ochránit, musíme použít např. různé povlaky (přímá protikorozní ochrana)

nebo inhibitory koroze (chemická ochrana). Ve speciálních případech, je velmi drahá, je možné použít nerezavějící ocel na místo uhlíkové.

Přímá protikorozní ochrana se běžně uplatňuje v případě pórobetonů, kdy se výztužné sítě namáčejí do asfaltocementové kaše nebo disperzních laků a barev na bázi polymerů. Vytvořený povlak musí být dostatečně pružný, dobře soudržný s ocelí i cementovým tmelem, souvislý, hutný a nesmí zhoršovat vlastnosti výrobků při autoklávování.

U běžných betonů se volí cesta chemické ochrany, ocel reaguje s kyselinou fosforečnou, chromovou nebo se solemi alkalických kovů a pasivuje se vytvořením nerozpustné ochranné oxidické vrstvy. V betonu se běžně vytváří tzv. katodická ochrana (redukce), protože jsou přítomné ionty OH^- a snadno oxidující kovy, např. Ca. Jako inhibitory se používají dusitan a benzoan sodný, alkalické chromany, dichromany, chlorečnany, dusičnany a to v množství 1 – 2% hm. cementu. Inhibitory se doporučuje předem odzkoušet, protože mohou snižovat pevnost a časem ztrácet účinnost.

12.2.1.2 Ochrana betonu proti degradaci

Ochranu betonu proti degradaci můžeme zajistit zejména následujícími opatřeními:

- Zabezpečit kvalitu jednotlivých složek betonu, dodržovat předepsané složení a technologické zpracování betonu. Beton dobře zhutněný, s nízkou porózitou a nepopraskaný odolává mnohem více agresivnímu působení okolního prostředí.
- Odstranit detaily v provedení díla, které mohou podporovat degradaci. Čím méně je povrch členitý a čím více je hladký, tím odolnější bude.
- Použít podle potřeby zvláštní ochranu, zejména povrchovou, např. nátěry živichných látek a plastů, keramické obklady, plastové fólie, nátěry z vodního skla atd.
- Je žádoucí zamezit kontaktu s agresivními chemikáliemi (kyseliny, soli, ropné látky). Pokud bude betonová konstrukce agresivnímu prostředí vystavena, pak je možné degradaci alespoň omezit úpravou složení záměsi a technologií betonáže.

12.2.2 Degradace kamenických výrobků

V České republice se obvykle používají jako plnivo vyvřelé horniny, resp. písky a stěrky, v nichž dominují částice vyvřelin. Vyvřelé horniny jsou hutné, chemicky odolné a nepodléhají degradačním vlivům. Méně příznivá situace panuje u usazených hornin, v našich podmínkách jsou nejdůležitější pískovce, vápence a opuky. Mechanické vlastnosti usazených hornin jsou nižší v porovnání s vyvřelými. Korozní odolnost pískovců je ovlivňována jejich složením a porózitou. Vysoká poróza (kámen má velkou nasákavost) vede k výraznému poškození

kamene vlhkostí. Z hlediska složení je významný obsah uhličitanu vápenatého CaCO_3 (minerál kalcit), který snadno podléhá rozpouštění jak vlivem CO_2 ze vzduchu, tak vlivem kyselých dešťů (viz kapitola o korozním působení atmosféry).

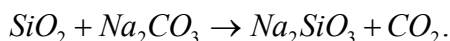
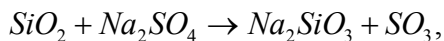
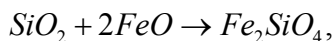
Ve vápencích (i přeměněných – mramorech) a opukách je kalcit CaCO_3 přítomen ve výrazně větším množství, než v pískovcích (ve vápencích tvoří dominantní složku, někdy spolu s MgCO_3 , který se chová stejně). Proto je i korozní odolnost vápenců a opuk nižší, než v případě pískovců. Zejména v městském prostředí se horniny s obsahem kalcitu pokrývají nevzhlednou tmavou krustou, která je tvořena zejména sádrovcem $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ a usazeným prachem.

Na odolnost a trvanlivost použité horniny má vliv také její vhodný výběr pro daný účel, způsob a doba těžby a doba prodlení do zpracování, např. použití trhaviny způsobuje vznik jemných trhlin, roztoky solí pro oddělování pravidelných bloků (roztok se lije do vyvrtaných otvorů) vedou k zasolení. Při zpracování je nebezpečná pemrlice (praskliny), mnohem šetrnější jsou moderní stroje. Důležitou roli hraje i způsob uložení kamene v konstrukci a přítomnost kovů (korozní produkty).

