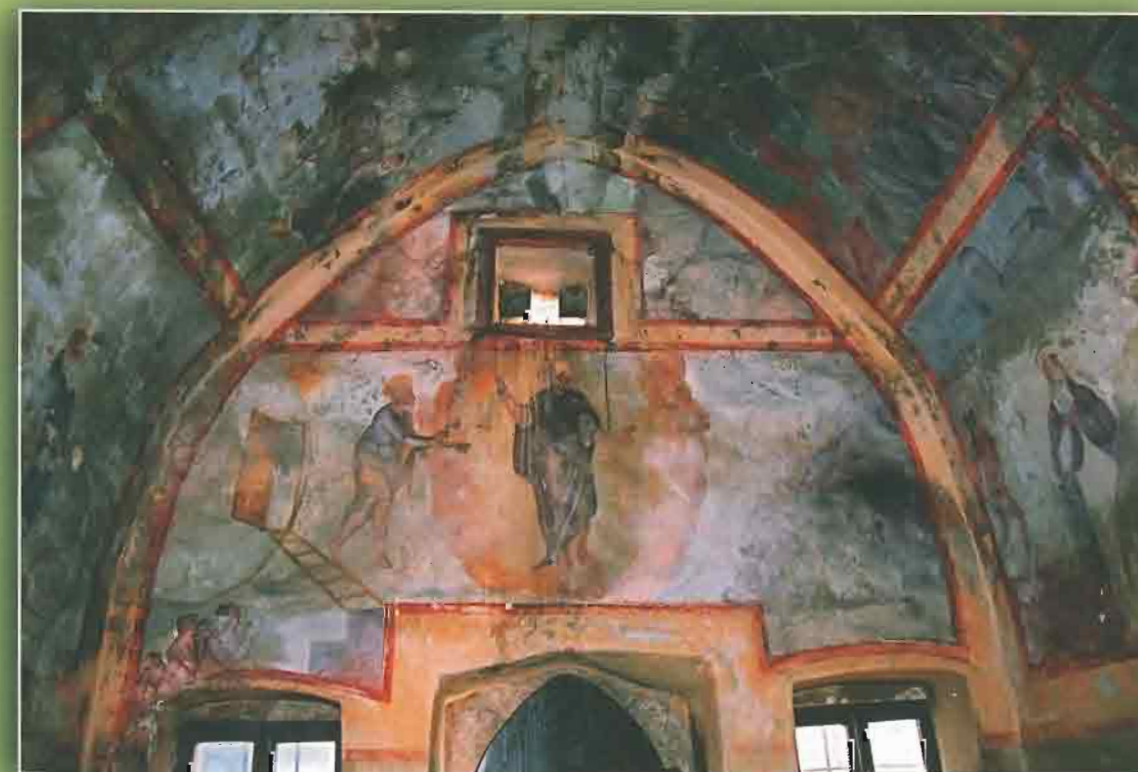


MALA BIBLIOTEKA GODIŠNJAKA ZAŠTITE SPOMENIKA KULTURE

Hrvoje Malinar

**VLAGA
U POVIJESNIM GRAĐEVINAMA**

Sistematika • Dijagnostika • Sanacija



Hrvoje Malinar VLAGA U POVIJESNIM GRAĐEVINAMA

Zagreb, 2003

HRVOJE MALINAR
VLAGA U POVIJESNIM GRAĐEVINAMA
Sistematika • Dijagnostika • Sanacija

MALA BIBLIOTEKA GODIŠNJAKA ZAŠTITE SPOMENIKA KULTURE HRVATSKE
Svezak 11
THE PRESERVATION OF CULTURAL HERITAGE IN CROATIA
ANNUAL
SPECIAL EDITION Vol. 11

Izdavač: Ministarstvo kulture – Uprava za zaštitu kulturne baštine
Published by the Ministry of Culture – Department for the Protection of the Cultural Heritage

Uređuje redakcija Godišnjaka zaštite spomenika kulture Hrvatske
Edited by the Editorial Board of the Annual

Glavni i odgovorni urednik/*Editor-in-Chief*:
Bianka Perčinić Kavur

Tajnik i izvršni urednik/*Secretary and Managing Editor*:
Gordana Božić-Goldstein

Recenzenti/*Referees*:
Ivo Maroević, Branka Penzar

Lektor/*Language Editor*:
Tomislav Salopek

Korektor/*Proof Reader*:
Danka Starčević

Prijevod na engleski/*English Translation*:
Graham McMaster

Grafička oprema/*Graphic Design*:
Nedeljko Šević

Kompjutorska priprema/*Computer Layout*:
D&N d.o.o., Zagreb

Adresa uredništva/*Editorial Address*
Ministarstvo kulture Uprava za zaštitu spomenika kulture
HR – 10 000 Zagreb, Ilica 44

Naklada/*Print run*:
1000

Tiskanje dovršeno/*Printing completed*:
srpanj/*July* 2003.

Tisak/*Printed by*:
GIPA, Zagreb

ISBN 953-6240-21-1

CIP – Katalogizacija u publikaciji
Nacionalna i sveučilišna knjižnica – Zagreb
UDK 72.025
699.82

MALINAR, Hrvoje

Vlaga u povijesnim građevinama : sistematika, dijagnostika, sanacija / Hrvoje Malinar. - Zagreb : Ministarstvo Republike Hrvatske, Uprava za zaštitu kulturne baštine, 2003. - (Mala biblioteka Godišnjaka zaštite spomenika kulture Hrvatske ; sv. 11)

Bibliografija. – Kazalo. – Summary.

ISBN 953-6240-21-1

I. Spomenici kulture – Hrvatska – Zaštita
II. Građevinski objekti – Zaštita od vlage

430604202

MALA BIBLIOTEKA GODIŠNJAKA ZAŠTITE SPOMENIKA KULTURE HRVATSKE

ISSN 1333-4190

HRVOJE MALINAR

VLAGA U POVIJESNIM GRAĐEVINAMA

Sistematika • Dijagnostika • Sanacija

Zagreb, 2003.

SADRŽAJ

PREDGOVOR	7	1.3. Kondenzna vlaga	29
UVOD	9	1.3.1. Vlaga zraka kao uvjet za kondenzaciju: apsolutna i relativna vlaga; rosište	29
1. VRSTE VLAGE U GRAĐEVINAMA I NJIHOVO PODRIJETLO	11	1.3.2. Kondenzacija nastala zimi u grijanom prostoru sa slabom termoizolacijom zida	32
1.1. Likvidna vlaga	13	1.3.3. Kondenzacija nastala u proljeće u negrijanom prostoru	33
1.1.1. Kapilarna (uzlazna) vlaga	13	1.3.4. Kondenzacija u strukturi zida (intersticijalna kondenzacija)	34
1.1.2. Prodori kiše	17	1.3.5. Kondenzacija inicirana	34
1.1.3. Curenje neispravnih vodnih instalacija	19	1.3.6. Kondenzacija uzrokovana nazočnošću mnoštva ljudi u zatvorenom prostoru	34
1.2. Higroskopna vlaga	20	1.3.7. Cirkulacija zraka u zatvorenom prostoru i utjecaj na kondenzaciju ili sušenje zida	35
1.2.1. Topljive soli i njihovo štetno djelovanje na građevinske materijale	20	2. DIJAGNOSTIKA	37
1.2.2. Higroskopna vlaga kao posljedica soli dospjelih u zid kapilarnom vlagom 22		2.1. Vizualni pregled mogućih izvora vlage	37
1.2.3. Higroskopna vlaga uzrokovana inicijalnim solima	23	2.2. Instrumentalna mjerenja i analize ...	40
1.2.4. Higroskopna vlaga uzrokovana uporabom morskog pijeska za žbuke i mortove	24	2.2.1. Određivanje poroznosti tvari od koje je građen zid	40
1.2.5. Higroskopna vlaga uzrokovana uporabom portland-cementa	24	2.2.2. Određivanje sadržaja vlage u zidu ..	41
1.2.6. Higroskopna vlaga uzrokovana aerosolom	25	2.2.3. Određivanje maksimalne moguće vlage u zidu	43
1.2.7. Higroskopna vlaga od soli za zimskog posipavanja cesta	28	2.2.4. Određivanje higroskopnog (ravnotežnog) sadržaja vlage u zidu ..	43
1.2.8. Higroskopna vlaga od soli animalnog podrijetla	28	2.2.5. Određivanje stupnja provlaženosti zida	44
1.2.9. Higroskopna vlaga od soli unesenih u zid uporabom neadekvatnih tvari za konzerviranje	29	2.2.6. Određivanje preostale sposobnosti upijanja u zidu	44

2.2.7. Mjerenje vodoupojnosti zida Karstenovim cilindrima	44	3.2.3. Sanacija higroskopne vlage papirnatom pulpom	64
2.2.8. Mjerenje razine vode	44	3.2.4. Sanacija higroskopne vlage apsorpcijskim glinama i srodnim materijalima	65
2.2.9. Trasiranje vode	44	3.2.5. Sanacija higroskopne vlage elektrokinetičkim metodama	66
2.2.10. Mjerenje temperature i relativne vlage zraka, temperature zida i određivanje rosišta	45	3.2.6. Sanacija higroskopne vlage kemijskim putem	67
2.2.11. Mjerenje i trasiranje zračnih strujanja	47	3.2.7. Saniranje higroskopne vlage sanirnim žbukama	69
2.2.12. Kemijske analize štetnih soli u zidu, zraku i kišnici	48	3.2.8. Sanacija higroskopne vlage klimatizacijom	69
2.3. Sinteza rezultata istraživanja i izrada sanacijskoga elaborata	51	3.2.9. Saniranje higroskopne vlage vakuumiranjem	71
3. SANACIJSKI POSTUPCI	53	3.3. Sanacija kondenzne vlage	71
3.1. Sanacija likvidne vlage	53	3.3.1. Sanacija kondenzne vlage u grijanom prostoru sa slabom toplinskom izolacijom	71
3.1.1. Sanacija kapilarne vlage	53	3.3.2. Sanacija kondenzne vlage nastale u proljeće u negrijanom prostoru ...	71
3.1.1.1. Drenaža i zračni kanali	53	3.3.3. Sanacija ostalih oblika kondenzne vlage	73
3.1.1.2. Mehanički postupci za horizontalnu hidroizolaciju	54	4. ZAKLJUČAK	75
3.1.1.3. Kemijska horizontalna hidroizolacija	55	LITERATURA	77
3.1.1.4. Isušivanje zida	58	SUMMARY	79
3.1.1.5. Vertikalna hidroizolacija	58	RJEČNIK	80
3.1.1.6. Hidroizolacija poda	59	KAZALO POJMOVA	84
3.1.1.7. Elektrofizikalne metode	60		
3.1.2. Sanacija prodora kiše	62		
3.1.3. Sanacija vlage od curenja neispravnih vodnih instalacija	63		
3.1.4. Sanacije od visoke plime i poplava .	63		
3.2. Sanacija higroskopne vlage	63		
3.2.1. Sanacija higroskopne vlage četkanjem i ispiranjem	64		
3.2.2. Sanacija higroskopne vlage žrtvovanom žbukom	64		

PREDGOVOR

Ova je knjiga namijenjena prije svega stručnjacima iz konzervatorsko-restauratorske struke iz različitih ustanova koje se bave zaštitom spomenika kulture, ali i privatnim restauratorskim radionicama. Vjerujem da će koristiti projektantima i izvođačima sanacije vlage, kao i osobama koje provode nadzor nad takvim radovima. Ona može poslužiti kao podsjetnik dobro upućenima u problematiku vlage, ali i kao priručnik, pa možda i kao udžbenik, za one koji su vrlo malo ili nikako informirani o tom području.

Ovdje se ne ulazi duboko u teoriju raznih procesa kojima se objašnjava mehanizam propadanja materijala ili njegove sanacije. Teorija je izložena samo u opsegu koji će vjerojatno biti dovoljan za razumijevanje spomenute problematike. Prednost je dana primjeni koja se temelji na teoriji, ali i na iskustvu. Zahtjevniji čitatelj, kojega zanimaju detalji iz teorije, upućen je na referentnu literaturu koja je dana na kraju knjige. U ovom se priručniku ne razmatraju zdravstveni aspekti stanovanja u vlažnoj kući, ali borba za suhu kuću ujedno je i borba za očuvanje zdravlja ljudi.

Rad je pisan na temelju osobnog iskustva i znanja skupljanog tijekom trideset godina rada u konzervatorsko-restauratorskoj struci. Pri tome sam se konzultirao i svom dostupnom stručnom literaturom s toga područja, domaćih i stranih svjetski poznatih autora. Budući da je ovo prvi sustavno napisani priručnik o vlazi na hrvatskome jeziku, sigurno su učinjeni neki propusti i pogreške. Nadam se da će unatoč tomu biti koristan čitateljima, a autor će biti zahvalan na konstruktivnim primjedbama i sugestijama koje bi mogle pomoći pri mogućoj izradi idućeg izdanja.

UVOD

Građevinski materijali, opeka, mort, žbuka i kamen, podložni su različitim procesima starenja i uništenja. Pri tome je najčešći uzrok propadanja tih materijala vlaga koja je dospjela u njihov porni prostor (sl. 1 i 2). Procesi destrukcije imaju vrlo složeni fizikalnokemijski karakter. Za uspješnu borbu protiv štetnog utjecaja vlage na građevinske materijale izuzetno je važno postavljanje pravilne dijagnoze. Dobrom dijagnozom može se odrediti optimalna metoda sanacije vlage i uklanjanja posljedica vlaženja. Stoga je u ovom priručniku posebna pozornost posvećena dijagnostici. Problematika je raznorodna. Svaki objekt zahtijeva poseban multidisciplinarni

pristup. Koliko god se rad na dijagnostici činio zahtjevan i skup, rezultati takvoga pristupa neće izostati. Mnogo je skuplje provesti neadekvatan sanacijski postupak temeljen na nepotpunoj ili pogrešnoj dijagnozi, pa se nakon niza potraćenih godina i uloženog novca naći na početnoj točki. Ili čak ispod nje! Sasvim je sigurno da ne postoje univerzalna »čudesna« rješenja koja jednim jednim postupkom rješavaju sve probleme vezane uz vlagu. Razni predstavnici i zastupnici domaćih i inozemnih tvrtki nerijetko nude takva univerzalna rješenja, iako niti sami sebi ne mogu suvislo protumačiti čudotvornost svojih proizvoda.



1 Vлага je najčešći uzročnik propadanja građevina (Osijek, kuća Brožan u Turdi)

Moisture is the most common cause of the dilapidation of buildings (Osijek, Brožan House, Fortress).

Vrlo se često događa da se građevine oronule i propale od vlage obnavljaju bez prethodno izvedenih postupaka za sanaciju vlage. Obnove se unutarnja i fasadna žbuka, sve se uredno oličići i prigodom primopredaje poslova sve je lijepo dotjerano. Radovi nisu dugo trajali, a glatki i čisti zidovi naizgled govore da je novac dobro potrošen. Korisnik ili vlasnik zgrade zadovoljan je vizualnim dojmom da su »majstori« pošteno izveli svoj posao. No nakon godinu-dvije opet se počinju pomalo pojavljivati simptomi štetnoga djelovanja vlage. Vraćaju se vlažne mrlje, izlučuju se soli na njezinim rubovima, boja se ljušti, žbuka zrnasto osipa. Za reklamaciju je kasno, jer uglavnom nema jamstva za trajnost kvalitete obavljenih radova. Novac je potrošen, vrijeme je prošlo, a problem nije riješen. Zbog toga vlasnik građevine prije početka radova mora tražiti ekspertizu stručnjaka za izvedbu sa-

nacijskog postupka, ali i osigurati stručni nadzor nad izvedbom radova. Ono što se u početku čini skupim, u konačnici je, sigurno, jeftinije i isplativije. S druge strane, izvođači bi morali savjesno obavljati svoj posao ako žele opstati u ovoj vrsti posla.

Svaki sustav sanacije vlage sadrži više faza rada. Tu izvođači radova moraju poštivati tehnološke propise i dobivene upute za rad, kao i rokove izvršenja pojedinih faza. Iskustvo je pokazalo da ne postoji tako dobar sustav sanacije koji bi bio uspješan ako se ne bi dosljedno poštivali tehnološki propisi i rokovi. Ako je za pravilan tijek nekog sanacijskog procesa potrebno više mjeseci, onda ni korisnik zgrade ne smije požurivati izvođača radova zato što je možda planirao svečano rezanje vrpce na otvorenju objekta za neki skorašnji prigodni blagdan. Šteta od požurivanja bit će neizbježna.



2 Zidovi dvorca Velikoga Tabora »izgrizeni« vlagom
Walls of the castle of Veliki Tabor corroded by moisture.

1. VRSTE VLAGE U GRAĐEVINAMA I NJIHOVO PODRIJETLO

Uz elementarne nepogode i ratna razaranja, vlaga je najveći neprijatelj starih građevina. U starim se gradskim četvrtima gotovo na svakoj zgradi susrećemo s oštećenjima nastalim od vlage: svijetle mrlje s tamnim obrubima, žbuka koja se mrvi i otpada na dodir, izgrizena opeka, ljuskavi kamen i nečitljivi reljefi (sl. 3). Ni na selu stanje nije ništa bolje. Stari stambeni i gospodarski objekti gotovo su svi načeti vlagom. I na sasvim novim zidanicama mogu se vidjeti velike vlažne mrlje koje se penju fasadom i do dva metra od tla. Samo zgrade s dobro projektira-

nom i pravilno izvedenom hidroizolacijom uglavnom su u dobrom stanju.

Svi znamo da je vlaga u građevinama štetna, ali je manje poznato da je štetno djelovanje vlage na građevinske materijale uglavnom posredno, a ne izravno. To se vidi po zidovima koji su stoljećima bili zatrpani vlažnom zemljom, a u tom razdoblju nisu propadali. Može se reći da su zidovi u stalnoj vlazi bili čak konzervirani. No, ako se nakon iskopavanja takvih zidova nisu poduzele odgovarajuće konzervatorske mjere prevencije, ubrzo je nastala degradacija materijala. Ako je zid bio obojen ili oslikan, najprije je došlo do uništavanja bojenoga sloja, a potom i dubljih dijelova zidova. Uzrok tog propadanja razne su vrste soli koje se sušenjem zida koncentriraju na njegovoj površini. Izuzetno visoki tlakovi koji se pojavljuju akumuliranjem tih soli razaraju strukturu građevinskog materijala. Dakle, u razaranju građevinskog materijala vlaga ima najčešće posredničku ulogu.

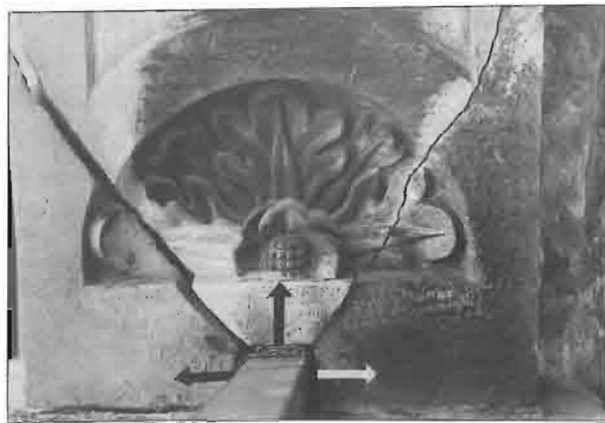
Zbog velike uloge topljivih soli u destrukciji građevinskog materijala, to je područje temeljito obrađeno u idućim poglavljima. Naglašeni su način njihova djelovanja i njihova štetnost, ali i mogućnosti otkrivanja soli, njihova eliminacija i saniranje posljedica.

Izravno štetno djelovanje vlage najviše dolazi do izražaja kod metala, posebno željeza. Razni željezni klinovi, zatege, prozorske rešetke, panti za vrata i prozore i sl., izloženi vlazi korodiraju. Produkt korozije željeza jest hrđa. To je kemijski spoj varijabilnog sastava s približnom formulom $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ (Filipović i Lipanović, 1982). Prema toj formuli hrđa ima 4,89 puta veći molarni volumen od željeza, pa toliko puta povećava svoj volumen u odnosu na početni metal (Malinar i Penović, 1985). Željezo usidreno u kamenu korozijom expandira i stvara u njemu radijalne pukotine. One se postupno povećavaju te na kraju dolazi do odvajanja i većih dijelova kamena (sl. 4 i 5).



3 Tragovi štetnoga djelovanja vlage u temeljnome dijelu pročelja crkve sv. Katarine u Zagrebu

Traces of the harmful action of moisture in the foundation part of the façade of the Church of St. Catherine, Zagreb.



4 Ekspanzija hrđe na željeznoj zatezi uzrokovala je stvaranje radijalnih pukotina u kamenjima (trijem palače Sponza u Dubrovniku)

Rust expansion on a horizontal iron tie rod caused the creation of radial cracks in the springing course of the arches (Sponza Palace, Dubrovnik, porch).

Neposredno štetno djelovanje vode na građevinske materijale nastaje i pri niskim temperaturama kada se voda u pukotinama i porama smrzava. Nastali se led pri topljenju širi, stvara visoki tlak u šupljinama i lomi kamen, opeku i žbuku (sl. 6).

Prema Stambolovu i van Asperen de Boer u (1976), porozni materijali koji imaju koeficijent zasićenosti manji od 0,8 ne podliježu utjecaju mraza jer njihova struktura sadrži mnogo velikih pora u kojima se mogu stvarati leće leda bez destruktivnog tlaka.

Radi boljeg razumijevanja problematike o vlazi u građevinama, najprije bi trebalo nešto reći o izvorima vlaženja i vrstama vlage kojima može biti izložena neka građevina. Postoje različite podjele, ali se sve ipak svode na isto. Ovdje će oblici vlage biti podijeljeni ovako:

1. likvidna vlaga,
2. higroskopska vlaga,
3. kondenzna vlaga.

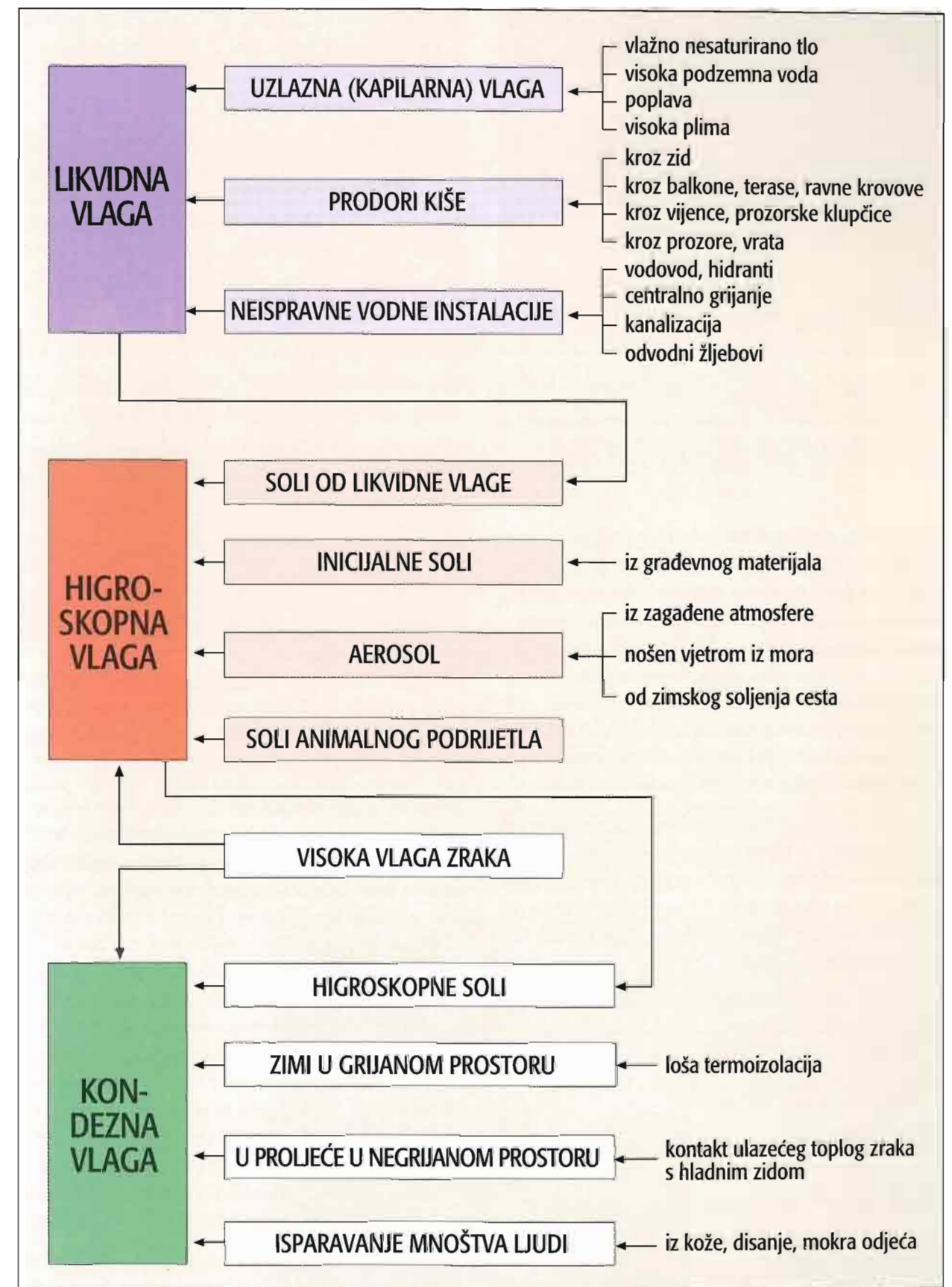
Podjela je načinjena tako da se na shematskom prikazu (sl. 7) mogu lakše razumjeti izvori pojedinih vrsta vlaženja i njihovi međusobni utjecaji. Prva skupina ima naziv »likvidna vlaga«, jer je to vlaga koju je uzrokovala tekuća voda: kiša, podzemne vode, poplave i curenje raznovrsnih vodnih instalacija. Higroskopska vlaga nastaje tako što soli akumulirane u zidu zbog svoje higroskopsnosti upijaju vodenu paru iz zraka. Kondenzna vlaga također nastaje iz vodene pare u zraku, ali se izlučuje na površini zida u obliku rose kada topao zrak dođe u dodir s hladnim zidom. Obje potonje skupine imaju svoju dinamiku i nakon nastajanja migriraju kapilarama. Te su migracije manje od onih uzrokovanih tekućom vodom.



5 a) Vlagom i solima nagriženi stup od opeke u Velikome Kaptolu u Sisku staričari su nastojali sanirati izvedbom armirano-betonske obloge. Budući da vlaga i soli nisu bile odstranjene, željezna je armatura zahrđala pa je njezina ekspanzija razbila betonsku oblogu. b) Detalj vrha stupa s kristaliziranim starim solima iz opeke i novima dospjelim iz obloge od portland-cementa

a) Statics experts attempted to treat the moisture and salt corroded brick pillar in Veliki Kaptol, Sisak, with a reinforced concrete layer on top. Since the salt and moisture were not removed, the iron reinforcement rusted, and expanding cracked the concrete covering. b) Detail of the top of the pillar with crystallised old salts from the brick and new salts coming from the Portland cement casing.

Sadržaj vlage u zidu izražava se kao postotak vode u suhoj tvari, a najčešće se u stručnoj literaturi označuje grčkim slovom ψ ($\Psi\%$). Ovisno o načinu mjerenja, postoci mogu biti iskazani kao mase¹ ili kao volumni, pa to treba naznačiti u zagradi uz postotak kao npr. 3% (vol.) ili 5% (mas.).

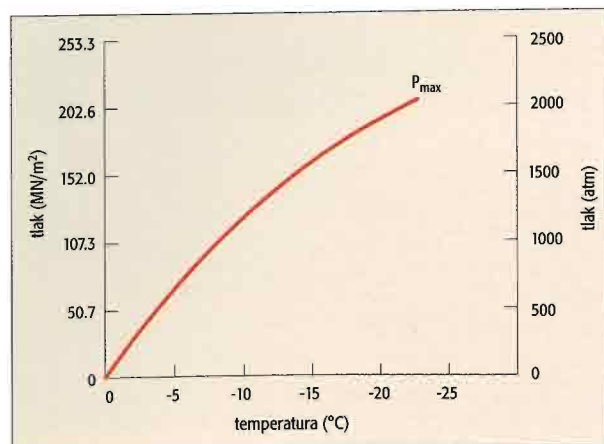


7 Vrste vlage i njihovo podrijetlo

Kinds of moisture and their origin.

Uz prikazanu shemu raznih vrsta i izvora vlaženja treba napomenuti da u zidovima novosagrađenih zgrada postoji tzv. ugradbena ili građevinska vlaga.

Svi mortovi, žbuke ili lijevane betonske ploče pripremaju se miješanjem veziva i agregata s viškom vode. Prigodom ugradbe dio se vode kemijski veže,



6 Tlak kojega stvara led nastao smrzavanjem vode u zatvorenom prostoru. Maksimalni mogući tlak iznosi 207,4 MN/m² (2047 atm). (prema: Ashurst i Dimes, 1990a)

The pressure caused by ice created by the freezing of water in a closed space. Maximum possible pressure comes to 207.4 MN/m² (2047 atm) (after Ashurst and Dimes, 1990a).

a ostatak se postupno prosušuje i za nekoliko mjeseci nestaje. Većina se autora slaže da je granica vlažnosti zida koja se može tolerirati oko 4% (mas.). Viši iznosi vlage štetni su za čovjeka koji boravi u tom prostoru, za inventar, kao i za samu građevinu. Tako Feilden (1982) piše da se opeka i kamen mogu smatrati suhima ako vlaga ne prelazi 3% (vol.), odnosno 5% (mas.). Massari (1971) smatra da se vlaga do 3% (mas.) može tolerirati za opeku, a za lake vapnence i pješčenjake do 5% (mas.).

Protiv vlage u građevini moramo se boriti zbog još jednog razloga. Vlažan zid ima osjetno veću toplinsku vodljivost nego suhi. Za grijanje takvoga prostora troši se više energije. To znači da je vlažan zid slabiji toplinski izolator od suhog pa se toplina nepotrebno gubi kroz zidove (sl. 8).

Toplina se gubi i na energiju potrebnu za isparavanje vlage iz zida pa je takav zid hladniji nego što bi to bio da je suh kod iste temperature zraka. To najbolje ilustrira primjer koji prikazuje kako se u prošlosti porozna keramička posuda rabila za dobivanje hladne pitke vode u toplim krajevima (sl. 9).

1.1. LIKVIDNA VLAGA

Pod likvidnom vlagom razumijevaju se oni oblici vlage koji su u zid dospjeli u obliku tekuće vode. To su: kapilarna ili uzlazna vlaga koja vodu iz tla transpor-

¹ Umjesto sadašnje oznake »maseni« (prema SI sustavu) prije su rabljene oznake »težinski« ili »utezni«.

tira kroz temelje u zid, zatim vlaga od prodora kiše i vlaga od curenja neispravnih vodnih instalacija.

1.1.1. KAPILARNA (UZLAZNA) VLAGA

Vlaga iz tla kapilarnim silama uzlazi u temelje zidova i postupno nastavlja svoj uspon u više dijelove građevine (sl. 10, 11 i 12). Zbog toga se često naziva i *zemna kapilarna vlaga*. Visina kapilarnog uzlaza ovisi o promjeru kapilara u građevnom materijalu. Manji promjer kapilara uzrokovat će viši uzlaz vode nego veći promjer (sl. 13).

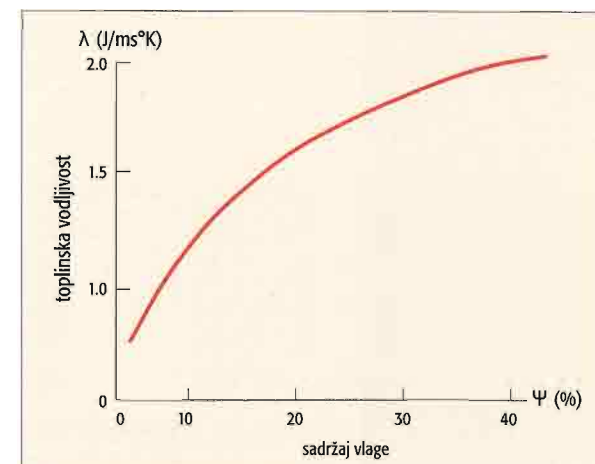
U sljedećoj tablici dan je prikaz teoretske visine kapilarnog uzlaza ovisno o radijusu pora (r) (Wihl, 1986). U praksi je ta visina ipak nešto manja:

Radius pore	Visina kapilarnog uzlaza
1 mm	0,015 m = 1,5 cm
0,1 mm	0,15 m = 15 cm
0,01 mm	1,5 m
0,001 mm	15 m
0,0001 mm	150 m

Kapilarnu vlagu u zidu može uzrokovati vlažno nesaturirano tlo, visoka podzemna voda, poplava i visoka plima. I otapanje velikih količina snijega može izazvati pojavu kapilarne vlage.

Da bismo potpunije razumjeli odnos vlage i vode u podzemlju, potrebno je upoznati neke osnovne čimbenice o podzemnim vodama. Voda u podzemlju može u potpunosti ispunjavati sve šupljine i ona se naziva *vodom temeljnicom*. Prostor s vodom temeljnicom naziva se *zonom saturacije* ili zasićenja. Površina zone saturacije, odnosno vode temeljnice, zove se *vodno lice* i ono manje-više prati nadzemni reljef, ali s blažim zakrivljenostima. Vodno je lice niže za sušnog vremena, dok se povećanjem oborina povisuje. Iznad vodnog lica nisu sve šupljine ispunjene vodom, već su dijelom ispunjene zrakom, pa se to zove *zona aeracije*. U toj se zoni oborinska voda cijedi kroz veće šupljine prema vodi temeljnici, a u manjim je šupljinama adhezijskim i drugim molekularnim silama fizički vezana u obliku vlage.

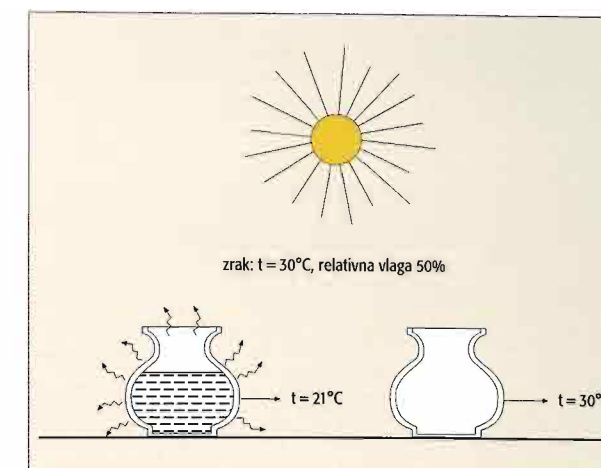
Sadržaj vlage u zoni aeracije oscilira s količinom oborina, a svakako ovisi o *propusnosti* ili *permeabilnosti* naslaga. Tako će voda brže vertikalno i bočno otjecati prema vodi temeljnici u šljuncima, nego u glinovitim naslagama, gdje će se u kapilarama zadržavati dugo nakon kiše. Propusnost nije uvijek razmjerna poroznosti, jer ne ovisi samo o ukupnom volumenu šupljina nego i o veličini pora. Ako su one



8 Toplinska vodljivost opeke (λ) kao funkcija sadržaja vlage (ψ) (prema: Boekwijt i Vos, 1970)

Head conductivity of brick (λ) as function of the water content (ψ) (after Boekwijt and Vos, 1970).

premalene, voda se za njih veže adhezijskim i kapilarnim silama, pa ne može dalje teći. Tako npr. poroznost neke gline može biti i veća od 50%, a ona je praktički vodonepropusna u usporedbi sa šljuncima koji imaju upola manju poroznost. Zbog velike permeabilnosti su šljunci vodonosni, a glina nije (Herak, 1973). To znači da se voda može crpiti iz šljunkovitih naslaga u zoni saturacije, dok je to u glini teže izvedivo. S druge strane, glina teško otpušta vlagu pa će se vlaga zadržavati i na vrhu brijege građenog od glinovitih naslaga. Stoga se ne treba čuditi kada nađemo na kapelu s vrlo vlažnim zidovima smještenu na samom vrhu brda (sl. 14).



9 Dvije su keramičke posude izložene Sunčevim zrakama. Zbog isparavanja vode vlažna posuda postaje osjetno hladnija od suhe

Two ceramic vessels exposed to solar radiation. Because of the evaporation of the water, the moist vessel is considerably cooler than the dry one.

Za kišovito razdoblje ili u vrijeme otapanja snijega vodno se lice podiže i može katkad doseći do površine tla. To će neminovno uzrokovati znatno povišenje vlage u zidovima i time prouzročiti nove štete na njima. Vlaga ulazi bočno u zid i navlažuje ne samo podrumске nego i prizemne prostore. Daljnje oborine uzrokuju poplavljanja koja su opasna za zgrade i kad je horizontalna hidroizolacija ispravno izvedena. Treba napomenuti da do poplavljanja nekog područja može doći prigodom naglih obilnih oborina i tamo gdje podzemlje nije zasićeno vodom. Tlo, naprosto, nije kadro upijati velike količine nadolazeće oborinske vode pa su posljedice jed-



10 Kapilarna je vlaga dosegla do polovice prvoga kata u Novome dvoru u Čakovcu
Capillary moisture coming to the middle of the first floor in Novi Dvor, Čakovec.



11 Tragovi postupnoga kapilarnog uzlaza vlage u oslikanoj zidu kapele sv. Jurja u Purgu Lepoglavskoj

Traces of the gradual entrance of rising moisture in the painted wall of the Chapel of St. George in Purga Lepoglavska.

nake kao i kad je tlo saturirano. Ovdje se ne ulazi u štete nanese mehaničkim djelovanjem poplavnih voda koje kadšto mogu biti toliko silovite da vodni val ruši zgrade pred sobom.

U obalnom pojasu poplavljanje temelja i donjih dijelova zgrada mogu uzrokovati lokalne izuzetno visoke plime. Ta rijetka i još nedovoljno istražena pojava poznata je pod nazivom *štiga* ili *seš* (fr. seich). U nas se povremeno događa u relativno uskim i dugačkim uvalama poput starogradske na Hvaru i velolučke uvale na Korčuli, te u Bakarskom zaljevu. To je zapravo stojni val koji nastaje atmosferskim utjecajem ili poticajem iz susjednih bazena. Posljedice su brzo dizanje i spuštanje razine mora ili pojava jakih morskih struja. Godine 1977. u Veloj Luci su poplavljena prizemlja zgrada, pri čemu je prouzročena znatna materijalna šteta. Poseban problem kod poplava nastalih visokom plimom jest kontaminacija građevnog materijala morskom soli.

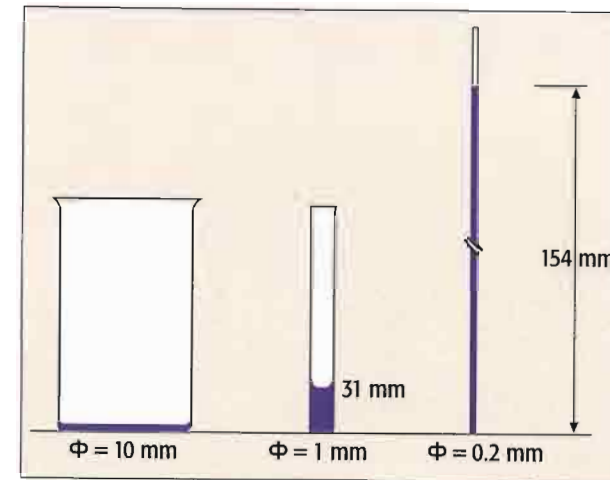
Karakteristična pojava raspodjele vlage unutar strukture poroznog zida jest *kritični sadržaj vlage*. To je granični udio vlage iznad kojeg su kapilare ispunjene toliko da se voda kroz njih može gibati u tekućem stanju. Ispod te granice se vlaga može gibati samo u obliku vodene pare, jer postoje prekidi vodenoga stupca u većim kapilarama. Kada se sušenjem dostigne kritični udio vlage brzina sušenja zida naglo se usporava (Stambolović i van Asperen de Boer, 1976). Visina kritičnog sadržaja vlage ovisi o poroznosti tipu materijala. Vrlo je teško osušiti zidove s visokim kritičnim sadržajem, kao npr. u Veneciji gdje doseže čak i do 18% (Feilden, 1982).

Već je spomenuto da će kapilarna vlaga biti to viša što su kapilare uže. Moramo se i upoznati sa smjerom gibanja vode u otvorenoj kapilari uvjetovanim razlikama u temperaturi (Vos i Tammes, 1968). Ako je s objiju strana kapilare jednaka temperatura (izotermno stanje), voda se u kapilari neće gibati. Ako ipak postoji temperaturni gradijent, odnosno jedna strana je topla, a druga relativno hladna, voda u kapilari će se gibati od tople strane prema hladnoj (sl. 15).



12 Na vlagom oštećenome zidu izrasle su raznovrsne biljke, koje svojim korijenjem uzrokuju sekundarna oštećenja građevinskoga materijala

Various plants have grown on the moisture-damaged wall, causing secondary damage to the building materials with their roots.



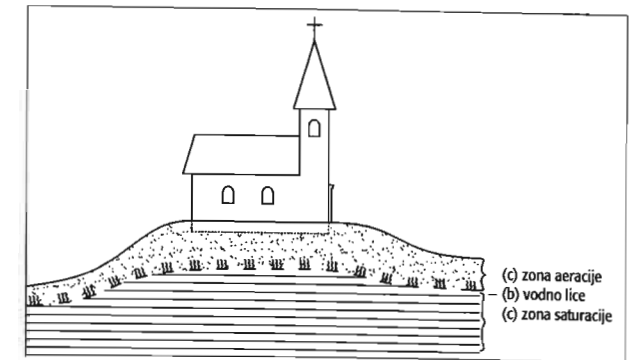
13 Visina kapilarnog uzlaza ovisna je o promjeru kapilare
The height reached by capillary moisture depends on the diameter of the capillaries.

Zbog te činjenice najjače isoljavanje na vanjskim zidovima nastaje upravo zimi kod vrlo niskih temperatura zraka, jer se vlaga iz dubine zida giba do same površine. Pojava je još naglašenija ako je pri tome relativna vlaga zraka vrlo niska.

Prema Feildenu (1982) visina kapilarnoga uzlaza u zidu građevine ovisi, osim o radijusu pora, i o intenzitetu isparavanja. Kada je zid zasićen vlagom od 20% ili više, isparavanje se događa samo na površini zida. U slučaju kada uopće nema isparavanja, voda se podiže kapilarama do maksimalne razine koja je uvjetovana strukturom pora i karakteristikom otopljenih soli dospjelih iz tla. S porastom temperature vanjskoga zraka povećava se isparavanje zida, pa se smanjuje vlaga u zidu. Zona kristalizacije povlači se u unutrašnjost koja uzrokuje štetu u zidnome materijalu. Dakle, s porastom intenziteta isparavanja snižava se gornja granica vlage i obratno.