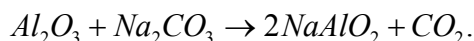
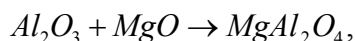
12.2.3 Degradace keramických stavebních látek

Keramické materiály se vyznačují výbornou odolností vůči chemickým vlivům atmosféry, odolávají vysokým teplotám, kyselinám (kromě HF) a do značné míry i alkáliím, díky přítomnému SiO_2 . Menší je odolnost keramických výrobků vůči fyzikální korozi, neboť jsou křehké, snadno degradují působením mrazu, vlhkosti a solí.

Při vysokých teplotách reaguje SiO_2 obsažený ve stěpu s oxidy, sírany, uhličitany a dalšími solemi:



Vyžíhaný oxid hlinitý i korund jsou velmi odolní proti kyselinám i hydroxidům, avšak při vysokých teplotách reagují s kyselými či zásaditými oxidy:

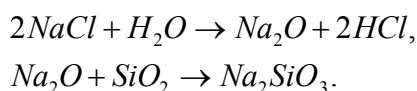


Prakticky všechny přírodní jílovité suroviny obsahují jako příměsi rozpustné soli, které při sušení difundují s vodou k povrchu výrobku, kde se po odpaření koncentrují a tvoří výkvěty. Během výpalu mohou tyto soli vytvořit různě zbarvené **sklovité vytaveniny** či dokonce určitý tzv. **samoglazovací efekt**. Nepříznivě však ovlivňují přilnavost vrstev nanášených na povrch výrobků, mohou způsobit slepování těles během výpalu nebo jejich přilepení na pálicí pomůcky. Převážně rozpustné soli tvoří sírany, a proto se do výrobní směsi přidává uhličitan barnatý (0.1 – 0.8 hm.%), který je velice málo rozpustný a reaguje se síranem na nerozpustný síran barnatý a uhličitan vápenatý. Oba produkty zůstávají ve střepu a nekonzcentrují se na povrchu. Nežádoucí příměsí je i pyrit, který se při výpalu rozkládá a ve finále se tvoří síran železitý, který po reakci s oxidem křemičitým vytvoří viskózní skelnou fázi černé barvy, tzv. **černé jádro**.

Odolnost výrobků, např. kanalizační trouby, chemická kamenina, se stanovuje tzv. **kyselinovzdorností** (OPK) a tzv. **louhovzdorností** (OPL). V prvním případě používáme zředěnou kyselinu sírovou, ve druhém hydroxid sodný. Kyselinovzdornost 97% znamená, že pouze 3% střepu se v kyselině rozpustila. Takto stanovovaná odolnost velice závisí na pórovitosti výrobků. Pronikání agresivních látek do střepu zabráníme nanášením a vypálením glazury, která je pro kapaliny nepropustná.

U cihlářských výrobků působí škodlivě tzv. **cicváry**, což je v podstatě CaCO_3 , který se rozkládá na CaO a reaguje s vlhkostí, což vede k vápenatému rozpínání a rozpadu výrobku. Dále působí potíže již v množství $> 0.06 \%$ MgSO_4 , jenž krystaluje za zvětšení objemu a způsobuje odprýskání. Rozpustné soli přítomné ve střepu způsobují výkvěty.

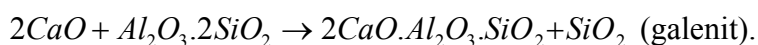
Žáruvzdorné výrobky, např. ze šamotu, degradují působením roztavené strusky, popílku, tekutých plynů a solí. Pokud, např. hnědé uhlí, obsahuje NaCl , dochází k reakci:



Vznikají lehce tavitelné křemičitany s nižšími body tání, které tvoří taveninu. V té se rozpouštějí další složky šamotu. Pro posouzení degradace žáruvzdorných materiálů je důležitá znalost jejich chemického složení, zejména chemický charakter ve srovnání s agresivní

látkou. Kyselé žárovzdorné výrobky dobře odolávají kyselým agresivním látkám a zásadité zásaditým.

Pokud vyrábíme žárobeton z portlandského cementu, je nutné použít stabilizační přísadu (mikroplnivo), která váže volné vápno (vzniklé prvním výpalem žárobetonu) z hydroxidu vápenatého. Za tímto účelem se používají křemičité a šamotové úlety, chromová ruda apod., přičemž probíhá reakce:

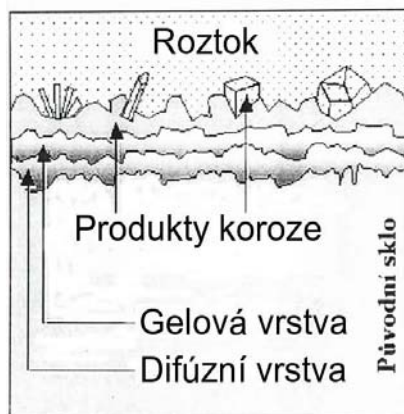


Jak anorthit, tak gehlenit stabilizují žárobeton a zamezují vzniku vápenatého rozpínání.