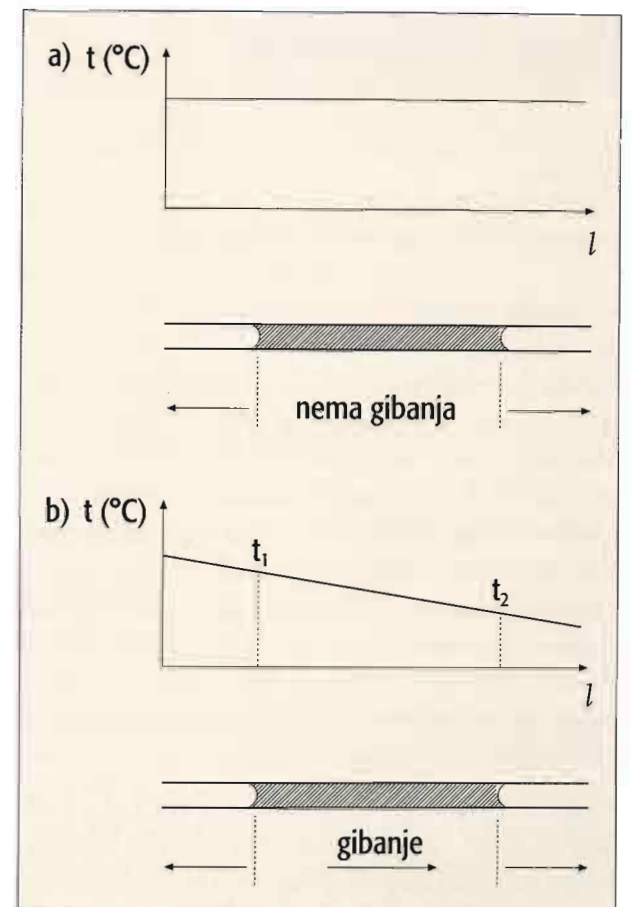
1.1.2. PRODORI KIŠE

Kiša može prodrijeti u unutrašnjost građevine kroz kose krovove zbog njihova oštećenja ili zbog loše položenih crjepova i kupa kanalica, zbog trule šindre i sl. Još je češći slučaj prokišnjavanja kroz neispravno izveden dodir kosog krova sa zidom. Najveće količine kišnice dospiju u zidove prodorom kroz neispravno izvedene ravne krovove na mjestima gdje je dotrajala krovna hidroizolacija. I oštećeni žljebovi za odvod krovnih voda uzrok su vlaženja zida. Žljebovi od pocinčanoga željeznog lima relativno brzo korodiraju pa voda kroz njih curi i natapa zidove. Čak i trajni, bakreni žljebovi mogu biti uzročnikom vlaženja zida ako su ispunjeni lišćem, šutom



14 Podzemna voda u relativno homogenome, poroznom tlu:
a) Zona saturacije. Sve su šupljine ispunjene vodom; b) Vodno lice slijedi zakrivljenost reljefa, ali u blažem obliku. Ono varira s količinom oborina. Iznad vodnoga lica nalazi se kapilarni obrub čija visina ovisi o promjeru kapilara; c) Zona aeracije. Veće su šupljine ispunjene zrakom, a u manjima se voda drži adhezijom

Underground water in a relatively homogeneous, porous ground: a) Saturation zone. All the hollows are filled with water; b) Water face follows the curves of the relief, but in a milder form. It varies with the amount of precipitation. Above the water face lies the capillary edge the height of which is determined by the diameter of the capillary. c) Aeration zone. Larger hollows are filled with air, and in the smaller, the water is retained by adhesion.



15 Gibanje vode u kapilari s obzirom na temperaturni gradijent: a) Voda se u kapilari ne gibati ako ne postoji temperaturni gradijent; b) Voda se u kapilari gibati od toplije strane prema hladnijoj (prema: Vos i Tammes, 1968)

Movement of water in the capillary with respect to temperature gradient: a) water does not move in the capillaries if there is no temperature gradient; b) water moves in the capillary from warmer to colder (after Vos and Tammes, 1968).



16 Spojevi na krovnim kamenim žljebovima često su loše zabrtvljeni, pa kiša prodire u zidove (palača Sponza u Dubrovniku).

Joints on stone gutters are often poorly sealed, and rain will seep into the walls (Sponza Palace, Dubrovnik).

od žbuke za brtvljenje sljemenjaka ili nekim drugim talozima. Voda se tada prelijeva preko žlijeba, a zbog povećane težine žlijeb se može i svinuti. Iako je bakar ostao nekorodiran, voda iz žlijeba curi i vlaži zid. Tradicionalni način odvodnje krovnih voda u priobalju jest izvedba žljebova klesanih u kamenu. Njihova je trajnost velika, a estetska vrijednost nenadomjestiva. Pa ipak, i tu ima problema s brtvljenjem spojnica između kamenih žljebnih elemenata koje nerijetko procuruju i natapaju zidove (sl. 16, 17 i 18). To se još više očituje ako žlijeb nema dobar nagib pa dolazi do akumuliranja vode koja se onda cijedi kroz reške.

Voda se može slijevati s krova na zid i stoga što žlijeba nema. Vertikalni odvodi krovnih voda također su često začepljeni, oštećeni korozijom ili neispravno izvedeni. Izlaz kišnice iz vertikalnih cijevi nerijetko je napravljen tako da natapa donje dijelove zida i temelje, umjesto da je spojen na kanalizaciju ili da je odvodnja riješena na drugi način koji neće uzrokovati vlaženje zida. Neadekvatno izvedene okapnice na balkonima, terasama, prozorima i dr. također su vrlo česti uzročnici vlaženja zidova.



17 Tragovi curenja kišnice kroz loše zabrtvljene reške između elemenata kamenih žljebova (katedrala sv. Jakova u Šibeniku)
Cases of the trickling of rainwater through poorly sealed joints between the elements of stone guttering (St James' Cathedral, Šibenik).

Prodori kiše u strukturu zida i unutrašnjost zgrade događaju se i zbog pogrešnog nagiba pločnika, terasa, balkona, prozorskih klupčica i vijenaca na pročeljima. Primjer lošega projektiranja nagiba terena bez adekvatne odvodnje jest popločenje trga pred katedralom sv. Jakova u Šibeniku, gdje se za kišnog vremena voda slijeva prema zidu ove zaštićene građevine najviše spomeničke kategorije (sl. 19).

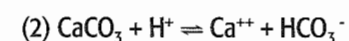
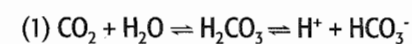
Kiša nošena snažnim vjetrom može prodrijeti kroz nepravilno obrađenu površinu zida i vlažiti njegovu unutrašnjost. To se poglavito događa na nežbukanim zidovima s loše izvedenim sljubnicama između opeke ili kamenih elemenata. Jaki udari vjetra ugujavaju kišne kapi u pukotine s jedne strane, a s druge negativni tlak zraka u zatvorenom prostoru još jače usisava kapi prema unutrašnjosti. Tako kiša nošena jakim vjetrom može natopiti zid debljine čak veće od metra. Efekt usisa u zatvorenom prostoru stvara se zbog neaerodinamičnih kontura zgrade, pa vjetar u unutrašnjosti stvara podtlak. Katkad tlakom vjetra, ali i usisom kapljice kiše mogu biti transportirane i desetak centimetara uvis i svladati prepreke na svojem putu (Feilden, 1982). S povećanjem visine građevine raste i utjecaj udara kiše. Uzme li se za intenzitet udara kiše na visini 3 m od tla faktor 1, tada će na 15 m visine udar kiše imati intenzitet faktora između 15 i 50 (Šarić, 1999). Najveće štete od prodora kiše u zid nastaju kada je pročelje okrenuto prema moru pa vjetar uz kišu unosi u zid i slane kapljice mora i zid kontaminira kloridima.



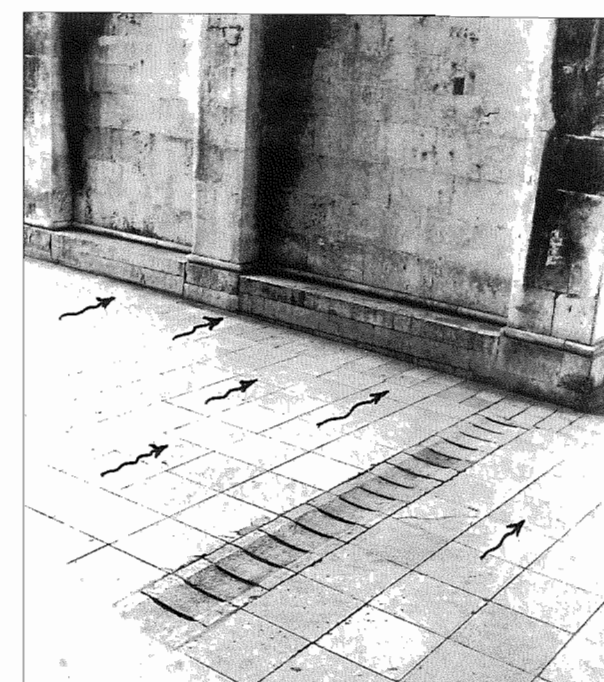
18 Cjedine nastale dugotrajnim prodiranjem kiše kroz reške na kamenom krovu šibenske katedrale

Drip stains created through long-term leaking of rain through the joints on the stone roof of Šibenik Cathedral.

Pri spominjanju kiše ne treba zaboraviti ni još dva štetna djelovanja na građevinske materijale. To su: mehaničko djelovanje ili erozija i kemijsko djelovanje ili korozija materijala (sl. 20). Erozijsko djelovanje očituje se u udaru kišnih kapi u žbuku, opeku ili kamen i mehaničko izbijanje slabije vezanih čestica. Štetno korozijsko djelovanje uglavnom se odnosi na građevinski materijal karbonatnog sastava. To su vapnene žbuke, vapnenci, vapnenački pješčenjaci, dolomitni vapnenci i dolomiti. Kiša sadrži otopljeni ugljikov dioksid (CO_2), koji tvori slabu karbonatnu (ugljičnu) kiselinu. Kod nižih temperatura kiše veća je topljivost CO_2 , čime se povećava i kiselost. Voda ohlađena na temperaturu blizu 0°C ima pH-vrijednost 5,2 (Jacoby i Krejci, 1992) pa je tada najagresivnija. Ugljična kiselina reagira s karbonatom, otapa ga i pretvara u bikarbonat, te cijedenjem odnosi u niže dijelove zida. Reakcija je reverzibilna. Budući da bikarbonat nije kemijski stabilan, ubrzo se u povoljnim uvjetima opet pretaloži u karbonat i stvara sigaste cjedine. Proces se zbiva prema kemijskoj jednadžbi:



Začudujuće je koliko je čest slučaj da kiša prodire u unutrašnjost zgrada i kroz zazore na loše brtvljenim vratima i prozorima. Prodori se događaju i duž nezabrtvljenih reški između dovratnika ili doprozornika i zida.



19 Zbog neispravnoga nagiba popločenja na trgu pred šibenskom katedralom, kao i zbog pomanjkanja uzdužnoga odvodnog žljeba, kišnica se slijeva prema zidu i vlaži ga

Because of the wrong camber of the paving on the square in front of Šibenik Cathedral and because of the absence of any longitudinal drainage gutter, rainwater runs towards the wall and makes it moisture.

Obilne količine kiše mogu ući u unutrašnjost kroz otvore polupanih stakala na prozorima i vratima neodržavanih i napuštenih građevina.

1.1.3. CURENJE NEISPRAVNIH VODNIH INSTALACIJA

Češće nego se to općenito misli zidovi se ovlažuju curenjem neispravnih vodnih instalacija. Pucanje vodovodne cijevi u kratkom će roku dobro namočiti zid, ali će kvar vjerojatno biti brzo uočen i otklonjen. No, lagano curenje vode na spoju cijevi bit će dugotrajno jer se teško uočava. Kad se kvar jednom uoči, zid je već u velikoj mjeri natopljen i započet je proces akumuliranja topljivih soli u zoni isparivanja. Slično se može dogoditi i sa sustavom centralnog grijanja s pomoću radijatora ili podnog grijanja. Nerijetko se događa i dugotrajno curenje kanalizacijskih cijevi, što je za zid još opasnije od curenja vodovoda i centralnog grijanja. Otpadne vode sadrže štetne topljive soli, uglavnom kloride i nitrata koji su glavni uzročnici razaranja građevinskog materijala.



20 Dugotrajno korozivno i erozivno djelovanje kiše stvorilo je do 3 cm duboke škrape na kamenim blokovima na krovu Jupiterova hrama u Splitu.

Long-term corrosive and erosive action of rain has created fissures up to 3 cm deep in the stone blocks on the roof of the Temple of Jupiter, Split.

1.2. HIGROSKOPNA VLAGA

Porozni građevinski materijali (kamen, opeka, mort, žbuka) općenito pokazuju higroskopska svojstva. To znači da upijaju vlagu iz zraka (sl. 21). Što je zrak vlažniji, bit će i veća vlaga materijala.

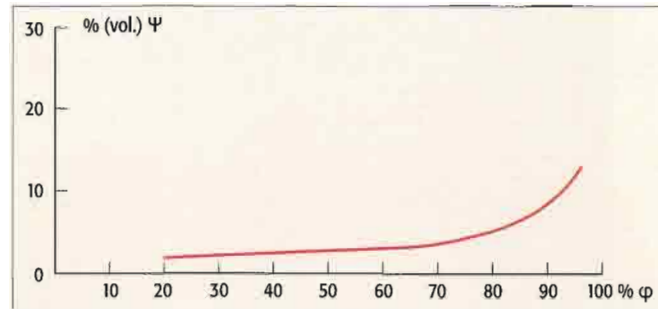
Na ova se pojava znatno pojačava ako građevinski materijal u svojoj strukturi sadrži topljive, higroskopske soli (sl. 22). Većina je topljivih soli mnogo higroskopsnija od kamena, opeke ili žbuke. Iz toga slijedi da s povećanjem vlage u zraku raste i vlaga materijala i to razmjerno udjelu soli. Uloga soli u propadanju građevnog materijala vrlo je velika. Stoga je u ovom poglavlju solima posvećena posebna pažnja kako bi se naglasila potreba za njihovo detektiranje i uklanjanje.

Različite vrste soli mogu dospjeti u zid ovako:

- sekundarno kao soli transportirane iz tla kapilarnom vlagom
- inicijalne soli koje potječu iz građevinskog materijala prije ugradnje u zid
- soli iz morskog pijeska uporabljenog za mortove i žbuke
- soli iz portland-cementa
- aerosol iz onečišćenog zraka i morske posolice
- sol od zimskog posipavanja cesta
- soli animalnog podrijetla
- soli iz neadekvatnih sredstava za konzerviranje.

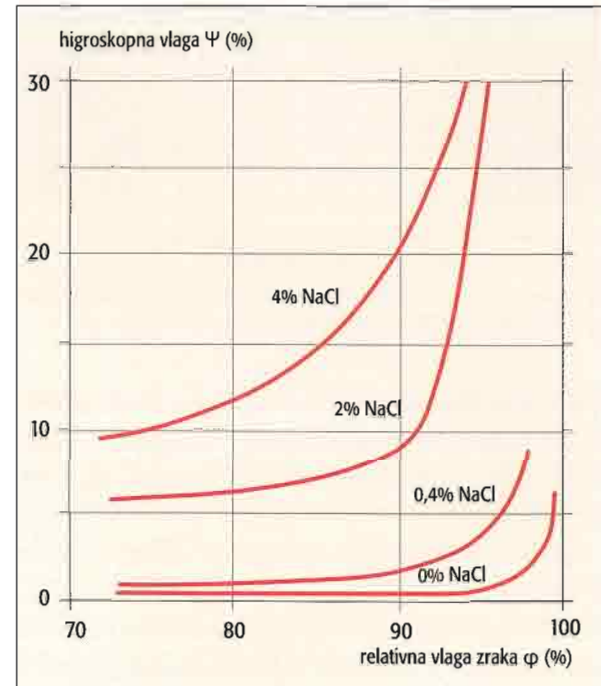
1.2.1. TOPLJIVE SOLI I NJIHOVO ŠTETNO DJELOVANJE NA GRAĐEVINSKE MATERIJALE

Soli dospjele u zid na neki od navedenih načina prigodom sušenja zida migriraju s vodom prema površi-



21 Sadržaj vlage u žbuci (Ψ) raste s povećanjem relativne vlage zraka (φ) (prema: Boekwijt, 1976).

Moisture content in plaster (Ψ) grows with the increase of relative humidity (φ) (after Boekwijt, 1976).



22 Sadržaj vlage u opeci (Ψ), osim o relativnoj vlazi zraka (φ), ovisi također i o koncentraciji higroskopskih soli (NaCl) (prema: Arendt, 1996).

Moisture content in brick (Ψ), as well as on the relative humidity of the air (φ), also depends on concentration of hygroscopic salts (NaCl) (after Arendt, 1996).

ni. Te soli isparavanjem vlage zaostaju na površini zida gdje se koncentriraju i kristaliziraju. Tako nastaju svijetle mrlje na zidu. Ta se pojava naziva *eflorescijom* ili *iscvjetavanjem* soli (sl. 23, 24, 25, 26). Te soli laici nepravilno nazivaju salitrom. Salitra (tal. *salnitro*) kalijeva je sol nitratne kiseline. Iscvjetavanjem se, osim nitrata, izlučuju, ka-ko je već navedeno, kloridi, sulfati, karbonati i hidrokarbonati. Čestim izmjenama sušenja i vlaženja njihova se koncentracija sve više povećava. Kada volumen kristala dostigne volumen pore u građevinskom materijalu, počinju unutar pore rasti kristalizacijski tlakovi koji se prenose na stijenke pore. Ova se pojava zove *subflorescencija*. Ti tlakovi mogu doći vrlo visoke vrijednosti koje nadmašuju čvrstoću građevnog materijala (Winkler, 1973). Posljedica je toga pucaanje materijala, ljuštenje i »šećerasto« osipanje. Među vrstama soli koje iscvjetavaju na ili u zidu nalazimo bez-

vodne soli i soli s »kristalnom vodom«, odnosno kemijski vezanom vodom. Slijedi prikaz svih soli koje se djelovanjem vlage izlučuju na zidu s njihovim mineraloškim nazivima i kemijskim formulama (prema: Arnold i Zehnder, 1989):

KARBONATI	
kalцит	CaCO ₃
dolomit	CaMg(CO ₃) ₂
magnezit	MgCO ₃
neskvehonit	MgCO ₃ · 3H ₂ O
lansfordit	MgCO ₃ · 5H ₂ O
hidromagnezit	Mg ₅ [OH(CO ₃) ₂] ₂ · 4H ₂ O
natrit	Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O
termonatrit	Na ₂ CO ₃ · H ₂ O
nahkolit	NaHCO ₃
trona	Na ₃ H(CO ₃) ₂ · 2H ₂ O
kalцит	KHCO ₃
SULFATI	
gips	CaSO ₄ · 2H ₂ O
basanit	CaSO ₄ · H ₂ O
epsomit	MgSO ₄ · 7H ₂ O
heksahidrit	MgSO ₄ · 6H ₂ O
kizerit	MgSO ₄ · H ₂ O
darapskit	Na ₃ (SO ₄)(NO ₃) · H ₂ O
mirabilit	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O
tenardit	Na ₂ SO ₄
arkanit	K ₂ SO ₄
bledit	Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ · 4H ₂ O
pikromerit	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O
busengoltit	(NH ₄) ₂ Mg(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O
singenit	K ₂ Ca(SO ₄) ₂ · H ₂ O
gergejit	K ₂ Ca ₃ (SO ₄) ₆ · H ₂ O
aftitalit	K ₃ Na(SO ₄) ₂
etringit	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ · 26H ₂ O
taumazit	Ca ₃ Si(OH) ₆ (CO ₃)(SO ₄) · 12H ₂ O
KLORIDI	
bišofit	MgCl ₂ · 6H ₂ O
antarktit	CaCl ₂ · 6H ₂ O
tahihidrit	CaMg ₂ Cl ₆ · 12H ₂ O
halit	NaCl
silvin	KCl
NITRATI	
nitrokalцит	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O
nitromagnezit	Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O
nitronatrit	NaNO ₃
nitrokalit	KNO ₃
nitramit	NH ₄ NO ₃
OKSALATI	
vevelit	Ca(C ₂ O ₄) · H ₂ O
vedelit	Ca(C ₂ O ₄) · 2H ₂ O



23 Soli izlučene na freski u kapeli sv. Franje Ksaverskoga u G. Stubici

Salts leached out on the fresco in the Chapel of St Francis Xavier in Gornja Stubica.



24 Nakupine soli i mikroorganizama na Rangerovoj freski u bivšoj franjevačkoj ljekarni u Varaždinu

Agglomerations of salts and microorganisms on the Ranger fresco in the former Franciscan apothecary in Varaždin.



25 Pulverizacija pigmenta uzrokovana solima na freski u crkvi sv. Marije Snježne u Kamensko.

Pulverisation of pigments brought about by salts in the fresco of the Church of St Mary of the Snow in Kamensko.



26 Štete od kapilarne vlage i soli na oslikanome zidu Vjenčao-
ne u Ludbregu

Damage from capillary moisture and salt on the painted wall
of the Wedding Room in Ludbreg.

Bezvodne soli (uglavnom kloridi) izuzetno su topljive u vodi. U otopini mogu djelovati na razne načine. Vrlo su pokretljive i stoga prodorne, pa razaraju kristalne strukture građevinskog materijala. Također *peptiziraju*, tj. prelaze iz gel-stanja u stanje koloidne otopine tvoreći velike konglomerate molekula i smanjuju stehiometričnost kristala. Zbog tih osobina kloridi su odgovorni za razaranje veziva u strukturama. Otopljenjiva putuju prema površini zida gdje ispunjavaju pore. U slučaju kondenzacije vlage na površini, kloridi se prvi otapaju i putuju u dubinu ostavljajući prostor drugim solima (Stambolov, 1976). Koncentriranjem bezvodnih soli i rastom kristala u porama pojavljuju se visoki *kristalizacijski tlakovi* koji razaraju materijal.