12.2.4 Degradace stavebního skla

Sklo vykazuje dobrou odolnost téměř proti všem chemikáliím (kromě HF, leptání skla). Není však příliš stabilní vůči vodným roztokům. Působením neutrálních a kyselých roztoků ze z povrchu skla vyluhují alkálie, dochází k výměně iontů za H^+ a vzniká vrstva obohacená o SiO_2 , která zpomaluje a omezuje další napadání skelné sítě. Rychlost vyluhování se řídí difúzí (efektivní difúzní koeficient D) a klesá s odmocninou času. Pokud sklo přijde do styku s alkalickým roztokem ($pH > 12$), dochází k rozpouštění skelné sítě jako celku a to poměrně velkou rychlostí, lineárně s časem.

U okenního skla vystaveného povětrnosti se povrchová vrstva obohacená o alkálie neustále omývá, tudíž dochází ke zlepšení povrchu skla. Pokud však na sklo působí vlhkost neustále (lázně, skleníky apod.), tvoří se na povrchu matné až neprůhledné mapy tvořené nerozpustnými křemičitany $Ca - Na$ a křemičitým gelem, viz Obr. 12.7.



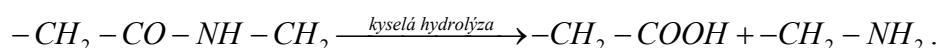
Obr. 10.5 Korozní působení roztoků na sklo.

Odolnost skla stanovujeme normovými zkouškami, stanovuje se odolnost skleněné drti proti vodě při 98°C, odolnost vnitřních povrchů nádob proti vodě, odolnost proti kyselinám a alkáliím. První stupeň odolnosti vůči kyselinám má sklo, když se po 6 h působení 20.4 % HCl vyluhuje < 0.7 mg/dm², obdobně první stupeň odolnosti proti hydroxidům, když se po 3 h působení roztoku NaOH/Na₂CO₃ vyluhuje < 75 mg/dm².

Na bázi fosforečnanů (75% P₂O₅, 20% Al₂O₃, 5% ZnO+PbO+BeO) vyrábíme skla odolná vůči HF, nemají tedy skelnou síť O – Si – O.

12.2.5 Degradace polymerů

Polymery zahrnují širokou škálu materiálů s velice rozdílnými vlastnostmi. Odolnost polymerů vůči degradaci závisí na jejich složení a technologii výroby i na použití aditiv. Obecně se dá říci, že polymery jsou vysoce chemicky odolné a často se používají k protikorozi ochraně jiných materiálů. Odolnost vůči vyšším teplotám (nad 100° C) bývá nízká, neboť polymery obvykle měknou a taví se, ztrácí své mechanické vlastnosti a při vyšším zahřívání se snadno zapalují. UV záření způsobuje přerušení polymerního řetězce, a tím ztrátu mechanických vlastností. Biodegradace polymerů je způsobována plísněmi, které využívají polymer, nebo organická aditiva v něm, jako zdroj energie a stavebních prvků. Nebezpečné jsou i produkty jejich metabolismu, které mohou materiál poškozovat chemicky. Specifikem polymerů je **mechanická degradace** neboli opakovaná mechanická deformace (ohýbání, mačkání) za přítomnosti kyslíku, která způsobuje přerušování polymerního řetězce. Chemické působení způsobuje štěpení makromolekulárních řetězců, např. hydrolýza polyamidů za vzniku aminů a karboxylových kyselin:

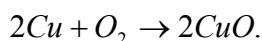
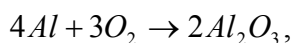
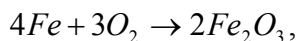


Korozní odolnost polymerů ovlivňuje jejich **polarita**, polární řetězce odolávají vodným roztokům méně než nepolární, odolnost zvyšuje rostoucí krystalický podíl, naopak přítomnost dvojných vazeb vede ke zhoršení odolnosti a to zejména vůči působení oxidačních činidel. Přítomnost halogenů ve struktuře polymerů zvyšuje jejich odolnost, typickým příkladem je polytetrafluorethylen (TEFLON).

12.2.6 Degradace kovových materiálů

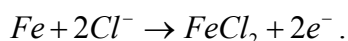
Čistě chemická koroze bez účasti vlhkosti je v případě kovových materiálů poměrně vzácná; probíhá např. v tepelných výměnících, kde je ocel vystavena zvýšené teplotě a reaguje s kyslíkem na oxid.

Při styku kovu s plynným kyslíkem dochází k oxidaci:

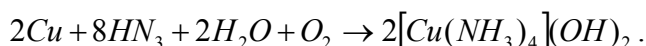


Tyto reakce probíhají velice pomalu, významné jsou až při zvýšených teplotách. Rychlost oxidace je řízena rychlostí transportu kyslíku a/nebo kovu přes oxidickou vrstvu, která se tvoří na povrchu kovu. Oxidická vrstva může být porézní, odprýskávat a mít špatnou přilnavost k základnímu kovu, např. u železa, nebo tvoří hutnou a kompaktní ochrannou vrstvu, která dobře chrání povrch kovu, např. oceli.

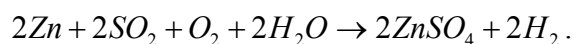
Kovové materiály velice dobře odolávají organickým rozpouštědlům. Koroze je ve značné míře ovlivněna hodnotou pH působícího roztoku. Soli vlivem hydrolyzy tvoří také kyselé nebo zásadité roztoky, které jsou agresivní, s kovy tvoří rozpustné soli Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- atd. Železo se rozpouští v kyselině chlorovodíkové a sírové, dusičná ho pasivuje, chloridy a sírany (sádra, hořečnatá maltovina apod.) tvoří rozpustné soli:



Měď na svém povrchu vytváří pozvolna vrstvu složenou z červeného Cu_2O , za vyšších teplot vzniká černý CuO , který lehce odprýskává, na vzduchu se pokrývá patinou z $Cu(OH)_2 \cdot CuCO_3$. Opatrnost je potřeba věnovat při jejím použití v místech, kdy působí amoniak, např. stáje, vzniká totiž rozpustný tetraminměďnatý:

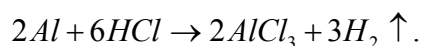


Zinek se pokrývá na povrchu ihned pasivační vrstvou oxidu a hydroxid – uhličitanu $ZnO + Zn_2CO_3(OH)_2$. Zinek se lehce rozpouští v kyselinách a hydroxidech (amfoterní charakter), na vzduchu je napadán SO_2 , v půdě Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- :

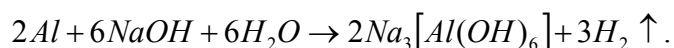


Na povrchu zinku se může objevit bílá rez, pokud je vystaven působení vlhkosti bez přístupu CO_2 . Její vrstva je velmi pórovitá a špatně lpící, je nejlépe ji odstranit mechanicky. Vápenná a sádrová malta zinek napadají lehce a stejnoměrně, foukané asfalty poněkud více, obsahují totiž oxidační produkty.

Hliník je proti působení oxidujících kyselin stálý, ostatní ho rozpouští:

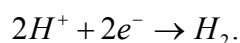


Hliník není stálý vůči kyselým exhalacím, mořské vodě a hydroxidům:



Proto by neměl přijít do styku s alkalicky reagujícími stavebními látkami (nutný nátěr), koroduje při styku s hořčnatou maltovinou.

Korozním prostředím pro kovy je zejména atmosféra, voda a půda. Ve všech těchto prostředích degradují kovové materiály tzv. **elektrochemickou korozi**, kdy na materiál působí jak kyslík ze vzduchu, tak vlhkost. Podstatou elektrochemické koroze je oxidačně – redukční reakce probíhající na povrchu korodujícího materiálu. Pro oxidačně – redukční korozní reakci je typické, že probíhá na dvou místech: **na anodě oxidační reakce a na katodě redukční reakce**. Korodující kov je vždy anodou – oxiduje se, ztrácí elektrony, někdy se rozpouští. Ve vodném prostředí se vždy redukuje vzdušný kyslík, v kyselém prostředí vodík:



Korozní článek, kromě anody a katody, tvoří také elektrolyt spojující oba články (většinou vodný roztok) a elektronový vodič (vlastní korodující kov). Počet elektronů uvolněných při oxidaci se musí rovnat počtu elektronů přijatých při redukci. Hnací silou koroze je rozdíl **elektrochemických potenciálů** mezi anodou a katodou. Elektrochemický potenciál kvantifikuje typ kovu a složení elektrolytu. Oblast s vyšším elektrochemickým potenciálem se chová jako katoda (redukce), oblast s nižším potenciálem se chová jako anoda (probíhá

oxidace kovu neboli koroze). Kovy můžeme sestavit do **elektrochemické řady kovů**, což je posloupnost jejich standardních potenciálů (od nejnižšího potenciálu k nejvyššímu), přičemž nejnižší potenciál znamená **teoreticky** nejsnazší korozi:

Mg – Al – Zn – Cr – Fe – Co – Ni – Sn – Pb – Cu – Ag – Au.