Soli s kemijski vezanom vodom, osim kristalizacijskih tlakova, razvijaju i vrlo visoke *hidratacijske tlakove* kada prelaze iz bezvodnoga stanja u stanje s kristalnom vodom. Tako se npr. bezvodni natrijev sulfat *tenardit*, Na_2SO_4 , sniženjem temperature kod $32,4^\circ\text{C}$ hidratizira u *glauberovu sol*, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Prigodom te pretvorbe nastaje povećanje volumena u iznosu od 308% (Mortensen, 1933). Da hidratacijski tlakovi zaista mogu biti izuzetno veliki govo-

ri i činjenica da se smjesa vapnenih silikata u stadiju hidratacije upotrebljava kao neeksplozivno sredstvo za lomljenje kamena (Božić, 1999).

U sljedećoj tablici dani su kristalizacijski tlakovi u N/mm^2 za neke reakcije u ovisnosti o temperaturi i relativnoj vlazi zraka (prema: Venzmer et al, 1991):

Reakcija: $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$			
Relativna vlaga, φ (%)	0°C	20°C	60°C
100	219,0	175,5	92,6
70	160,0	114,5	25,4
50	107,2	57,5	0
Reakcija: $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$			
Relativna vlaga, φ (%)	10°C	20°C	30°C
100	14,6	11,7	9,2
70	9,7	6,8	4,0
50	5,0	1,9	0
Reakcija: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$			
Relativna vlaga, φ (%)	0°C	20°C	30°C
100	93,8	61,1	43,0
80	63,7	28,4	9,4
60	24,3	0	0

1.2.2. HIGROSKOPNA VLAGA KAO POSLEDICA SOLI DOSPJELIH U ZID KAPILARNOM VLAGOM

U poglavlju 1.1.1. upoznali smo se s mehanizmom kapilarne vlage. Vлага u tlu sadrži razne otopljenjive soli čiji kemijski sastav ovisi o sastavu slojeva kroz koje je voda prolazila. U zoni isparivanja vlage soli se izlučuju na površini ili neposredno pod površinom zida. Prema Arnoldu i Zehnderu (1989), u najdonjoj zoni kristaliziraju teže topljivi karbonati i sulfati, u srednjoj kristaliziraju miješano sulfati, nitrati i kloridi, a u najgornjoj se zoni akumuliraju nitrati i kloridi (sl. 27). U toj najgornjoj zoni soli su pretežno otopljenjive i kristaliziraju samo za vrlo niske relativne vlage zraka. To je zbog toga što su te soli vrlo higroskopne, odnosno imaju vrlo niske vrijednosti *ravnotežne relativne vlage zraka*². Zbog toga je zid u toj zoni vlažniji nego u donjim dijelovima.

Ravnotežna relativna vlaga zraka (φ_R) je ona relativna vlaga zraka kod koje sol pri danoj temperatu-

² Ravnotežnu relativnu vlagu zraka ne treba brkati s higroskopnim ili ravnotežnim sadržajem vlage (v. poglavlje 2.2.4. i Rječnik).

ri počinje upijati vlagu iz zraka pa se sol otapa (Ashurst i Dimes, 1990). Nasuprot tome, kada se ambijentalna relativna vlaga (φ) smanji ispod vrijednosti ravnotežne relativne vlage (φ_R), dolazi do prezasićenja otopine i kristalizacije soli.

Vrijednosti za ravnotežne relativne vlage zraka (φ_R %) za neke soli prikazane su na tablici (Arnold i Zehnder, 1989):

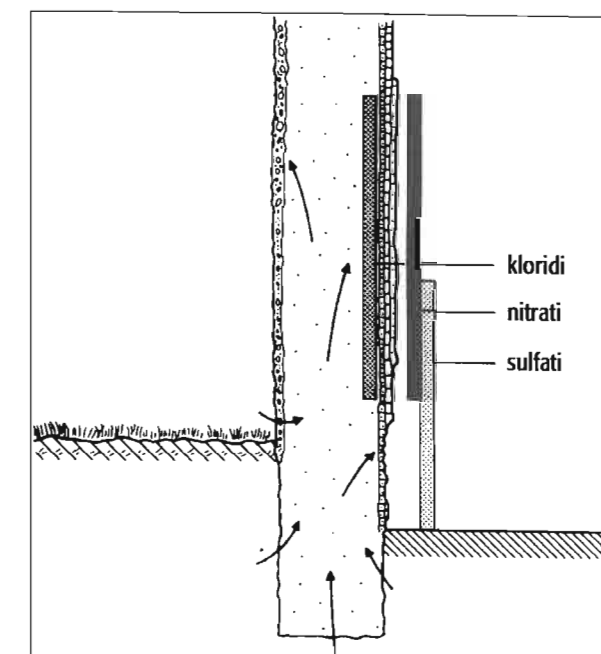
SOL	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	41,0	37,7	33,7		30,8	28,6	22,4
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	33,7	33,6	33,5	33,3	33,1	32,8	32,4
$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	43,1	43,1	43,1	43,2	43,2	43,2	43,2
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	59,0	59,6	56,5	54,0	53,6	50,5	46,8
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	60,4	58,9	57,4	55,9	54,4	52,9	51,4
NH_4NO_3						61,8	
NaNO_3		78,6	77,5	76,5	75,4	74,3	73,1
NaCl	75,5	75,7	75,7	75,6	75,5	75,3	75,1
Na_2SO_4					82,0	82,8	84,3
KCl	88,6	87,7	86,8	85,9	85,1	84,3	83,6
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$			86,9		90,1	88,3	88,0
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$				96,5	97,9	88,2	83,2
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$				95,2	93,6	91,4	87,9
KNO_3	96,3	96,3	96,0	95,4	94,6	93,6	92,3
K_2SO_4	98,8	98,5	98,2	97,9	97,6	97,3	97,0

Ove vrijednosti ravnotežne relativne vlage zraka vrijede u zatvorenom sustavu, npr. u klimakomori. Na zidu sa solima je nešto drukčiji odnos između količina otopine soli i mase zraka koja struji uza nj. Stoga se te vrijednosti moraju odrediti empirijski. Tako je ispitivanjima utvrđeno je da npr. NaCl , čija ravnotežna relativna vlaga zraka kod 20°C iznosi 75,4%, kristalizira na zidu kada se relativna vlaga zraka spusti ispod 60%, a ponovno se otapa iznad te vrijednosti (Arnold i Zehnder, 1996).

Toraca (1988) piše da je desorpcija (ili otpuštanje vode) također moguća ako je zid u dodiru sa zrakom niske relativne vlage. Međutim, fenomen histereze čini desorpciju težom od adsorpcije, jer je ona moguća pri nižoj relativnoj vlazi od one kada nastupa adsorpcija, kao npr. NaCl , koji može adsorbirati vodu od 75% vlage zraka navise, ali je počinje otpušati tek ispod 70%.

1.2.3. HIGROSKOPNA VLAGA UZROKOVANA INICIJALNIM SOLIMA

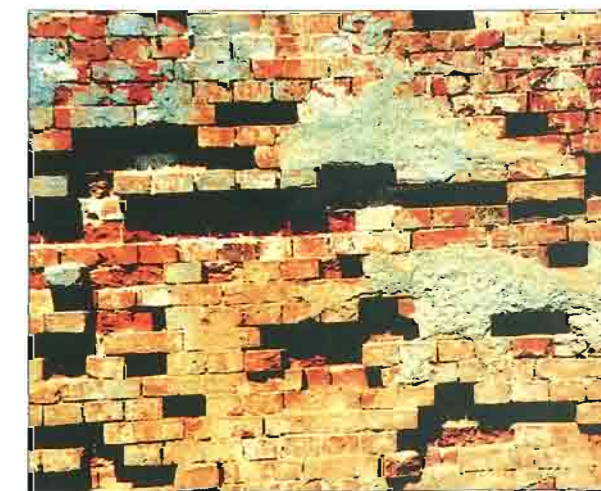
Inicijalne soli, odnosno soli koje su se nalazile u sastavu građevnog materijala prije njegove ugradnje, najzastupljenije su u nekim vrstama opeka. Te



27 Shematizirani prikaz raspodjele raznih topljivih soli u zidu (iz: Arnold i Zehnder, 1996)

Diagram of the distribution of various soluble salts in a wall (after Arnold and Zehnder, 1996).

soli potječu od gline bogate solima. To su najčešće natrijev, kalcijev i magnezijev sulfat (Ashurst i Dimes, 1990 a). Vrlo je čest slučaj da s neožbukanih fasada opeka naprosto »nestaje«. Pretvara se u crveni prah koji vjetar i kiša raznose, pa na mjestu gdje je bila opeka ostaje šupljina. Ta pojava nastaje kada vlaga djeluje na staklastu komponentu u opeci i razgrađuje ju, pa se oslobađaju alkalije. Razgradnjom staklaste komponente kohezijske sile u opeci slabe pa se opeka počinje mrviti (sl. 28). Alkalije u dodiru s CO_2 iz zraka stvaraju alkalijske



28 Inicijalne soli, koje potječu iz gline od koje je radena opeka, mogu utjecajem vlage iz zraka uzrokovati potpunu razgradnju materijala.

Initial salts, deriving from the clay from which brick is made, can lead to total disintegration of the material under the influence of moisture in the air.



29 Stalaktiti i stalagmiti nastali izluživanjem vapna iz armirano-betonske ploče nad arheološkim lokalitetom Bunićeva poljana u Dubrovniku.

Stalactites and stalagmites created by the leaching out of lime from a reinforced concrete slab above the archaeological site of Bunićeva poljana in Dubrovnik.

karbonate, a oni svojim kristalizacijskim i hidratacijskim tlakovima još više pospješuju razgradnju opeke (Perander i Nieminen, 1983).

Neke vrste kamena mogu sadržavati soli još iz vremena njihova nastajanja. Najčešći su sastojci kloridi, dok su sulfati sadržani u manjem postotku. Analizama topljivih soli u ležištima arhitektonsko-gradevnog kamena vanjskih Dinarida utvrđeni su inicijalni kloridi čija se koncentracija kretala između 0,013 i 0,079%, dok su sulfati nađeni samo u tragovima (Crnković i Babić, 1983). Prema tablicama štetnosti topljivih soli (Dignas, 1994), kloridi u koncentraciji od 0,03 do 0,100% označuju moguću štetnost, pa se dio analiziranih uzoraka nalazi u tom rasponu. Ako je kamen vađen uza samu morskobalu, kontaminacija solima mogla je nastati i kada je stijena već bila formirana. Onečišćenje morskim solima moguće je i ako se kamen vadi iz depresija ispod razine mora u koje kroz pukotine prodire morska voda. Takav će kamen ubrzo nakon ugradnje pokazati znakove cvjetanja soli, ljuškanja i propadanja.

1.2.4. HIGROSKOPNA VLAGA UZROKOVANA UPORABOM MORSKOG PIJESKA ZA ŽBUKE I MORTOVE

Nerijetko žbuke i mortovi imaju štetne sastojke koji mogu potjecati i iz punila i iz veziva. Ako je za pripremanje žbuke upotrebljavan neisprani morski pijesak, neminovno će žbuka biti onečišćena morskim solima. Pretežni sastojak morskih soli jest natrijev

klorid, ali one sadrže i cijeli niz drugih soli. Te će soli uzrokovati stalno vlaženje zidova i propadanje ova kve žbuke ili morta. Destruktivni proces koji su započele proširit će se i na ugrađeni kamen ili opeku.

Tablica koncentracije glavnih soli iz morske vode za Sredozemlje (prema Augeru, 1989) u g/L:

NaCl	30,76
KCl	0,66
MgCl ₂	3,74
CaSO ₄	1,64
MgSO ₄	2,39
Ostale soli	0,07
Ukupno soli	39,26 g/L (ili 3,926 %)

1.2.5. HIGROSKOPNA VLAGA UZROKOVANA UPORABOM PORTLAND-CEMENTA

Odmah na početku treba istaknuti da je portland-cement u novogradnji nezaobilazan građevni materijal velike čvrstoće i prihvatljive cijene. U novoizgrađenim objektima u kojima su provedene sve mjere protiv štetnoga djelovanja raznih oblika vlage, portland-cement uporabljen u betonu, mortu i žbuci neće stvarati nikakve nevolje jer ti materijali zbog adekvatne hidroizolacije neće doći u dugotrajni dodir s velikom količinom vlage. Zato neće biti izlučivanja štetnih soli koje su sastojci portland-cementa, a koje djeluju razarajuće na strukturu materijala. Ovdje će se naglasiti štetnost portland cementa pri raznim naknadnim građevinskim intervencijama na starim zgradama čiji su zidovi zbog pomanjkanja hidroizolacije (ili loše izvedene i uništene hidroizolacije) vrlo vlažni. Posebnu pozornost treba obratiti na uporabu portland-cementa pri konzervatorsko-restauratorskim zahvatima na zgradama koje imaju kulturnospomeničku vrijednost.

O štetnosti uporabe portland-cementa pri restauriranju starih građevina, uz brojne strane autore (Feilden i dr.), pisano je i u domaćoj stručnoj literaturi (Malinar, 1996). Izlučivanjem topljivih soli sadržanih u cementu nastat će štete u zonama isparavanja vlage i koncentriranja tih soli. Riječ je o alkalijskim karbonatima koji se prigodom rekristalizacije pojavljuju u nekoliko modifikacija. Natrijev se karbonat pojavljuje kao: *natron* – Na₂CO₃·10H₂O, *termo-natrit* – Na₂CO₃·H₂O, *nabkolit* – NaHCO₃ i *trona* – Na₃H(CO₃)₂·H₂O, a kalijev karbonat u svojem kiselom obliku kao *kalicinit* – KHCO₃.



30 Sigasta kora na kapitelu u klausturu franjevačkoga samostana u Rožatu kod Dubrovnika

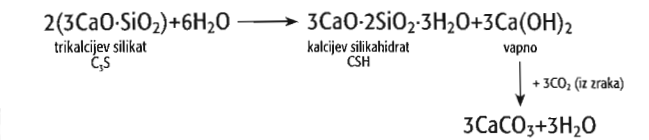
Dripstone crust on a capital in the cloister of the Franciscan Monastery in Rožat, by Dubrovnik.

Prema Arnoldu i Zehnderu (1989) iz 100 kg portland-cementa koji sadrži 0,1% Na₂O, isplavlivanjem nastaje 460 g *natrita*, Na₂CO₃·10H₂O. Kad natrit reagira sa sulfatnom kiselinom iz onečišćenog zraka, nastaje 520 g *mirabilita*, Na₂SO₄·10H₂O. To su štetne higroskopne soli s kristalnom vodom koje stvaraju visoke hidratacijske tlakove. Posljedice su toga vrlo ozbiljne, a štete na zidnim slikama, kamenu i žbuci su nepovratne.

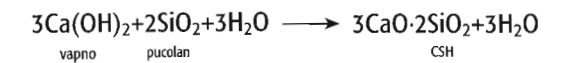
Smjese za injiciranje zidova u svrhu statičke sanacije starih građevina često sadrže portland-cement. U takvom slučaju prvobitno se zaista postiže sanacijski učinak, ali s vremenom se u dodiru s vlagom (ako ona nije u potpunosti sanirana) aktiviraju topljivi karbonati iz portland-cementa koji dugoročno stvaraju štetu građevini. Sličan je i slučaj s nekim žbukama za sanaciju vlage koje sadrže portland-cement. Stoga bi svaki sanacijski materijal trebao sadržavati cement koji ne sadrži topljive soli ili ih ima u neškodljivoj koncentraciji. Takva sanacijska sredstva trebala bi imati certifikat o kemijskom sastavu i količinama kontraindikacijskih tvari.

Portland-cement iz betona i cementnih »prođužnih« žbuka može izazvati i pojavu cjedina koje se osobito ističu na kamenim ploham. One nastaju od nevezanoga kalijeva oksida u cementu. Na zidovima i svodovima, iznad kojih dolazi do otapanja vapna iz cementa, mogu nastati sige slične kao i u špiljama (sl. 29 i 30).

Eflorescenciju može uzrokovati i nevezani magnezij iz cementa, ako ga ima više od 5% (Stambolović i van Asperen de Boer, 1976). Dio vapnenih cjedina može nastati hidrolizom trikalcijeva silikata, C₃S (Venzmer et al., 1991):



Ova se pojava može spriječiti dodatkom SiO₂ cementu u obliku *pucolana*:



Kao pucolan mogu se uporabiti vulkanski pepeo, mljevena opalna breča, dijatomejska zemlja i drugi materijali koji sadrže veliki postotak sitnih čestica SiO₂.

Na kraju treba zaključiti da uporaba portland-cementa nije štetna pri gradnji novih zgrada ako su poduzeti svi propisani zahvati na hidroizolaciji. Portland-cement nije dopustiv za veće sanacijske zahvate na starim zgradama spomeničkih vrijednosti ako nije u potpunosti izvedena sanacija vlage. Pod time se razumijevaju svi oblici vlage, a ne samo kapilarna. Kao zamjenski materijal za portland-cement trebaju poslužiti cementi s deklaracijom o neškodljivim koncentracijama topljivih soli ili mortovi izrađeni na bazi kvalitetnoga gašenog vapna s pucolanom.

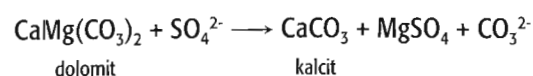
Ovo ipak ne znači da se pri restauriranju malih površina ne smije na spomenicima kulture uporabiti portland-cement. Za manje retušne oštećenja na fasadnim kamenim reljefima i skulpturama smije se rabiti smjesa portland-cementa, kamenog praha i aditiva (akrilne emulzije i sl.) bez bojazni za štetne posljedice. Čak i eventualni dodir s vlagom može iz tako male količine cementa izlučiti samo neznatne količine soli u zoni isparavanja, koje neće štetano utjecati na građevni materijal.

1.2.6. HIGROSKOPNA VLAGA UZROKOVANA AEROSOLOM

Aerosol (sitne krute čestice ili kapljice u zraku) nastaje u onečišćenoj urbanoj ili industrijskoj atmosferi, a u priobalju može biti i morskog postanka.

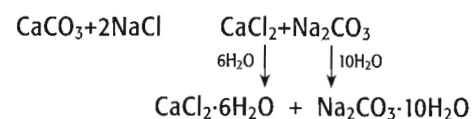
Najopasniji od svih onečišćivača za građevinske materijale jest sulfatna (sumporna) kiselina. Ona na površinu građevine dospijeva u obliku kisele kiše ili smoga i tamo se kondenzira. Sulfatna kiselina uglavnom nastaje izgaranjem fosilnih goriva koja sadrže

Ako građevinski materijal sadrži dolomit (dolomitni agregat, dolomitno vapno, dolomitni kamen), u dodiru sa sulfatima ili sulfatnom kiselinom razgrađuje se u karbonate i magnezijev sulfat, $MgSO_4$ (Arnold i Zehnder, 1996):



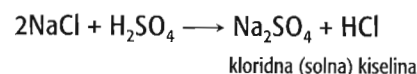
Taj $MgSO_4$ može, ovisno o relativnoj vlazi i temperaturi zraka, biti u više modifikacija kao: $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $MgSO_4 \cdot 6H_2O$ ili $MgSO_4 \cdot H_2O$. Pri prelasku iz jedne modifikacije u drugu mijenjaju se hidratacijski tlakovi koji štete građevinskome materijalu.

U priobalnom pojasu pri puhanju jakih vjetrova iz smjera mora mogu građevinski materijali biti onečišćeni morskim solima. Među njima je dominantan natrijev klorid ($NaCl$) čiji je mineraloški naziv *halit*. Izložene dijelove zgrade ispirat će kiša. No, često donošenje soli na površine koje kiša rijetko ili nikada ne ispiri, dovodi do koncentriranja soli u pornom prostoru građevnog materijala. Osim destruktivnoga procesa sušenja/vlaženja tu je prisutan i kemijski proces ionske zamjene kalcijeva iona s natrijevim. Tako nastaju kalcijev klorid i natrijev karbonat. Oba spoja sadrže kristalnu vodu, pa se s povećanjem volumena novonastalih kristala razvijaju razorni hidratacijski tlakovi. U građevnom materijalu u kojem je glavni sastojak kalcijev karbonat nastaje ionska zamjena:



Oba ova spoja topljivija su od kalcita (kalcijeva karbonata), pa dolazi do kemijskog otapanja, odnosno korozije kamena vapnenca ili žbuke.

Na čestice natrijeva klorida u obliku aerosola može djelovati sumporna kiselina nastala na prije opisani način. Tako će uz natrijev sulfat nastati kloridna (solna) kiselina (Fassina, 1976):



Naravno da će i kloridna kiselina ostaviti štetne posljedice na kamenu i žbuci pretvarajući kalcijev karbonat u topljivi kalcijev klorid.

Sustavna istraživanja aerosola u Veneciji pokazala su da se u urbanoj atmosferi priobalja uz krute čestice čađe mogu naći u znatnim količinama i sumporna kiselina, solna kiselina, sulfati, kloridi i sumporni diok-

³ polutant – onečišćivač

sid (Fassina, 1976). Tako su se srednje mjesečne vrijednosti sulfata u promatranom razdoblju kretale između 18 i 70 $\mu g/m^3$ zraka, a klorida od 3 do 12 $\mu g/m^3$. Mjerenja u Šibeniku obavljena u vrijeme puhanja juga (16.-19. 12. 1983.) pokazala su prosječnu koncentraciju sulfata od 4,8 $\mu g/m^3$, a klorida od 26,6 $\mu g/m^3$. Istodobno su provedena mjerenja unutar šibenske katedrale koja su pokazala jednako visoku koncentraciju ovih polutanata,³ što se odrazilo u razgradnji kamena na mjestima kondenzacije vlage i taloženja aerosola (Malinar, 1992/93).

I nitrati mogu imati dosta visoki udio u onečišćenoj atmosferi. Nastaju izgaranjem pogonskog goriva za automobile ali i u industriji. U tropskim i subtropskim područjima nastaju i prigodom jakih oluja s električnim pražnjenjima (Winkler, 1970).

1.2.7. HIGROSKOPNA VLAGA OD SOLI ZA ZIMSKOG POSIPAVANJA CESTA

Gruba morska sol upotrebljava se protiv poledice i njome se posipavaju ceste i pločnici u zimskom razdoblju. Sol snižava ledište pa se led otapa i nestaje. A slana voda dolazi u dodir sa zidovima građevina koji zbog soli postaju sve higroskopsniji. Sol se prenosi na cipelama prolaznika u zatvorene prostore gdje kontaminira podove i donje dijelove zidova. Kada se ceste i pločnici posuše, jak vjetar može podići s tla čestice soli koje na svojem putu dospijevaju i na pročelja zgrada i povećavaju im higroskopsnost.

1.2.8. HIGROSKOPNA VLAGA OD SOLI ANIMALNOG PODRIJETLA

Fekalije raznih životinja (ptica, šišmiša i dr.) nagomilane u tavanskim prostorima ili crkvenim zvonnicama također mogu biti izvori soli i higroskopsnosti. U životinjskom izmetu kloridi su redovni sastojci zbog načina prehrane, dok nitrati nastaju iz amonijaka preko mikroorganizama. Nitrifikantne bakterije najprije oksidiraju amonijak u nitritnu, a dalje posredstvom nitroznih bakterija u nitratnu kiselinu. Ta kiselina reagira s karbonatnim mineralima iz kamena ili žbuke i stvara nitratne soli. U slučaju prodora vode kroz oštećeni krov ili žljebove, otopljene se soli transportiraju prema zidovima. U zoni isparivanja postupno dolazi do akumuliranja soli i pojave higroskopsnosti (Arnold i Zehnder, 1989). I učestala mokrenja pasa po soklima kuća mogu kroz dulje razdoblje akumulirati štetne soli.



34 Štetne posljedice djelovanja vodenoga stakla na zid nastale nakon izvedbe horizontalne kemijske hidroizolacije (iz: Wih r, 1986)

Harmful consequence of the action of sodium silicate on a wall after the execution of horizontal chemical hydro-insulation (from Wih r, 1986).

1.2.9. HIGROSKOPNA VLAGA OD SOLI UNESENIH U ZID UPORABOM NEADEKVATNIH TVARI ZA KONZERVIRANJE

Prije otkrića etilsilikata kao uspješnog konsolidanta⁴ u prošlosti se u tu svrhu u priličnoj mjeri koristilo vodeno staklo (kalijev i natrijev silikat). Posljedice su štetne jer se pri njihovoj uporabi, osim učvršćujućeg kremena, kao nusprodukt oslobađa štetan kalijev ili natrijev karbonat. I izvedba horizontalne kemijske hidroizolacije vodenim staklom često naknadno uzrokuje štetne posljedice (sl. 34).

Štete može uzrokovati i restauriranje oštećenja na kamenim dijelovima zida s pomoću gipsa. Takva su oštećenja utvrđena pregledom i analizama na portalu katedrale sv. Stošije u Zadru.

1.3. KONDENZNA VLAGA

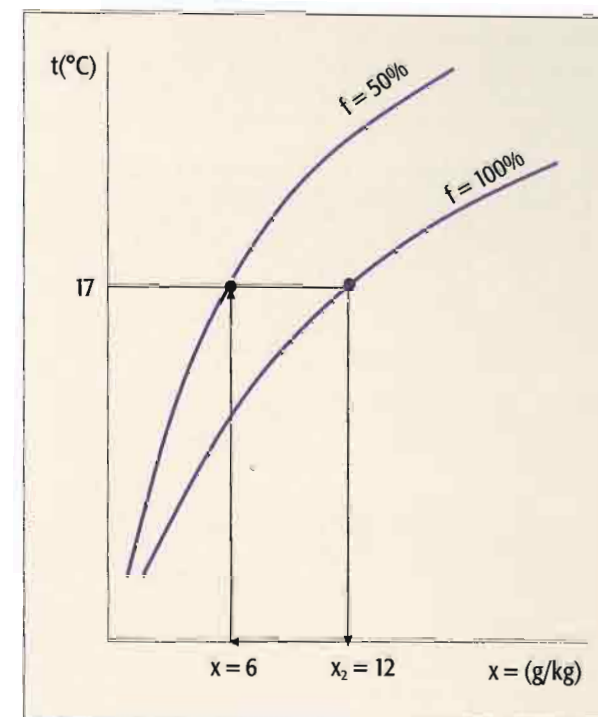
1.3.1. VLAGA ZRAKA KAO UVJET ZA KONDENZACIJU: APSOLUTNA I RELATIVNA VLAGA; ROSIŠTE

Kondenzacija ili rošenje vodene pare pretežno se događa na unutarnjim plohama građevine, iako po-

⁴ konsolidant – učvršćivač

⁵ U literaturi se mogu katkad susresti i nazivi apsolutna i relativna vlažnost zraka. Ovdje ćemo rabiti izraze u obliku apsolutna i relativna vlaga zraka.

⁶ Koncentracija vodene pare u zraku ponekad se u literaturi i dijagramima izražava i kao specifična vlaga zraka (g/kg), ili sadržaj vlage u zraku (kg/kg, g/kg). U ovoj je knjizi na Mollierovu i-x dijagramu apsolutna vlaga prikazana oznakom x (g/kg).



35 Odnos apsolutne vlage zraka (x) i relativne vlage zraka (φ) pri konstantnoj temperaturi (t) i barometarskome tlaku od 1013 milibara. Smanjenjem apsolutne vlage smanjuje se i relativna vlaga zraka.

Ratio of absolute humidity of air (x) and relative humidity (φ) at a constant temperature (t) and a barometric pressure of 1013 mb. With a reduction in absolute humidity, the relative humidity of the air also drops.

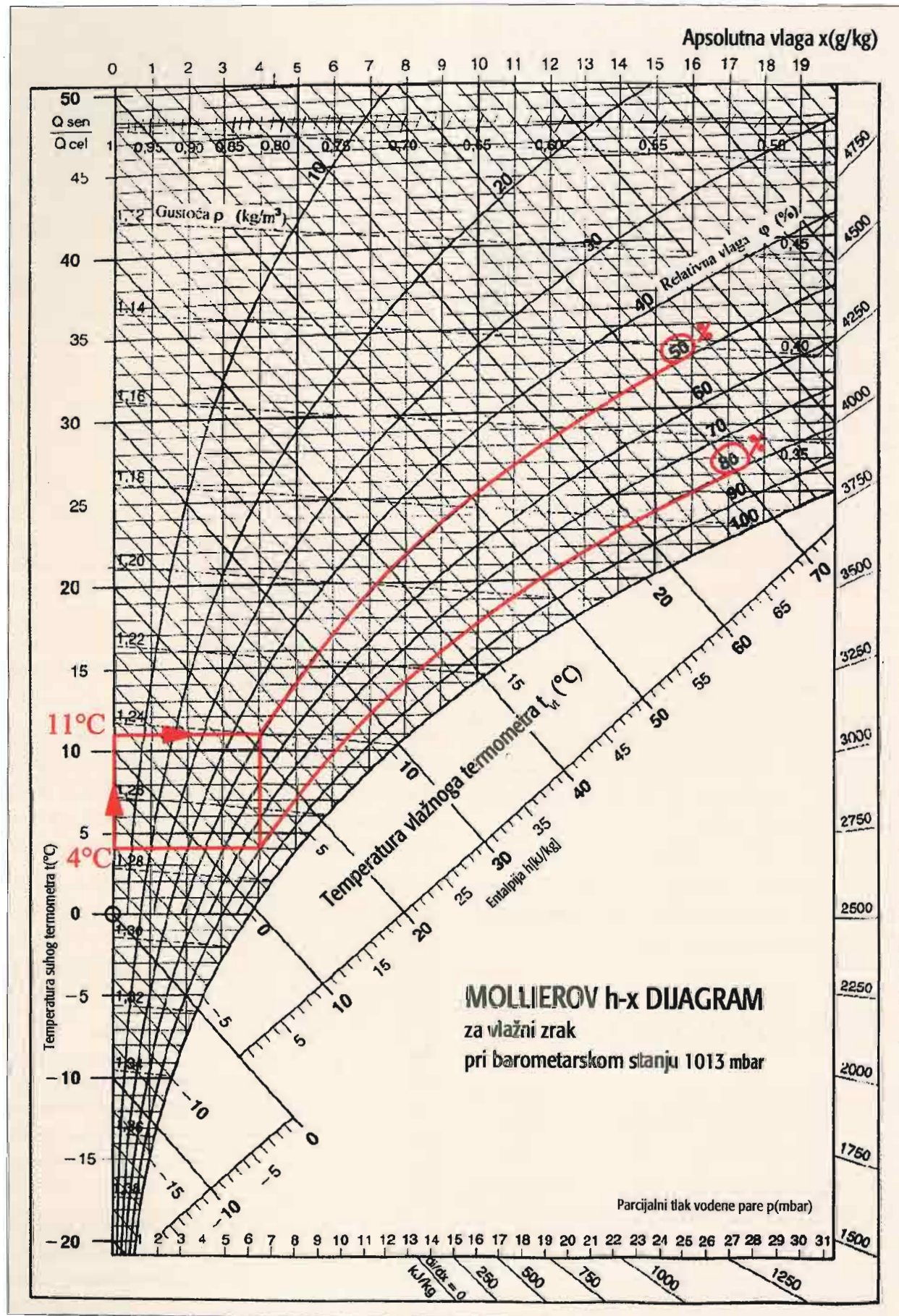
nekad nastaju uvjeti i za vanjsku kondenzaciju. Uzroci mogu biti različiti, ali se ta pojava poglavito događa kod povećane vlage zraka. Da bismo mogli bolje pratiti nastajanje rošenja u različitim uvjetima upoznajmo se najprije s pojmom vlage u zraku.

Zrak se sastoji od smjese plinova (dušika, kisika, ugljikova dioksida i nešto malo inertnih plinova) i vodene pare. Ta vodena para može biti sadržana u promjenljivim količinama i naziva se vlaga zraka. U fizici se barata s dva pojma vlage zraka. To su apsolutna i relativna vlaga zraka⁵.

Apsolutna vlaga zraka definirana je kao koncentracija vodene pare u zraku. U domaćoj i stranoj literaturi izražava se na različite načine: kao masa vodene pare u jedinici volumena suhoga zraka (g/m^3), ili kao masa vodene pare u jediničnoj masi suhoga zraka (g/kg , kg/kg)⁶.

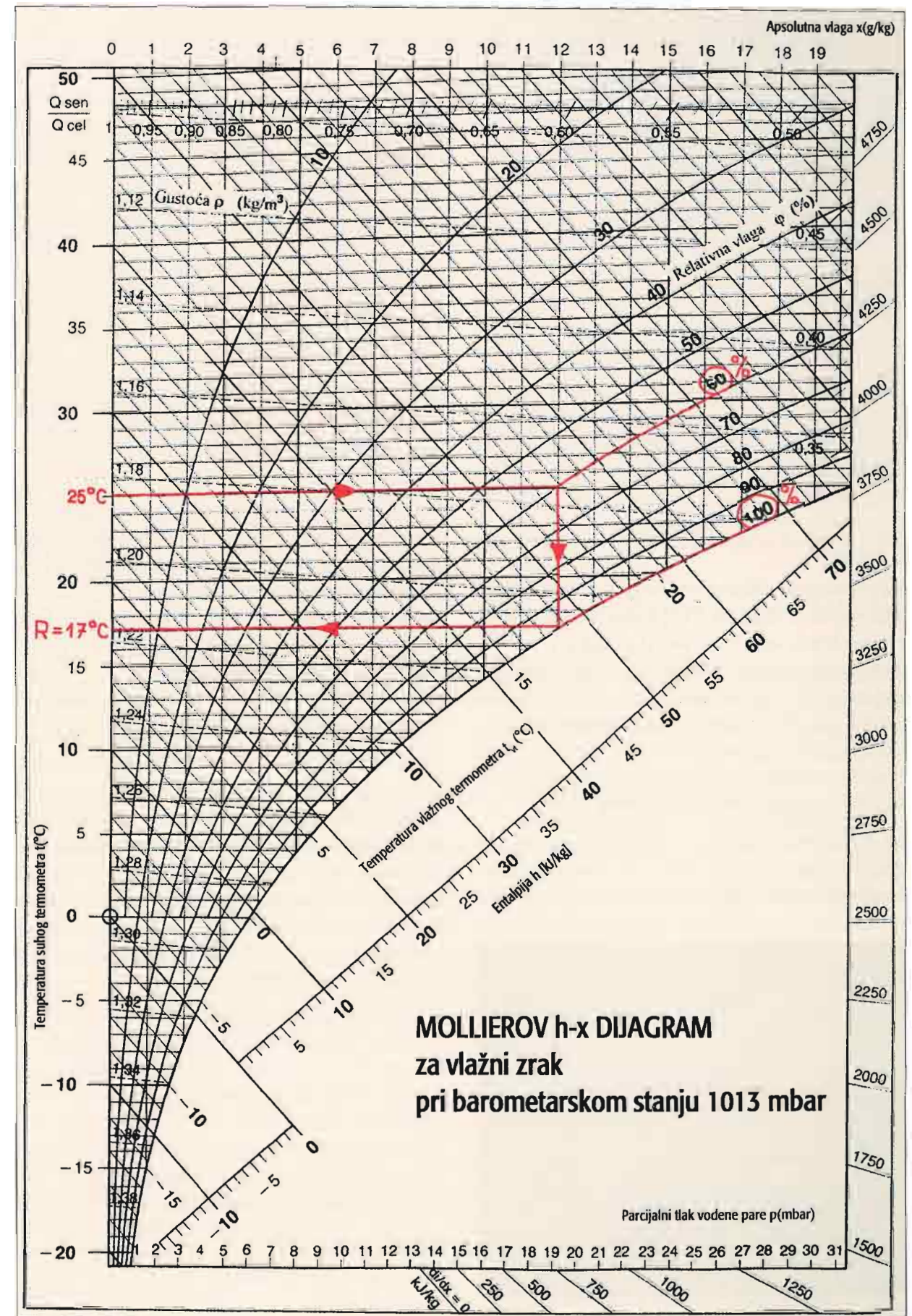
U tehničkim, a posebno u meteorologiji, zbog praktičnih se razloga mnogo više rabi pojam relativna vlaga zraka, koji označuje stupanj zasićenosti zraka vodenom parom. Najčešće se označava grčkim slovom ϕ (φ).

Relativna vlaga zraka definira se kao omjer apsolutne vlage (x) prema maksimalno mogućoj količini



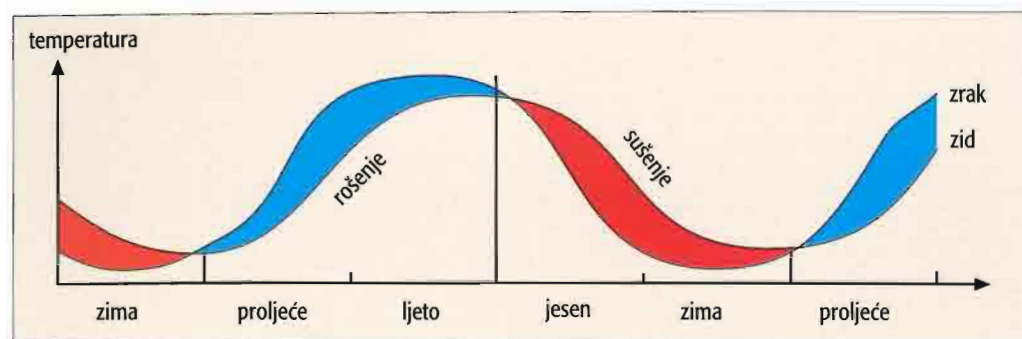
36 Mollierov h-x dijagram: primjer smanjenja relativne vlažnosti zraka (φ) s porastom temperature zraka (t) uz konstantnu apsolutnu vlagu (x)

Mollier's h-x diagram: example of reduction of relative humidity (φ) with rise in air temperature (t) with a constant absolute humidity (x).



37 Primjer određivanja t_r i relativne vlažnosti 60% rosit će se pri relativnoj vlažnosti 100%. To će se dogoditi (pri konstantnoj apsolutnoj vlažnosti x) ako mu se temperatura spusti na 17°C.

Example of the determination of the dew point: air with a temperature of 25°C and a relative humidity of 65% will dew at a relative humidity of 100%. This will happen (at a constant absolute humidity x) if the temperature drops to 17°C.



37a Usporedba srednje temperature zraka s temperaturom zida na unutarnjoj površini negrijane zgrade. Kada je temperatura zida niža od temperature zraka nastaju uvjeti za rošenje, kada je temperatura zida viša od temperature zraka, zid se suši.

Comparison of mean air temperature with wall temperature on the internal surface of an unheated building. When the temperature of the wall is lower than the air temperature, the conditions for condensation arise, and when the wall is warmer than the air, drying takes place.

ni vlage koju zrak pri danoj temperaturi još može prihvatiti (x_2). Taj relativni odnos iskazuje se u postocima (φ %):

$$\varphi = \frac{x}{x_2} 100(\%)$$

Na pojednostavnjenom Mollierovu i-x dijagramu (koji vrijedi za tlak zraka 1013 mbara, a približno i za tome bliske vrijednosti tlaka) prikazan je primjer stanja zasićenog zraka vlagom ($\varphi = 100\%$) pri temperaturi 17°C . Apsolutna vlaga pri zasićenju iznosi $x_2 = 12 \text{ g/kg}$. Ako bismo pri istoj temperaturi smanjili apsolutnu vlagu na polovicu, tj. na 6 g/kg , relativna bi se vlaga također smanjila na polovicu, tj. od 100% smanjila bi se na $\varphi = 50\%$ (sl. 35).

Na sljedećem se primjeru vidi da uz konstantnu apsolutnu vlagu relativna vlaga s povišenjem temperature pada, a sa sniženjem raste (sl. 36).



38 Česta kondenzacija vlage iz zraka na podnom je mozaiku u pulskoj katedrali uzrokovala nastajanje kalcitne skrame. Frequent condensation of humidity from the air on a floor mosaic in Pula Cathedral has led to the creation of a calcite film.

Kada relativna vlaga zraka dosegne iznos od 100% , započinje kondenzacija vodene pare u zraku, odnosno nastaje magla.

Na zidu se kondenzacija⁷ događa kada je zid hladniji od okolnoga zraka, odnosno kada topli zrak dospije do površine hladnog zida. Kolika treba biti razlika između temperature zraka i zida, vidi se na Mollierovu h-x dijagramu (sl. 37). Temperatura pri kojoj nastupa zasićenje zraka vodenom parom zove se rosište. Tako se npr. zrak temperature 25°C i relativne vlage 60% treba ohladiti na 17°C da bi se zasitio do 100% , odnosno da bi došlo do kondenzacije.

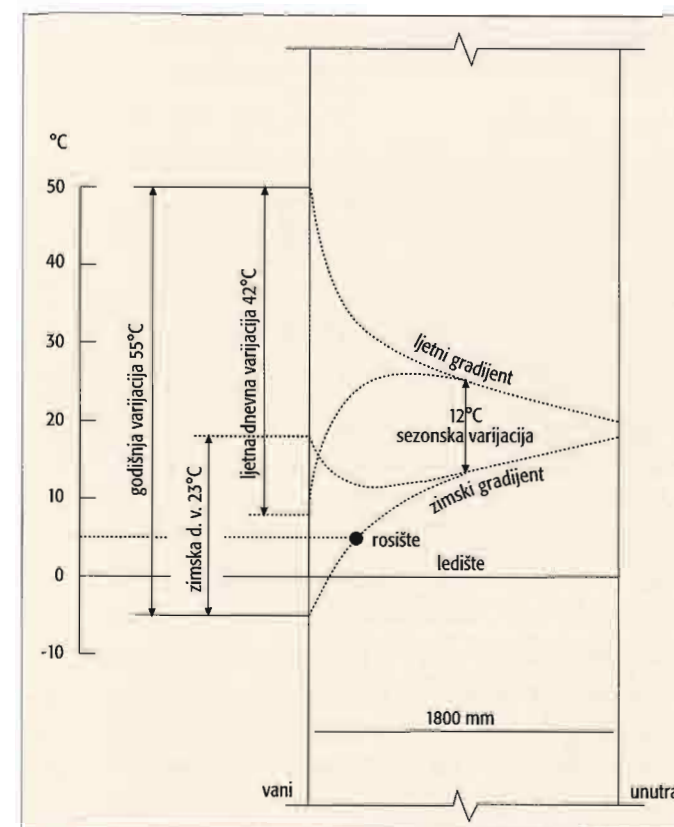
Zbog toga možemo reći da se kondenzacija događa kada temperatura zida (poda ili stropa) padne ispod rosišta. Treba imati na umu da je kondenzacija kritični fenomen. Ona se ili događa ili ne događa. Nema prijelaznoga stanja. Očituje se kao tanki film sličnih kapljica izlučene vodene pare na hladnoj površini. Otpušta latentnu toplinu i privlači sve tipove zračnog onečišćenja, čime je vrlo aktivan čimbenik u razaranju materijala.

Treba napomenuti da apsorbirajući materijali neće pokazati kondenziranu vlagu na površini iako se određena količina vodene pare tamo izlučila (v a n Asperen de Boer, 1967).