Kovy stojící více vpravo se také označují jako **ušlechtlejší**.

Z takto napsané řady vyplývá, že např. hliník by měl korodovat snadněji, než železo. Z praxe však víme, že je tomu naopak. Je to způsobeno pasivací, např. hliník se na vzduchu rychle (za několik minut) oxiduje, pokryje se vrstvičkou Al_2O_3 , která je ale kompaktní a brání pronikání kyslíku a vlhkosti k dosud nezkorodovanému kovu, který pokrývá. Takto pasivovaný, chráněný, hliník má neomezenou životnost. Naopak železo (ocel) se na vzduchu a dešti rovněž za několik dní pokryje vrstvou korozních produktů, ale tato vrstva není pasivní, protože není natolik kompaktní, aby ochránila zbytek předmětu před korozi. **Korozivzdorné (nerez) oceli** obsahují několik procent chrómu, který na jejich povrchu vytváří pasivní vrstvu Cr_2O_3 . Litiny mají rovněž dobrou korozní odolnost. **Zinek a měď** se v atmosférických podmínkách trvale **pasivují** nerozpustnými alkalickými uhličitany (měděnka, $\text{ZnCO}_3 \cdot \text{Zn(OH)}_2$), proto se často používají jako ochranné povlaky na ocelových předmětech. Titan je rovněž korozně odolný, díky pasivní vrstvě TiO_2 .

Častým problémem je vznik **elektrochemického makročlátku** na rozhraní dvou materiálů. Tak např. při spojení ocelové konstrukce a měděného okapu **se ocel** díky nižšímu potenciálu **začne chovat jako anoda a začne korodovat**, na mědi probíhá katodický proces (redukce kyslíku), který ji nijak nepoškozuje. Proto se musí dávat pozor na spojení dvou rozdílných materiálů (nespojovat ocelové plechy mosaznými šrouby).

Konstrukce ponořené přímo do vody rovněž korodují mechanismem elektrochemické koroze, protože voda obsahuje rozpuštěný kyslík. V mořské vodě je koroze obecně rychlejší, neboť přítomné ionty způsobují vznik rozpustných korozních produktů, kdy nevznikají pasivní vrstvy korozních produktů na bázi oxidů a hydroxidů. Koroze kovových konstrukcí v půdě závisí na vlastnostech půdy, nejvíce však na obsahu vody a v ní rozpuštěných solí. Nejagresivnější jsou kyselé lesní půdy, naopak působí písčité půdy. Zvláštním druhem korozního prostředí je půda v blízkosti tramvajových tratí nebo železnic elektrifikovaných

stejnoseměrným proudem. Touto půdou probíhají **bludné elektrické proudy** (zejména pokud je vlhká), které mohou poškodit špatně izolované potrubí vedené v blízkosti trati.

Protikorozní ochrana kovových materiálů spočívá především ve **volbě vhodného materiálu** pro dané podmínky a v úpravě povrchu materiálu, např. **hladké** nebo **vyleštěné** kovové plochy jsou odolnější, než povrchy hrubé. Při navrhování konstrukce je dobré vyvarovat se míst, kde se delší dobu hromadí voda. Tzv. **energetické vodní oběhy** (vodní okruhy elektráren a tepláren) se chrání proti korozi cíleným snižováním koncentrace kyslíku a solí ve vodě a dále pomocí **inhibitorů koroze**, (organické látky pokrývající povrch tenkou ochrannou vrstvou nebo anorganická oxidační činidla.

Povrch kovový materiálu můžeme ochránit několika způsoby. **Pasivní** metody ochrany jsou založeny na aplikaci nátěru, **aktivní** na elektrochemické ochraně. Nejběžnější jsou různé nátěry na bázi organických polymerů, dále smalty, eloxování (elektrochemická oxidace povrchu Al) a pokovování (žárové a elektrochemické nanášení vrstvy ušlechtlejšího kovu, např. Cu, Zn, Cr, Ni). Aktivní elektrochemická protikorozní ochrana kovových konstrukcí spočívá v jejich **polarizaci**, tzn. vložení kladného nebo záporného elektrochemického potenciálu, a tím k řízenému ovlivnění korozních dějů, např. Mg jako obětovaná anoda v elektrických ohřívacích vody, bojlerech, grafit nebo slitina Fe – Si (ferrosilicium) při ochraně ropovodů a plynovodů, atd.