1.3.2. KONDENZACIJA NASTALA ZIMI U GRIJANOM PROSTORU SA SLABOM TERMOIZOLACIJOM ZIDA

U hladnom razdoblju godine kondenzacija na unutarnjim plohamo zidova događa se u grijanim prostorima u slučaju kada su zidovi vrlo tanki i slabo su toplinski izolirani. Toplina se gubi kroz zid pre-

⁷ kondenzacija – zguščivanje; prelazak pare u tekuće stanje, odnosno rošenje.



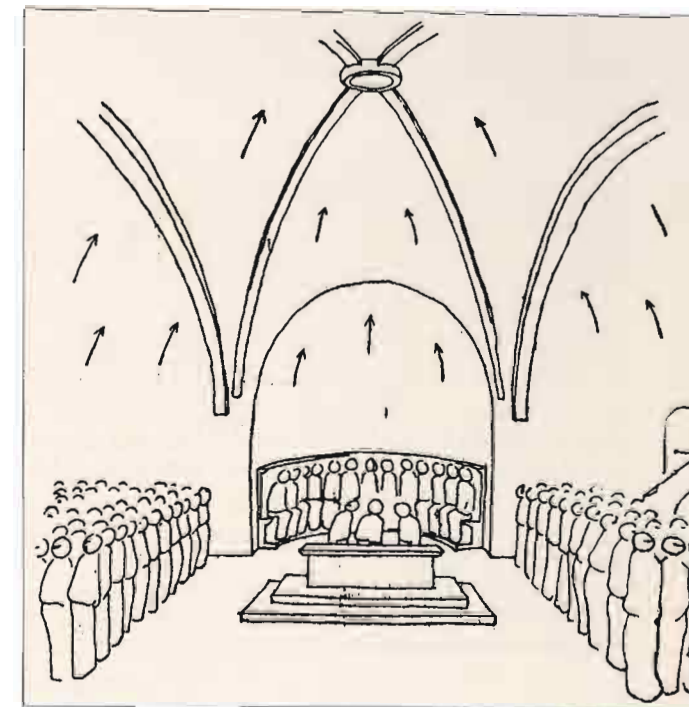
38a Teorijska temperaturna kolebanja u debelome zidu zgrade (prema Feildenu, 1982). Zimi se rosište nalazi u strukturi zida, pa mogu smrzavanjem vanjskoga sloja nastati ozbiljne štete.

Theoretical temperature fluctuations in a thick wall of a building (according to Feilden, 1982). In winter the dew point lies in the structure of the wall, and serious damage can be caused by freezing of the outer layer.

ma vanjskom prostoru. Kada je odvodnja topline radijacijom⁸ veća od dovoda topline iz unutarnjega prostora, zid se osjetno ohladi u usporedbi s unutarnjim zrakom. Topli zrak konvekcijom⁹ dolazi do površine zida i kondukcijom¹⁰ predaje svoju toplinu zidu. Padom temperature zraka povećava se relativna vlaga zraka uz sam zid. Vodena se para tu zasićuje i nastaje rošenje. Na takvim se mjestima ubrzo pojavljuju tamne plijesni neugodna izgleda *Aspergillum niger* i *Penicillium sp.* Najčešći primjer pojave kondenzacije jest rošenje površine zidova s lošom termoizolacijom u kuhinjama i kupaonicama. Tamo se relativna vlaga dodatno povisuje ne samo stvaranjem razlike u temperaturi zraka i zida nego i povećanjem apsolutne vlage nastale isparavanjem prigodom kuhanja ili kupanja.

Ukratko, kondenzacija se zimi događa na slabo izoliranim zidovima ako se:

1. snizi temperatura vanjskoga zraka, pa se zidovi ohlade,
2. poveća apsolutna vlaga u unutrašnjosti,
3. naglo poveća temperatura zraka u unutrašnjosti,



39 Mnoštvo ljudi u zatvorenome neventiliranom prostoru može prouzročiti kondenzaciju na zidovima (iz: Mora i Philippot, 1977)

Many people in a closed and unventilated area can bring about condensation on the walls (from Mora and Philippot, 1977).

pa je zid još vrlo hladan u odnosu na unutarnji zrak (napose se odnosi na površine zaklonjene od radijacije grijaćeg tijela).

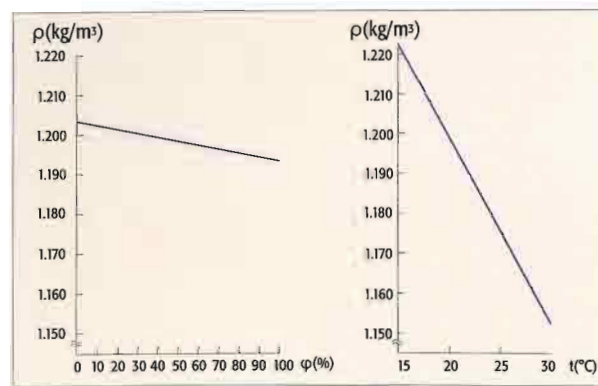
1.3.3. KONDENZACIJA NASTALA U PROLJEĆE U NEGRIJANOM PROSTORU

U prostoru koji zimi nije grijan zidovi se kroz više mjeseci osjetno ohlade. Nadolaskom proljeća nastupa toplije vrijeme pa se topao vanjski zrak, ulazeći u unutrašnjost, hladi na hladnim zidovima. Iz Mollierova i-x dijagrama vidimo da hlađenjem zraka raste relativna vlaga. Ako je temperaturna razlika između toploga ulazećeg zraka i hladnoga unutarnjeg zida dovoljno velika, na zidu nastaje kondenzacija. Pri dodiru s relativno toplim zrakom hladni se zid pomalo zagrijava, čime se s vremenom smanjuje mogućnost kondenzacije. No, dokle god postoji potrebna temperaturna razlika zraka i zida, dolazit će do kondenzacije. Deblji će se zidovi zagrijevati sporije od tankih jer imaju veći toplinski kapacitet. Tanki će se zidovi brže zagrijevati od debelih zbog grijanja Sunčevim zračenjem. Zidovi uz tlo i ispod razine tla spori-

⁸ radijacija – zračenje

⁹ konvekcija – vođenje toplinske energije zračnim strujanjem

¹⁰ kondukcija – vodljivost; prelazak topline s tijela na tijelo dodirnom



40 Zračno strujanje može nastati i zbog razlike u gustoćama dviju zračnih masa. Gušći će zrak imati silazni smjer gibanja, a rjeđi uzlazni. Temperatura zraka (desno) pritom ima važniju ulogu od relativne vlage zraka (lijevo).

Currents of air can come about because of the difference in the density of two masses of air. The denser air will have a downward movement and the thinner an upward direction. Air temperature (right) in this case has a more important role than relative humidity (left).

je će se zagrijavati od onih uz strop ili na katovima, jer je Zemlja veliki toplinski kondenzator pa će tamo pojava rošenja trajati mnogo duže.

Kondenzacija ovog tipa izrazita je u proljeće. U objektima koji imaju vrlo debele zidove u prizemnim dijelovima traje sve do početka ljeta (sl. 37a). Opisana se pojava događa i u druga godišnja doba izmjenama anticiklonalnog i ciklonalnog tipa vremena, a u određenoj se mjeri događa i izmjenama noći i dana. Što je relativna vlaga ulazećeg zraka veća, bit će potrebna manja temperaturna razlika između zraka i zida da bi nastupilo rošenje. Zbog toga je za južnog vremena u negrijanim prostorima pod često mokar (sl. 38).

Kondenzaciju pojačava i kiša koja namoči zidove. Oni se isparavanjem hlade pa se njihova temperatura može spustiti ispod rosišta (Feilden, 1982).

Rošenje zidova osobito se dugo zadržava u »hladnim džepovima« ili »mrtvim uglovima«. To su mjesta zaklonjena od zagrijavanja radijacijom, pa su plohe izložene samo konvekcijskom djelovanju toploga zraka koji ih nedovoljno zagrijava. Čak i tako mala količina dovedene topline u velikoj se mjeri odvodi kondukcijom kroz donje dijelove zida prema podu, temelju i tlu koje je toplinski inertno, pa su plohe zidova u mrtvim kutovima još dugo hladne u usporedbi s ulazećim zrakom.

Ukratko, kondenzacija u proljeće u negrijanim prostorima nastaje kada:

– vanjski topli zrak dođe u dodir s hladnim ploham a u unutrašnjosti;

– dođe do povećanja relativne vlage vanjskog zraka koji izmjenama dospije u unutrašnjost.

Zbog toga Massari (1977) i Feilden (1982) smatraju da će nekontrolirano prirodno prozračivanje u proljeće samo pojačati kondenzaciju.

1.3.4. KONDENZACIJA U STRUKTURI ZIDA (INTERSTICIJALNA KONDENZACIJA¹¹)

Temperatura zidova mijenja se promjenama temperature zraka. Te su promjene to inertnije što je veća debljina zida. Također će se sporije mijenjati temperatura zidova uz pod zbog temperaturne tromosti tla koje ima veliki toplinski kapacitet i toplinsku tromost. U nastupu toplog razdoblja površina se zida postupno zagrijava pa se nakon nekoga vremena temperatura na površini zida izjednači s temperaturom zraka. Zbog toga neće nastati rošenje na površini. No, na unutarnjem dijelu zida temperatura može biti niža i, ako je dosegla rosište vanjskoga zraka, doći će u dubini zida do kondenzacije (Vos, 1969; Stambolov i van Asperen de Boer, 1976; Feilden, 1982). Posljedice kondenzacije u strukturi napose su štetne kod vrlo niskih temperatura (sl. 38a).

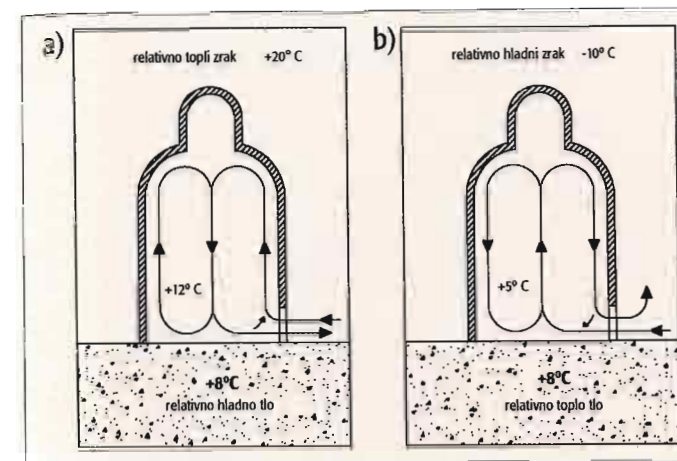
1.3.5. KONDENZACIJA INICIRANA HIGROSKOPNIM SOLIMA U ZIDU

Praćenjem termodinamičkih parametara u vezi s pojavom kondenzacije opaženo je da do rošenja zidova može doći iako je temperatura zida viša od rosišta. Takva se pojava događa kada je zid u većem stupnju kontaminiran higroskopskim solima (Ashurst i Dimes, 1990b). Pojava kondenzacije iznad temperature rosišta događa se u zgradama izloženima aerosolu na morskoj obali (Feilden, 1982). U priobalju čestice aerosola mogu inicirati kondenzaciju pri 70% relativne vlage zraka (Fassina, 1976). Dinamika izmjeničnoga vlaženja i sušenja, tj. otapanja i ponovne kristalizacije soli uzrokovat će daljnja razaranja materijala od kojeg je građen zid.

1.3.6. KONDENZACIJA UZROKOVANA NAZOČNOŠĆU MNOŠTVA LJUDI U ZATVORENOM PROSTORU

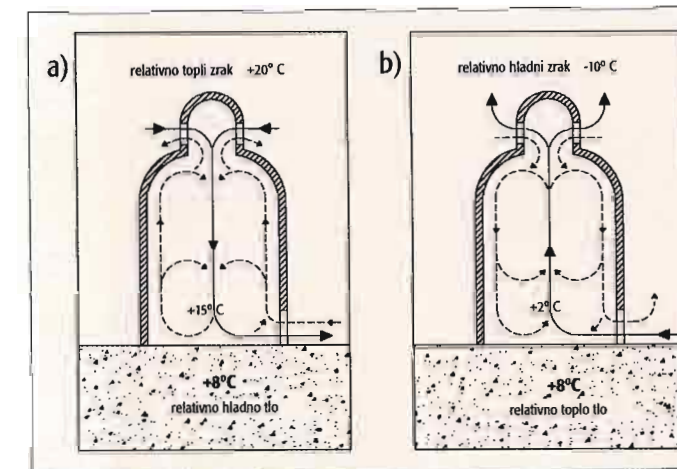
Kada se za hladnoga vremena nađe veći broj ljudi u zatvorenoj neventiliranoj prostoriji (npr. u crkvi za

¹¹ intersticij – međuprostor



41 Smjer gibanja zraka u prostoriji s jednim otvorom u nastupu zatopljenja (a) i zahladnjenja (b)

Direction of movement of air in a room with a single opening when warming (a) and cooling (b) occur.



42 Smjer gibanja zraka u prostoriji s dva ili više otvora na različitim razinama u nastupu zatopljenja (a) i zahladnjenja (b)

Direction of movement of air in a room with two or more openings at different levels when warming (a) and cooling (b) occur.

vrijeme mise u prigodi većih blagdana), dolazi do naglog povećanja apsolutne vlage u zraku zbog vodene pare koju ljudi izdišu, kao i zbog isparivanja znoja ili pokisle odjeće. U jednom satu čovjek može izlučiti između 50 i 100 litara vodene pare¹² (van Asperen de Boer, 1967). Rastom apsolutne vlage pri jednakoj temperaturi raste i relativna vlaga zraka, pa nastaje rošenje na zidovima, stropu i prozorima (sl. 39). Istina je da nazočnost većeg broja ljudi povisuje i temperaturu zraka, pa je brzina porasta relativne vlage nešto manja, ali to nije presud-

¹²Količina vodene pare od 50 do 100 litara preračunato odgovara približnoj količini vode od 40 do 80 grama.

no s obzirom na hladnoću zidova. Dio vlage porozni materijali upijaju, ali nakon saturacije nastaje cijedenje vode niz zidove. Voda otapa nečistoću pa tako nastaju ružni »curki«.

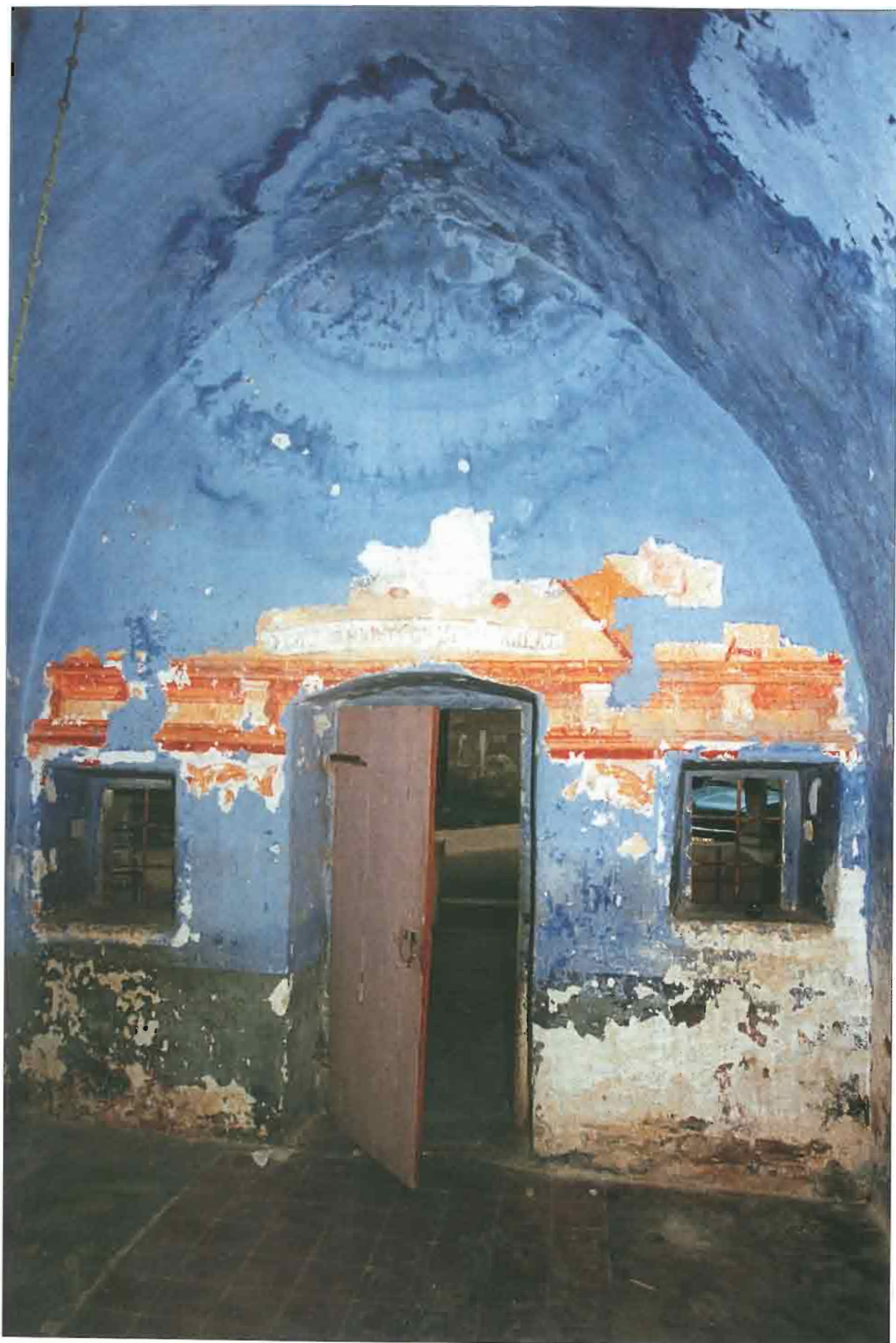
Ovako velika vlaga može utjecati na higroskopsnu vlagu, pa su štetne posljedice moguće i od ovog oblika vlage. Srećom, ova pojava nije tako česta. Uglavnom se događa u crkvama za velikih blagdanskih misa.

1.3.7. CIRKULACIJA ZRAKA U ZATVORENOM PROSTORU I UTJECAJ NA KONDENZACIJU ILI SUŠENJE ZIDA

Općenito se misli da prozračivanje prostora suši vlažne zidove. To je samo djelomično točno, jer cirkulacija zraka u jednom slučaju zaista suši zid, a u drugom ga čak još više ovlažuje. Uzroci tih pojava opširnije su opisani u poglavlju 1.3.3., a metode sanacije u poglavlju 3.3.2.

Na kondenzaciju na unutarnjim ploham neke zgrade utječe i cirkulacija zraka. Zračno strujanje u zatvorenome prostoru mogu uzrokovati različiti čimbenici. Jedan od njih jest razlika u gustoći vanjskoga i unutarnjeg zraka. Gustoća zraka pak ovisi o relativnoj vlazi i temperaturi zraka. Pritom će temperatura imati presudniju ulogu (sl. 40).

Grijanje prostora također potiče pojačanu cirkulaciju. I jak vjetar stvara propuh u unutrašnjosti. Smjer propuha ovisit će o smjeru vjetrova i o pozicijama otvora na zgradi. Isto će tako jaka strujanja nastati pri nastupu zahladnjenja ili zatopljenja. Pritom će se zračna masa različito gibati, u slučaju ako zgrada ima samo jedan otvor, ili ih ima više na različitim visinama. Na slikama 41 i 42 shematski je prikazano nekoliko situacija, koje uzrokuju cirkulaciju zraka u većem zatvorenom prostoru u slučaju slabe toplinske izoliranosti zidova i svoda. Prikaz je zbog razumljivosti pojednostavnjen, dok se u praksi vrlo često pojavljuju složeniji sustavi. Stoga će se smjerovi cirkulacije i posljedice u obliku kondenzacije ili sušenja teže prognozirati. Za ispravnu prognozu nužno je provesti niz kriptoklimatskih motrenja i mjerenja kojima će se točno utvrditi je li prirodno strujanje zraka u danom slučaju korisno ili možda čak štetno.



Sovinjak, crkva sv. Roka, Primjer prodora oborinske i kapilarne vlage (foto Vid Barac)

Sovinjak, Church of St Rochus, example of the penetration of rainwater and capillary damp (photo by Vid Barac)

2. DIJAGNOSTIKA

U nastojanju da se prevladaju problemi koje stvara vlaga u građevinama, dijagnostika ima važnu ulogu. Brojni primjeri iz prakse pokazuju da je za neuspješnost saniranja vlage u zgradama, uz loše izvedene sanacije, odgovorna i netočno postavljena dijagnoza. Zbog toga je potrebno vizualne preglede upotpuniti raznim fizikalnim mjerenjima i kemijskim analizama. Samo tako mogu se utvrditi svi uzročnici vlaženja i naći optimalna rješenja za njihovu sanaciju.

Zbog nedovoljne pozornosti posvećene dijagnosticiranju često su specijalizirani izvođači sanacije vlage u zabludi kad tvrde da je za saniranje vlage važno samo presjeći kapilarno uzdizanje vlage iz tla. U pravilu se događa da i nakon valjano izvedene horizontalne hidroizolacije vlaga zaostaje u zidovima, jer postoje i drugi uzroci i oblici vlaženja. Uglavnom je zanemareno postojanje higroskopne vlage koju su uzrokovale akumulirane topljive, higroskopne soli. Isto tako horizontalnom hidroizolacijom nećemo ukloniti kondenznu vlagu, iako će se ona prethodnim zahvatom možda donekle smanjiti. Drugim riječima, sanacijskom zahvatu treba prethoditi istraživanje kojim se postavlja dijagnoza i utvrđuje program sanacijskih zahvata. **Saniranje vlage bit će uspješno samo uz dobro postavljenu dijagnozu, pravilan redoslijed zahvata i poštivanje tehnoloških propisa u svim fazama radova** (sl. 43).

Radi pravilnijeg postavljanja dijagnoze potrebno je načiniti anamnezu objekta, tj. **proučiti zatečeno stanje** kao i sve konzervatorsko-restauratorske, odnosno sanacijske zahvate izvedene u prošlosti. Potrebno je **istražiti dokumentaciju o prethodnim radovima**. Vjerojatno se ona može naći u konzervatorskim odjelima Uprave za zaštitu kulturne baštine, u Hrvatskom restauratorskom zavodu, u općinama, a vrlo stari zapisi u Državnom arhivu i župnim uredima u crkvenim vizitacijama. Iako je »kopanje«

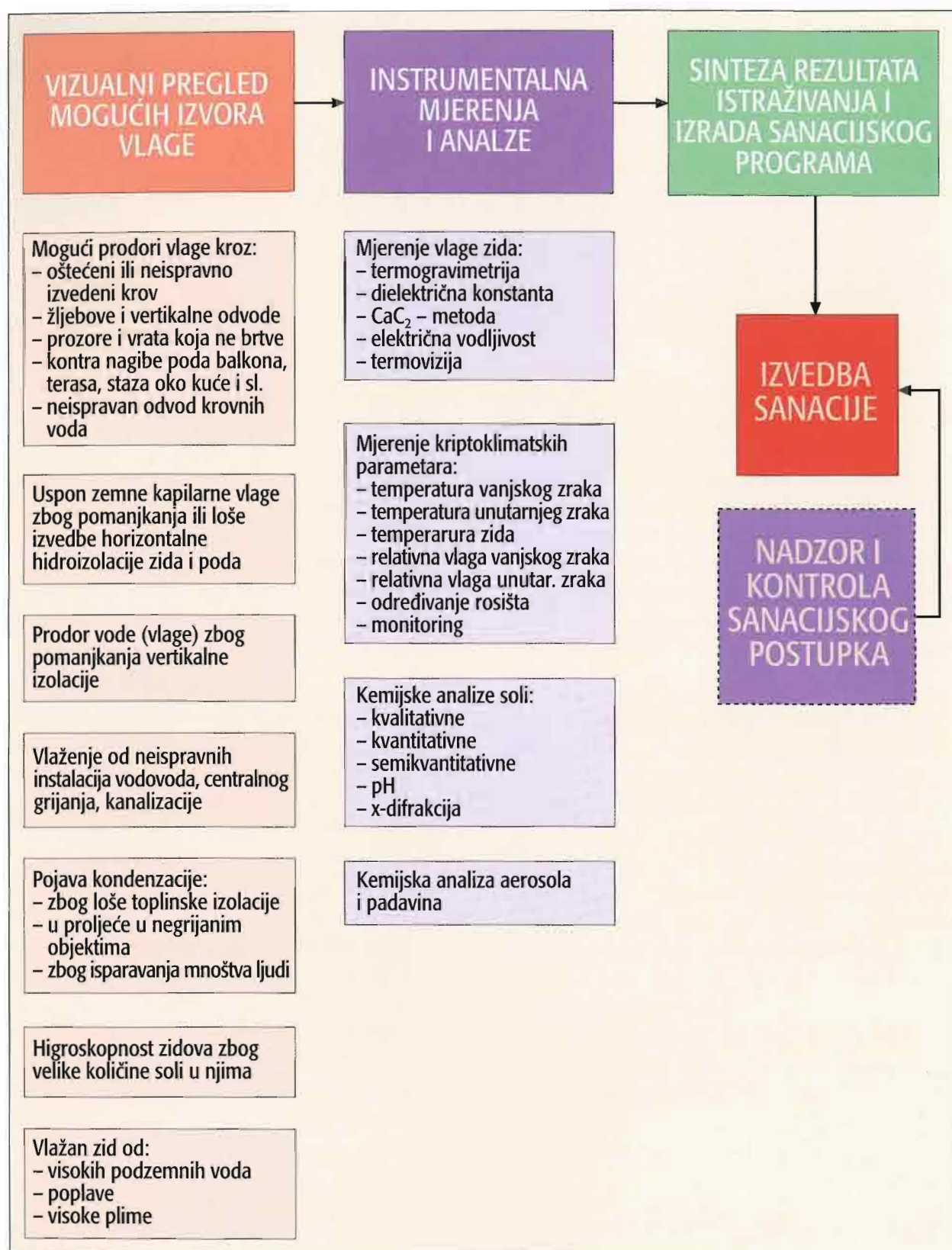
papirima zahtjevan posao, ipak je racionalniji od posrednog otkrivanja već poznatih i zapisanih čimbenica. Nakon upoznavanja s prethodno izvedenim konzervatorsko-restauratorskim radovima potrebno je **obaviti vizualni pregled objekta**, pri čemu treba zapaziti moguće izvore vlaženja. Zapažanja treba upisati u dnevnik, a pozicije raznih pojava vlage treba ucrtati u arhitektonski ili fotogrametrijski nacrt. Potom treba **obaviti fizikalna mjerenja i uzeti uzorke za kemijske analize**.

Prigodom uzimanja uzoraka za analize treba voditi računa o tome da je za pravilnu dijagnozu vrlo važan način uzorkovanja. Pozicije i broj uzoraka moraju reprezentirati stanje građevine. To isto vrijedi i za određivanje broja i mjesta mjernih točaka za fizikalna mjerenja. Premali broj uzoraka, odnosno mjernih točaka neće stvoriti realnu sliku stanja objekta. S druge strane, vrlo veliki broj uzoraka zahtijeva mnogo vremena i novca da se analize i mjerenja izvedu, a potom rezultati obrade. Dobra obrada podataka složenija je i od samoga mjerenja, što je opet dugotrajno i skupo. Na dijagnostičarima ostaje da odrede optimum između tih dvaju oprečnih zahtjeva. U svakom slučaju analize i mjerenja trebaju biti svrsishodni, a ne samo da posluže kao »šminka«

Iz podataka vizualnoga pregleda i iz rezultata mjerenja i analiza treba izvesti zaključke o izvorima vlaženja i o vrstama vlage te naći rješenja za njihovo sprječavanje, kao i otklanjanje posljedica njihova štetnog djelovanja.

2.1. VIZUALNI PREGLED MOGUĆIH IZVORA VLAGE

Istraživanje u svrhu postavljanja dijagnoze i izrade programa sanacijskog zahvata sastoji se od više koraka. Specijalizirani stručnjak ili više njih, najprije



43 Shematski prikaz postupaka dijagnosticiranja vlage

Diagrammatic presentation of procedures for diagnosing moisture.

razgledava cijeli objekt kako bi vizualnim pregledom uočio moguće izvore vlaženja zidova. Mjesta prodiranja vlage vide se na zidu u obliku manjih ili većih tamnih mrlja. Na mjestima isparivanja vlage zapaža se iscjetavanje soli koje se u blažem obliku očituje kao ljuškanje naliča ili slikanoga sloja, a u

kasnijim stadijima kao osipanje, mrvljenje kamena, žbuke i opeke, a u najgorem slučaju kao odlamanje većih dijelova građevnog materijala. Na takvim mjestima treba uzeti uzorke za preliminarne kemijske analize, koje će se kasnije obaviti u laboratoriju, ili čak na licu mjesta napraviti kvalitativne

testove za utvrđivanje glavnih grupa štetnih aniona. Iz dokumentacije treba utvrditi ima li zgrada horizontalnu hidroizolaciju zidova. Ako se to ne zna pouzdano, treba sondirati zid u području temelja da bi se to jednoznačno utvrdilo. Hidroizolacija možda i postoji, ali treba ustanoviti obavlja li ona još uvijek svoju funkciju ili je propala. I uz postojanje hidroizolacije vlaga se može uspeti u više dijelove preko neodgovarajuće žbuke. Kod poluukopanih objekata treba utvrditi postojanje vertikalne hidroizolacije i njezino stanje. Također je potrebno ustanoviti eventualno postojanje drenažnog sustava i njegovu funkcionalnost.

Provjerava se mogućnost prodora krovnih voda kroz neispravno položene ili polupane crjepove, kao i curenje vode iz žljebova i vertikalnih odvoda zbog njihova oštećenja ili ispunjenosti raznovrsnim taložinama. Vrlo je čest slučaj da se prigodom jakih pljuskova voda preljeva s kosih spojeva dvaju krovnih ploha različite orijentacije preko ruba žlijeba, jer nema zaštitnog lima koji bi to spriječio. Krovne vode mogu prodirati u zid i vlažiti ga, jer, naprosto, žlijeb ne postoji. Možda je zbog korozije dotrajao i vjetar ga je odnio ili ga nikada nije ni bilo. I kamenu žljebovi, koliko god bili trajni, zbog lošeg brtvila obično procure na reškama. Drveće koje raste uz zgradu može zadržavati vlagu i onemogućivati sušenje zidova. Lišće s tog drveća u jesen može ispuniti žljebove i uzrokovati prelijevanje vode preko njih. Poseban su problem ravni krovovi. Voda od kiše ili otapanja snijega može kroz njih prodrijeti u unutrašnjost zbog dotrajale, odnosno loše izvedene krovne hidroizolacije, ili pak zbog dotrajalih brtvila u dilatacijskim reškama.

Pri postavljanju dijagnoze nailazi se i na složene probleme i različite uzročnike sličnoga djelovanja, pa ih pažljivim motrenjima, mjerenjima i analizama treba razlučiti i na temelju toga donijeti preporuke za sanaciju.

Manjkavo obavljen vizualni pregled unatoč mjerenjima i proračunima može navesti na pogrešne zaključke i loše postavljenu dijagnozu. Godine 1982. pristupilo se restauriranju oštećenoga kamennog trijema palače Sponza u Dubrovniku. Prethodnim je pregledom bilo zaključeno da je oštećenja na kamenoj plastici u zoni peta lukova uzrokovao termički rad predimenzioniranih željeznih zatega. Odlučeno je da se zatege kod ušća u kamen otpile i naprave obujmice oko peta lukova i na njih učvrste nove, tanje zatege. Projekt za ovaj zahvat već su odobrila nadzorna tijela i trebalo ga je samo provesti u djelo. U zadnji je čas pomnijivijim vizualnim motrenjem ne-

dvojbeno utvrđen sasvim drukčiji uzrok stvaranja pukotina u kamenu. Dio zatega koji se nalazio unutar kamenih peta lukova korodirao je zbog prodora vode s terase pa se tlak uzrokovan ekspanzijom hrđe prenio na okolni kamen. Nastale su velike radijalne pukotine oko peta lukova koje su ozbiljno ugrozile stabilnost trijema. Nakon te spoznaje prišlo se posve drukčijem sanacijskom postupku kojim je riješen taj problem (Malinar i Penović, 1985).

Vrlo je sličan primjer dijagnosticiranja pukotina u kamenim zidovima atrija Kneževa dvora u Dubrovniku. Prigodom pregleda objekta statičari su tvrdili da je za sve kriva armiranobetonska ukruta cjelokupne građevine izvedena nakon potresa godine 1979. Mislilo se da zbog nje u određenim situacijama dolazi do naprezanja od kojih se stvaraju pukotine. Ne ulazeći u to koliko navedeni uzrok ima udio u nastajanju nekih pukotina, sasvim je sigurno da je velik broj oštećenja nastao prodorom kišnice kroz ravne površine krova. Prodori vode uočeni su na pukotinama loše izvedenih spojeva sa zidom koji nadvisuje ravni dio krova. To se vidi po tragovima koje je voda ostavila na zidovima niže etaže. Ta kišnica, kontaminirana morskim solima dospjelim za južnih vjetrova, cijedi se duž kamennog zida i vlaži ga. Tragovi iscjetavanja soli evidentni su na mjestima ispod prodora kiše. Budući da su upravo zbog statičkih razloga kamenu blokovi u prošlosti bili međusobno spajani željeznim klinovima i skobama, djelovanjem slane vode došlo je do korozije željeza, ekspanzije hrđe i stvaranja pukotina u kamenu. Ovo stvaranje pukotina sada ugrožava statičku stabilnost zgrade. Dakle, te pukotine nisu posljedica statičkih naprezanja, ali bi s vremenom mogle postati uzročnikom statičkih poremećaja.

Tamne plijesni na zidovima i stropovima također su indikatori vlaženja u određenim uvjetima. Takve pojave treba uočiti te ih dokumentirati fotografski ili videokamerom, ucrtati ih na tlocrtu i zabilježiti tekstualnim opisom.

Pri pregledu građevine treba registrirati pukotine loše zabrtvljenih prozorskih okvira kao i razbijena stakla na prozorima i vratima kuda mogu ulaziti oborine nošene vjetrom. Zazori između prozora i okvira, kao i zazori na vratima, također mogu pod jakim naletima vjetra propuštati kišu. Mogu također uzrokovati jaku cirkulaciju zraka, a posljedica toga može biti kondenzacija na zidu. Ispitivanje zazora izvodi se na licu mjesta s pomoću lista papira ili plastelina.

Loša vrsta žbuke, ali i otpala fasadna žbuka omogućit će penetraciju kišnice tjerane jakim vjetrom

prema unutrašnjosti zida. Neodgovarajući nagib prozorskih klupčica, vijenaca ili poda balkona, terase i sl., također često uzrokuje vlaženje zida. Nerijetko je vlaženje zida uzrokovano loše postavljenim okapnicama. Površina tla oko zgrade može biti nagnuta prema zidovima, umjesto da ima propisani nagib tako da odvodi površinsku vodu od njih. Za vlažnost zidova odgovorno je i curenje neispravnih instalacija vodovoda, kanalizacije ili centralnog grijanja. Iako su navedeni primjeri banalni, u praksi su neobično česti, pa ih treba uočiti, dokumentirati i pronaći odgovarajuća rješenja za uklanjanje izvora vlaženja i saniranje posljedica vlaženja.

Oblik vlage o kojemu se najviše raspravlja jest kapilarna vlaga koja prodire iz tla u zid koji nema izvedenu horizontalnu hidroizolaciju. Čak i kapele koje se nalaze na samom vrhu brda redovito imaju vlažne zidove. Ta pojava zbunjuje laike koji ne razumiju proces kapilarnoga tlaka.

Prigodom pregleda građevine treba uočiti mjesta eflorescencije, pokušati utvrditi uzrok toj pojavi i uzeti uzorke za kemijske analize i druga ispitivanja. Akumulirane soli u zidu i nakon odstranjivanja izvora vlaženja, zbog higroskopičnosti apsorbiraju vlagu kod povišene relativne vlage zraka i otpuštaju je kada je relativna vlaga niska. Zbog toga nastaje naizgled paradoksalna pojava da zidovi u određenim vremenskim uvjetima ostaju i dalje vlažni, iako je izvor vlaženja odstranjen. Pri pregledu objekta posebnu pozornost treba obratiti upravo na higroskopnu vlagu.

Sva zapažanja trebaju biti opisana i fotografski dokumentirana jer se mnoge pojave teško mogu rekonstruirati prema kasnijem sjećanju. Pri tom je poželjniji rad s digitalnom kamerom kojom se može odmah provjeriti kvalitetu zapisa i fotografiranje ponoviti u koliko njome nismo zadovoljni. Ponegdje će biti prikladno da se izrade skice i crteži na kojima se neke uočene pojave mogu bolje naglasiti nego što je to moguće registrirati fotografijom. Snimanje videokamerom ima svoje prednosti jer se »švenkanjem«, tj. pomicanjem kamere u kadru može zahvatiti široki total što se u mnogim slučajevima ne može postići fotoaparatom. Također je korisno što se videokamerom uz video zapis može istovremeno učiniti i tonski zapis.

Nakon pomnoga pregleda građevine i razmatranja dokumentiranih podataka izrađuje se *program konzervatorsko-restauratorskoga istraživanja* koji treba sadržati i troškovnik istražnih radova. Za izradu programa, osim bilježaka i dokumentacije, poželjno je da se naprave i neke preliminarne kemijske analize. Nakon obavljenoga istraživanja i po-

stavljanja sigurne dijagnoze izrađuje se sanacijski elaborat koji mora imati smjernice za izvedbu sanacijskoga postupka i troškovnih radova. U slučaju manjih građevina s manje kompleksnom problematikom ponekad će ovako prikupljeni podaci biti dostatni i za izradu *sanacijskoga elaborata*.

2.2. INSTRUMENTALNA MJERENJA I ANALIZE

Instrumentalna mjerenja i analize izvode se prema potrebama i mogućnostima. Broj mjernih točaka za neko mjerenje kao i broj uzoraka za analize određuju se prema veličini objekta, te raznovrsnosti materijala i simptoma. Broj odabranih točaka trebao bi biti takav da nakon obrade rezultata prikaže reprezentativnu sliku problema kojeg istražujemo. Mali broj mjernih točaka ili uzoraka za analize može biti dostatan samo na malim objektima. Na velikim građevinama nužno je obaviti opsežna mjerenja i analize. S druge strane, veliku količinu brojčanih podataka teško je shvatiti bez statističke analize, pa je ona nezaobilazan postupak za dobivanje realne predodžbe o stanju građevine. Većina pojava koje mjerimo i analiziramo mijenja se i s promjenama meteoroloških parametara. Stoga je poželjno periodično praćenje kroz sva četiri godišnja doba. Kako takva istraživanja uglavnom zahtijevaju ne baš mala materijalna sredstva, to će broj mjernih točaka i uzoraka za analize često biti kompromis između potreba s jedne, te vremenskih i materijalnih ograničenja s druge strane.

2.2.1. ODREĐIVANJE POROZNOSTI TVARI OD KOJE JE GRAĐEN ZID

Poroznost je svojstvo tvari kojom se definira sadržaj poroga prostora. Razlikujemo *apsolutnu poroznost* (ili, jednostavno, *poroznost*), koja nije u potpunosti dostupna prodoru vode, i *relativnu poroznost* koju voda može u potpunosti ispuniti pod normalnim tlakom (Tomašić i Ženko, 1995). Kvantitativno se poroznost izražava u postocima kao odnos volumena svih šupljina u tvari i volumena tvari:

$$P = \frac{V - V_0}{V} \times 100 (\%)$$

P = apsolutna poroznost

V = volumen s porama

V₀ = volumen bez pora.

U praksi je mnogo važniji podatak o relativnoj poroznosti koji se izražava kao:

$$P_r = \frac{M_v - M_s}{V} \times 100 (\%)$$

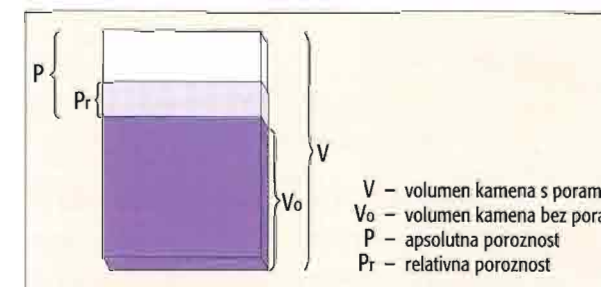
P_r = relativna poroznost (dostupna za vodu)

M_v = masa vodom zasićenog uzorka

M_s = masa suhog uzorka

V = volumen uzorka.

Odnos između apsolutne i relativne poroznosti grafički je prikazan na sl. 44.



44 Odnos relativne i apsolutne poroznosti zida (iz: Tomašić i Ženko, 1995)

Relation of relative and absolute porosity of a wall (from Tomašić and Ženko, 1995).

2.2.2. ODREĐIVANJE SADRŽAJA VLAGE U ZIDU

Već i samim vizualnim motrenjem mogu se uočiti vlažne mrlje na zidu i posljedice djelovanja vlage. Katkad ljudi stave dlan na zid i procjenjuju je li zid suh ili vlažan. To je subjektivna procjena donesena na temelju organoleptičkog motrenja. Hladno nam može djelovati kao vlažno iako to nije. Stoga je potrebno provesti mjerenja instrumentalnim metodama koje nam kažu koliko je zid vlažan, a ne samo podatak: suho – vlažno. Mjerenje sadržaja vlage najtočnije se izvodi *termogravimetrijskim metodama*. Klasična je metoda izračunavanje vlage iz razlike u masama vlažnog i suhog uzorka. Uzorak materijala mase oko 5 g važe se na preciznoj vagi, suši u sušnici s termoregulatorom na 105°C, zatim se hladi u eksikatoru i opet važe. Postupak se radi sigurnosti ponavlja dok se ne postigne konstantna masa suhog uzorka. U sadržaj vlage, osim mase tekuće vode, uračunava se i masa leda i kristalne vode (Stambolov i van Asperen de Boer, 1976). Sadržaj vlage (ψ) izračunava se prema formuli:

$$\psi = \frac{m_v - m_s}{m_s} \times 100 (\% \text{ mas.}), \text{ gdje su:}$$

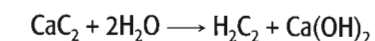
ψ = sadržaj vlage (% mas.)

m_v = masa vlažnog uzorka (g)

m_s = masa suhog uzorka (g).

Postoje različiti tipovi vaga s infragrijalicom za poluautomatsko ili automatsko mjerenje i očitavanje postotaka vlage koje olakšava i ubrzava rad, a zadovoljavajuće su precizne (sl. 45 a i 45b).