Použitá literatura

- Ann 1976, Structural Thermoplastic Foams, Europ, Plastic News, 11, s. 43-44.
- Aitein P. C. 2005, Vysokohodnotný beton, Informační centrum ČKAIT, Praha.
- Balík M. a kolektiv 2005, Odvlhčování staveb, Grada Publishing a.s.
- Bareš R. A. 1988, Kompozitní materiály, SNTL, Praha, 325 s.
- Bartovská L., Šišková M. 2005, Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav, VŠCHT Praha.
- Bartkus E. J., Kroekel C. H. 1970, Low shrink reinforced polyester system, Polyblends and composites, New York, 113 s.
- Binko J., Kašpar I. 1983, Fyzika stavebního inženýra, SNTL, ALFA.
- Březinová D., Bukovanská M., Dudková I., Rybařík V. 1996, Praha kamenná, Národní muzeum, Praha, 287s.
- Colleparidi M. 2009, Moderní beton, ČKAIT, Praha.
- Czernin W. 1980, Cement Chemistry and Physic for Civil Engineers, Bauverlag GMBH, Berlin.
- Černý R. 1993, Fyzika – transportní jevy, ČVUT v Praze.
- Černý, R., Rovnaníková, P. 2002, Transport Processes in Concrete, Spon Press, London.
- Drahokoupilová A. 1975, Fyzikální základy struktury látek, ČVUT v Praze.
- Ducháček V. 2006, Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování, použití, VŠCHT Praha, 278s.
- Feldman R. F., Sereda P. J. 1970, A new model for hydrated Portland cement paste and its practical implications, Eng. J. (Canada) 53, 8/9, s. 53-59.
- Haisová E. 1988, Rekonstrukce kamenných objektů z kamene narušeného vnějšími vlivy, Diplomová práce, ČVUT v Praze, 142 s.
- Henning O., Lach V. 1983, Chemie ve stavebnictví, SNTL Praha.
- Chawla, K. K. 1988, Composite materials, Science and Engineering, Springer-Verlag, New York.
- Illston J. M., Domone P. L. J. 2007, Construction materials, Spon Press, Taylor & Francis Group, New York.
- Javitz A. E. 1965, Design, 64 s.
- Jirásek J., Vavro, M. 2008, Nerostné suroviny a jejich využití, Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

- Jiříčková M. 2004, Application of TDR Microprobes, Minitensiometry and Minihygrometry to the Determination of Moisture Transport and Moisture Storage Parameters of Building Materials, Czech Technical University, Prague.
- Jursík F. 2001, Anorganická chemie nekovů, VŠCHT v Praze.
- Kratochvíl B., Švorčík V., Vojtěch D. 2005, Úvod do studia materiálů, VŠCHT, Praha.
- Kopytko W. 1974, Základní předpoklady pro výrobu strukturních a integrálních pěn vytlačováním, Plasty a kaučuk, 11/ 7, s. 204-208.
- Kotlík P., Šrámek J., Kaše J. 2000, Opuka. Nakl. STOP, Praha, 109 s.
- Kotlík P., Heidingsfeld V., Bláha J., Vaněček I. 2007, Stavební materiály historických objektů, VŠCHT, Praha.
- Kratochvíl B., Švorčík V., Vojtěch D. 2005, Úvod do studia materiálů, VŠCHT v Praze, Praha, 190 s.
- Mai Y. W. 1980, Performance evaluation of sandwich panels, „Matériaux et Construction“, 75, s. 159-167.
- Malier Y. 1992, High Performance Concrete, Spon Press, London.
- Martin K. G., Souprounovich A. N. 1972, Rigid Foam Plastics, Report 07 of DBR, CSIRO Australia, 2-3, 29 s.
- Matoušek M., Drochytka R. 1998, Atmosférická koroze betonů. IKAS, Praha.
- Midness S., Young F. F., Darwin D. 2003, Concrete, second edition, Prentice Hall.
- Mleziva J., Šňupárek J. 2000, Polymery, Sobotáles, Praha, 537 s.
- Powers T. C. 1958, Structure and Physical Properties of Hardened Cement Paste, J. Am. Cer. Soc., 41, s. 1 – 6.
- Powers T. C. 1958, The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete, Research and Develop. Bull. Of Portland Cement Ass. Skokie, No. 90.
- Petránek J. 1963, Usazené kameny, Nakl. Ak. Věd. Praha, 718 s.
- Ptáček L. a kol., 1999, Nauka o materiálu II, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 350 s.
- Přikryl R., Smith B. J. 2007, Building Stone Decay, Geolog. Soc., London, 330 s.
- Ritchie P. D. 1965, Physics of Plastics, Plastics Inst., Univ of Strathclyde, 447 s.
- Rovnaníková P., Rovnaník P., Křístek R. 2005, Stavební chemie, CERM.
- Rybařík V. 1994, Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky, Nadace průmyslové školy kamenické, Hořice, 218 s.
- Rybařík V. 2000, Národní památník na Žižkově, Kámen, 1, s.13-22.

- Seidlerová I., Dohnálek J. 1999, Dějiny betonového stavitelství, Informační centrum ČKAIT, Praha.
- Schulze W. a kol. 1990, Necementové malty a betony, SNTL Praha, 1990, 271 s.
- Svoboda L. a kol. 2004, Stavební hmoty, JAGA Group s.r.o., Bratislava.
- Škvára F. 2003, Chemie a technologie anorganických pojiv II, Ústav skla a keramiky VŠCHT, Praha.
- Tobolka Z. 1979, Zkoušení stavebních hmot, ČVUT v Praze.
- Valenta L. 2007, Keramická příručka, Silikátový svaz.
- Vojtěch D. 2006, Kovové materiály, VŠCHT Praha.
- Vörös F., Malý J. 1972, Strukturní polystyrénové pěny, Plastické hmoty a kaučuk, 10, s. 297-302.
- Wichterle O. 1950, Obecná a anorganická chemie, Přírodovědecké nakladatelství.
- Wichterle O. 1952, Technologie plastických hmot, SNTL Praha, 135 s.
- Williams J. G. 1980, Stress analysis of polymers, E. Horwood Lim., England, 360 s.
- Winkler E. M. 1975. Properties, Durability in Mans Enviroment, Springer Verlag, Sien.
- Zdravkov B., Čermák J. J., Janků J., Kučerová V., Šefara M. 2008, Kategorizace pórů v porézních matricích, Chemické listy 102, s. 434 – 438.

Obsah

1	PODSTATY STAVEBNÍCH HMOT	4
1.1	Stavba atomů	4
1.1.1	Atomové jádro	5
1.1.2	Atomový obal	5
1.1.3	Rozdělení prvků podle elektronové konfigurace, periodická tabulka prvků	10
1.2	Chemická vazba, fyzikálně-chemická vazba	12
1.2.1	Kovalentní (atomová) vazba	13
1.2.2	Polarizovaná kovalentní vazba	17
1.2.3	Vazba iontová (elektrovalence)	19
1.2.4	Vazba kovová	20
1.2.5	Vazba vodíková (vodíkový můstek)	22
1.2.6	Van der Waalsovy síly	24
1.3	Rozdělení a vlastnosti čistých látek	25
2	SKUPENSKÉ STAVY LÁTEK	27
2.1	Plynné skupenství	27
2.2	Kapalné skupenství	30
2.2.1	Disperzní soustavy	34
2.3	Pevné skupenství	36
2.3.1	Amorfni pevné látky	38
2.3.2	Krystalová struktura pevných látek	39
2.3.3	Poruchy krystalové struktury	44
2.3.4	Difúzní pochody v pevných látkách	47
3	FÁZOVÉ SLOŽENÍ	48
3.1	Základní pojmy	48
3.2	Kritérium rovnováhy	49
3.3	Jednosložkové fázové systémy	51
3.3.1	Rovnováha mezi kapalnou a parní fází	52
3.4	Dvousložkové fázové systémy	52
3.5	Třísložkové fázové systémy	54
4	VYBRANÉ VLASTNOSTI REÁLNÝCH STAVEBNÍCH HMOT A JEJICH VZTAH KE STRUKTUŘE LÁTEK	56
4.1	Textura a struktura materiálů	58
4.2	Základní fyzikální vlastnosti stavebních hmot	61
4.2.1	Objemová hmotnost	61
4.2.2	Hustota	62
4.2.3	Hutnost	64
4.2.4	Pórovitost	65
4.2.5	Zrnitost	70
4.2.6	Měrný povrch	73
4.3	Vlhkostní vlastnosti stavebních hmot	73
4.3.1	Vlhkost – základní veličiny a vztahy	75
4.4	Tepelné vlastnosti materiálů	89
4.4.1	Součinitel tepelné vodivosti, měrná tepelná vodivost	91
4.4.2	Tepelná kapacita	95
4.4.3	Teplotní délková a objemová roztažnost	97
4.4.4	Tepelně technické vlastnosti	99
4.5	Akustické vlastnosti stavebních materiálů	99
4.5.1	Zvuková pohltivost a průzvučnost	100

4.5.2	Materiály pro neprůzvučné konstrukce	102
4.6	Mechanické vlastnosti materiálů	102
4.6.1	Pevnost v tahu	103
4.6.2	Pevnost v tlaku	103
4.6.3	Pevnost v ohybu, pevnost v tahu za ohybu	104
4.6.4	Modul pružnosti	104
5	STAVEBNÍ KÁMEN	106
5.1	Význam stavebního kamene z pohledu historie a současných možností uplatnění	
	Definice skla.....	107
5.2	Vztah mezi strukturou kamenů a jejich fyzikálními vlastnostmi	116
5.3	Faktory degradace stavebních kamenů a sanace poruch na stavbách	122
5.4	Konzervace a konsolidace narušených kamenů	126
6	BETON – VZTAH MEZI STRUKTUROU A VLASTNOSTMI	131
6.1	Vývojové etapy výroby betonu.....	133
6.2	Výroba portlandského cementu	136
6.3	Základní druhy cementů	141
6.4	Vznik porézní struktury betonu	146
6.5	Hydratace Portlandského cementu	146
6.5.1	Indukční perioda hydratace cementu.....	147
6.5.2	Druhá perioda hydratace cementu.....	149
6.5.3	Třetí perioda hydratace cementu	149
6.6	Struktura betonu	151
6.7	Voda v hydratovaném cementovém pojivu	153
6.8	Póry v hydratovaném cementovém pojivu	154
6.9	Zpracovatelnost betonové směsi.....	157
6.10	Vliv porézního prostoru na vlastnosti betonu	160
6.10.1	Vliv pórovitosti na pevnost betonu	160
6.10.2	Vliv pórovitosti na tepelnou vodivost betonu	162
6.10.3	Vliv pórovitosti na propustnost betonu	163
6.10.4	Vliv teploty hydratace na porézní strukturu betonu	163
6.10.5	Vliv působení vysokých teplot na porézní strukturu cementového pojiva	164
6.10.6	Vliv působení nízkých teplot na porézní strukturu betonu	167
6.11	Příspěvky do betonu.....	169
7	VYSOKOPEVNOSTNÍ A VYSOKOHODNOTNÝ BETON	177
7.1	Řízené tvrdnutí cementového pojiva	178
7.2	Zvyšování pevnosti betonu	179
7.3	Vysokohodnotný beton (HPC)	181
7.4	Betony ultravysokých pevností	184
8	LEHČENÉ HMOTY	186
8.1	Technologické postupy výroby lehčených hmot	187
8.2	Plynobeton.....	189
8.3	Polymerní lehčené hmoty	190
8.4	Sendviče.....	193
8.5	Konstrukční pěny.....	196
9	POLYMERY	200
9.1	Klasifikace polymerů.....	200
9.2	Vztah mezi strukturou a vlastnostmi	201
9.3	Struktura a tepelná odolnost	205
9.4	Struktura a odolnost proti povětrnosti	205
9.5	Struktura a hořlavost polymerů	206

9.6	Modifikace struktury změkčovadly	206
9.7	Hlavní směry uplatnění polymerů	207
9.8	Vyztužené polymery	208
9.9	Plastbetony	210
10	KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	213
10.1	Proměnné definující vlastnosti kompozitů	216
10.2	Rozdělení kompozitů	217
10.2.1	Kompozity s kovovou maticí	219
10.2.2	Keramické matrice	220
10.2.3	Silikátové matrice	220
10.2.4	Polymerní matrice	221
10.3	Vláknové výztuže kompozitů	223
10.4	Vláknobetony	225
11	TECHNICKÉ SKLO	227
11.1	Definice skla	228
11.2	Klasifikace anorganických skel podle složení	229
11.2.1	Prvková skla	229
11.2.1	Oxidová skla	230
11.3	Základy sklářské technologie	231
11.3.1	Vlastnosti křemičitých skel	234
11.4	Hlavní typy stavebních skel a jejich použití	238
12	DEGRADACE STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ	243
12.1	Typy degradace	243
12.1.1	Vnitřní degradační působení	244
12.1.2	Vnější degradační působení	248
12.2	Degradace vybraných stavebních materiálů	260
12.2.1	Degradace betonu	260
12.2.2	Degradace kamenických výrobků	269
12.2.3	Degradace keramických stavebních látek	270
12.2.4	Degradace stavebního skla	272
12.2.5	Degradace polymerů	273
12.2.6	Degradace kovových materiálů	274
	Použitá literatura	278