Za određivanje vlage često se primjenjuje i indirektna *metoda s kalcijevim karbidom*. Točno odvagani uzorak stavi se u posudu s viškom kalcijeva karbida i hermetički zatvori. Vлага/voda iz uzorka reagira s karbidom. Pri tome se razvija plin acetilen prema reakciji:



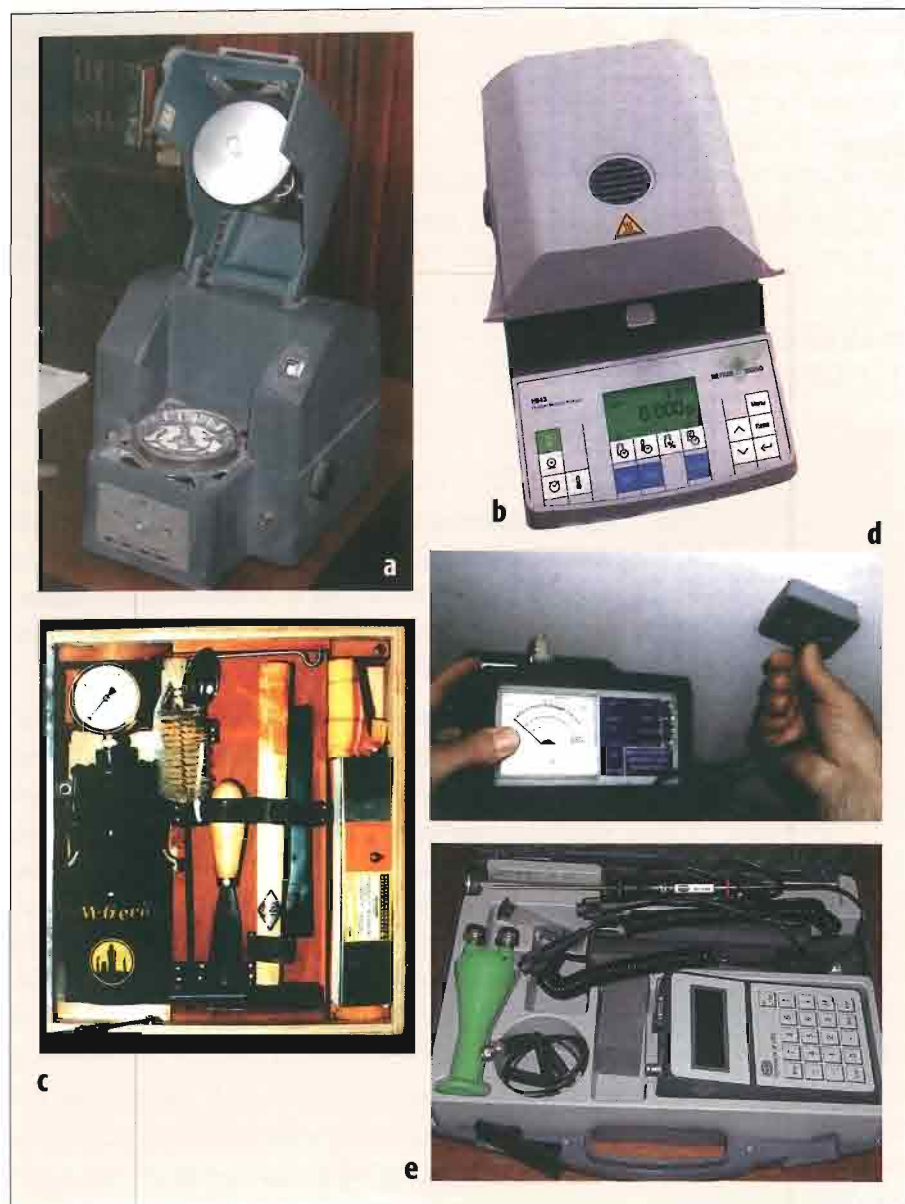
Veća količina vlage razvit će više plina, a taj će u zatvorenom prostoru razviti veći tlak. Nakon završetka reakcije na manometru se očita tlak u barima kojeg je stvorio acetilen. Na temelju odvage i izmjerenoga tlaka odredi se prema tablici postotak vlage sadržane u uzorku (sl. 45 c).

Također postoje i električne metode mjerenja vlage. Neki se instrumenti baziraju na *električnom otporu* zida. Instrument ima fiksne elektrode na standardnom razmaku koje se pri mjerenju naslone na zid. Suh zid ima veći, a vlažan zid manji električni otpor. Rezultatima će donekle smetati sadržaj topljivih soli, jer soli kao elektrolit povećavaju električnu vodljivost, odnosno smanjuju otpor, pa dobivene vrijednosti nisu međusobno usporedive u uzorcima s različitim sadržajem soli.

Drugi tip instrumenta bazira se na *električnom kapacitetu zida*. Budući da voda ima mnogo veću dielektričnu konstantu od zraka, vlažan će zid na galvanometru instrumenta pokazivati veći otklon nego suhi a da pri tome sadržaj soli neće utjecati na rezultat (sl. 45 d, 45 e).

Prednost termogravimetrijskih metoda prije svega je u maksimalnoj pouzdanosti rezultata. Ako uzimamo uzorke s pomoću krunskoga svrdla kako bismo izvukli jezgru uzorka iz željene dubine bušenja, mjerenjima dobivamo pregled vlage ne samo na površini zida nego u željenim dubinskim razmacima. Ovakav je način koristan za bolje razumijevanje raspodjele vlage u dubini zida, čime ćemo s većom sigurnošću postaviti dijagnozu o podrijetlu vlage.

Slaba strana ove metode mjerenja jest činjenica da svaka mjerna točka zahtijeva dosta radnoga vremena i specijalni alat za vađenje uzorka. Stoga je takav postupak skup. Ograničavajući je čimbenik i u tome što je ta metoda destruktivna pa se često ne može uzeti dovoljno uzoraka potrebnih za dijagnozu. To posebno vrijedi za oslikani zid (freske) ili za neožbukani zid od fino obrađenoga kamena.



45 Raznovrsni instrumenti za mjerenje sadržaja vlage u zidu (Ψ): a) torziona vaga s infragrijalicom, b) digitalna vaga s infragrijalicom, c) pribor za metodu s kalcijevim karbidom, d) električni instrument na bazi dielektrične konstante, e) digitalni instrument na bazi dielektrične konstante.

Diverse instruments for measuring the content of moisture in a wall (Ψ): a) torsion scale with infra-heater; b) digital scale with infra-heater; c) kit for the calcium carbide method; d) electric instrument using the dielectric constant; e) digital instrument using the dielectric constant.

Električne su metode nedestruktivne jer se mjerenje obavlja laganim pritiskom mjerne sonde na zid. Zbog te značajke, kao i zbog brzog očitavanja rezultata, vlaga se može izmjeriti na neograničenom broju točaka. To posebno vrijedi za instrumente koji funkcioniraju na bazi određivanja dielektrične konstante koji su izravno baždareni u postocima vlage. Nedostatak je u činjenici da su postoci vlage izraženi kao volumni, a ne maseni postoci, pa se ovako dobiveni rezultati teško mogu usporediti s podacima dobivenima termogravimetrijom. Ovu metodu treba primijeniti pri određivanju vlage na oslikanim površinama zida ili na zidu od fino obrađenog kamena gdje se ne može uzeti dovoljan broj uzorka za termogravimetrijsko određivanje sadržaja vlage. Prije početka mjerenja treba pripremiti nacrt zidova (arhitektonske poglede dobivene klasičnim mjerenjima ili fotogrametrijom) i na njima označiti

raster mjernih točaka. Mjerne točke treba bilježiti u tablice s označenim mjernim stupcima i visinskim razmacima točaka od razine poda. Pritom će gušći raster točaka dati objektivniji prikaz raspodjele vlage. Takvim se mjerenjem dobiva slika raspodjele vlage na površini i neposredno pod površinom, ali ne i u dubini zida.

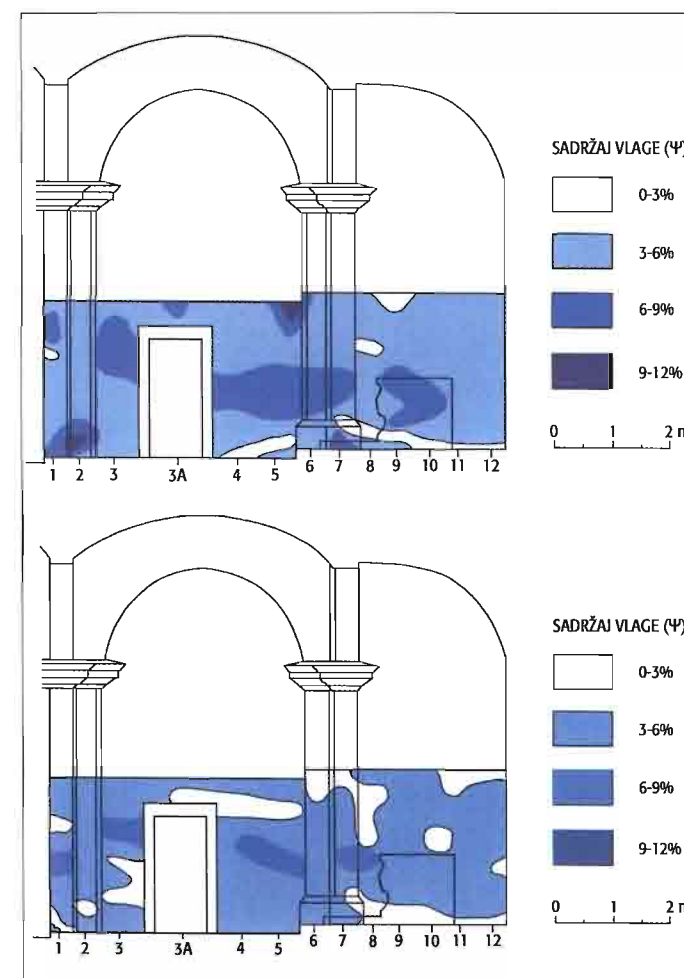
Brojčani podaci grupiraju se u određenim rasponima vlage (0-3%, 3-6%, 6-9% itd.). Na arhitektonskom nacrtu zida odijele se s pomoću izolinijske grupe s različitim stupnjevima vlažnosti (sl. 46 a, 46 b). Polja između izolinijske označuju se tako da se suho polje ne oboji, tj. ostaje bijelo, a vlažna polja imaju razne nijanse plavoga od svijetle do tamnoplave boje. Time se tablica s mnoštvom nepreglednih brojeva pretvara u jednostavnu čitljivu sliku gdje se odmah zamjećuju suhe zone i područja s povećanom vlagom. Ovakvi plošni prikazi raspodjele vlage učinjeni u

razna godišnja doba ukazuju i na dinamiku vlaženja i sušenja zida. Veliki, reprezentativni broj obrađenih mjernih točaka na taj način nadoknađuje eventualnu manju pouzdanost mjerenja u usporedbi s termogravimetrijskim mjerenjem (Malinar, 1980/81; 1986).

Uz navedenu metodu, prema potrebi primijenjuje se prikaz raspodjele vlage u vertikalnom mjernom stupcu s pomoću dijagrama (sl. 47), a rabe se i statistički prikazi i analize za dobivanje predodžbe o općem stanju vlažnosti zida.

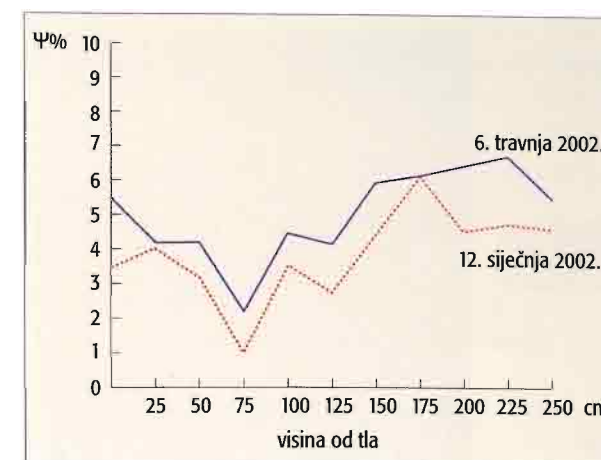
2.2.3. ODREĐIVANJE MAKSIMALNE MOGUĆE VLAGE U ZIDU

Građevni materijali imaju različitu sposobnost upijanja vlage što ovisi o količini poroga prostora i njegove međusobne povezanosti. Stoga neki materijali mogu upijati više a neki manje vode. Maksimalna moguća vlaga određuje se tako da se uzorak potopi u deioniziranoj vodi pod normalnim atmo-



46 Primjer plošnoga prikaza sadržaja vlage u zidu: a) u ljetu, b) u zimi

Example of flat presentation of water content in the wall: a) in summer, b) in winter.



47 Primjer dijagramskoga prikaza sadržaja vlage u vertikalnome mjernom stupcu (jedan zimski i jedan proljetni dan) Example of a diagrammatic presentation of moisture content in a vertical measuring column (one winter and one spring day).

sferskim tlakom kroz 48 sati, uz napomenu da vrh uzorka bude prekriven s najmanje 2 cm vode. Uzorak treba biti usitnjen do veličine zrna od 4 do 16 mm. Nakon natapanja uzorak se izvadi iz vode, ocijedi i odvaži. Potom se suši u sušnici do konstantne mase, ohladi u eksikatoru i ponovo važe. Maksimalna moguća vlaga (Ψ_{\max}) izračunava se prema formuli:

$$\Psi_{\max} = \frac{m_p - m_s}{m_s} \times 100 (\%), \text{ gdje su:}$$

m_p = masa potopljenog uzorka (g)
 m_s = masa suhog uzorka (g).

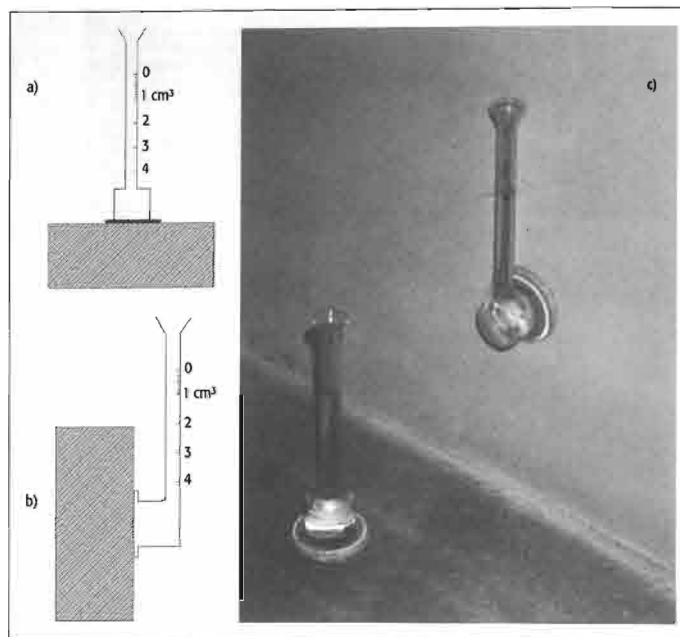
2.2.4. ODREĐIVANJE HIGROSKOPNOG (RAVNOTEŽNOG) SADRŽAJA VLAGE U ZIDU

Higroskopi ili ravnotežni sadržaj vlage govori nam o stupnju higroskopnosti porozne tvari. Označuje se kao Ψ_H (%). To je sadržaj vlage u uzorku koji nastane nakon dovoljno dugog stajanja u klimatizacijskoj komori ili eksikatoru u uvjetima relativne vlage zraka od 85% i temperature od 20°C. Navedena relativna vlaga postiže se ako se u komori drži zasićena otopina KHSO_4 . Uzorak se drži u komori do postizanja konstantne odvage.

Higroskopi sadržaj vlage (Ψ_H) računa se prema formuli:

$$\Psi_H = \frac{m_k - m_s}{m_s} \times 100 (\%), \text{ gdje su:}$$

m_s = masa suhog uzorka (g)
 m_k = masa uzorka nakon klimatizacije (g).



48 Karstenovi cilindri za mjerenje vodoupojnosti: a) na horizontalnoj plohi, b) na vertikalnoj plohi, c) oba tipa u primjeni
Karsten cylinders for measuring water absorption: a) on horizontal surface, b) on a vertical surface, c) both types in application.

Ovo se ispitivanje provodi na uzorcima žbuke, opeke i kamena. Svaka od tih poroznih tvari ima svoju karakterističnu higroskopnost, odnosno higroskopni ili ravnotežni sadržaj vlage. Ako su ovi materijali kontaminirani topljivim solima, njihov će ravnotežni sadržaj vlage biti viši. Takvo jednostavno ispitivanje daje nam brzi odgovor o stupnju higroskopnosti pojedinog uzorka.

2.2.5. ODREĐIVANJE STUPNJA PROVLAŽENOSTI ZIDA

Stupanj provlaženosti iskazuje se kao postotak poroga prostora koji je ispunjen vodom, tj. kao odnos između trenutne vlage i maksimalne moguće vlage. Označuje se kao $D(\%)$, a izračunava prema formuli:

$$D = \frac{\Psi}{\Psi_{\max}} \times 100 (\%)$$

2.2.6. ODREĐIVANJE PREOSTALE SPOSOBNOSTI UPIJANJA VODE U ZIDU

Preostala sposobnost upijanja vode pokazuje koliko još vode može upiti materijal do njegova zasićenja, a računa se prema formuli:

$$R = \Psi_{\max} - \Psi (\%)$$

2.2.7. MJERENJE VODOUPOJNOSTI ZIDA KARSTENOVIM CILINDRIMA

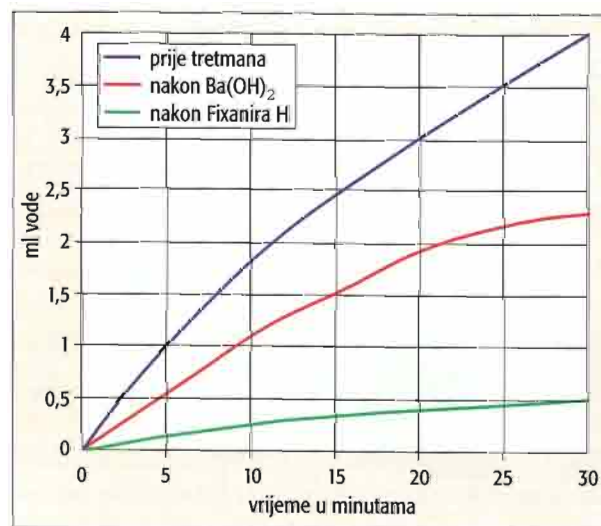
Graduirani Karstenov cilindar pričvrsti se silikonskim kitom na zid i u njega se natoči deionizirana voda do početne oznake (sl. 48). Štopericom se mjeri vrijeme upijanja vode i bilježi potrošnja u mililitrima. Dobiiveni se rezultat izražava kao brzina upijanja vode, odnosno koliko je mililitara vode upijeno u minuti (ml/min). Može se prikazati i dijagramski tako da su na ordinati označeni mililitri, a na apscisi vrijeme (sl. 49). Za materijale koji slabo upijaju vodu na apscisi se nanose vrijednosti drugog korijena vremena.

2.2.8. MJERENJE RAZINE VODE

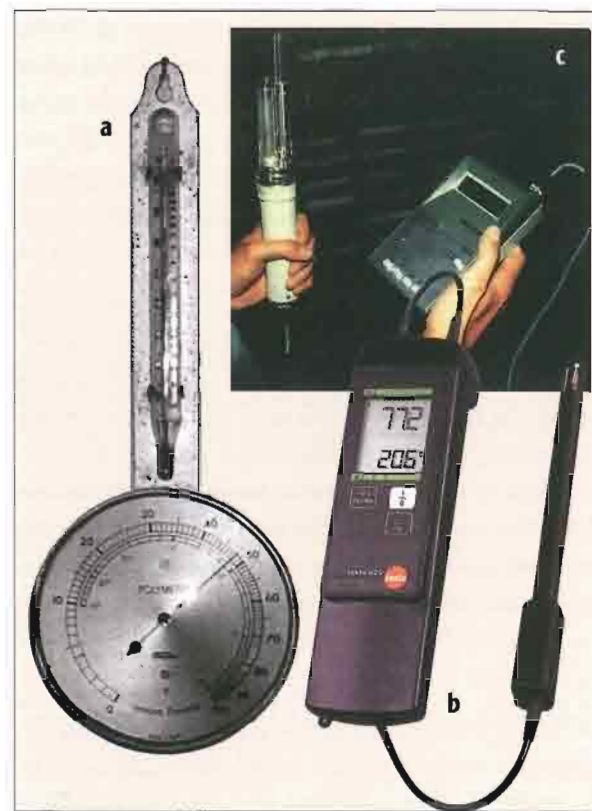
Kad su građevine smještene u blizini vodenog toka, mora ili u vlažnoj ravnici, dobro je znati na kojoj se dubini nalazi podzemna voda, kolike su amplitude vodnog lica i kako se one mijenjaju s učestalošću oborina. Takve će spoznaje biti potrebne za pravilno projektiranje drenaža i ostalih zahvata na sanaciji vlage. Promjene razine vodnog lica mogu se mjeriti u bušotinama pomoću piezometara. Registriranje promjena razine površinske vode izvodi se limnografima. Oni mogu biti baždareni na relativnu visinu ili po volji na apsolutnu visinu, koja se u tom slučaju mora geodetski odrediti.

2.2.9. TRASIRANJE VODE

Velike količine vode mogu dospjeti u zidove prodrom kiše ili vode od otapanja snijega kroz pukotine u loše izvedenom krovu ili oštećenoj izolaciji. Ovo



49 Dijagram vodoupojnosti oštećenoga sitnozrnastog pješčenjaka izrađen na temelju mjerenja Karstenovim cilindrom
Diagram of water absorption of a damaged fine-grain sandstone done according to measurements with a Karsten cylinder.



50 Instrumenti za mjerenje relativne vlage zraka (f): a) klasični termohigrometar, b) digitalni termohigrometar, c) digitalni psihrometar

Instruments for measuring the relative humidity of air: a) classical thermo-hygrometer b) digital thermo-hygrometer, c) digital psychrometer.

se poglavito odnosi na ravne krovove, ali procurijevanja se događaju i na kosim krovovima ako je pokrov oštećen ili već djelomice nedostaje. Tu je onda riječ u uobičajenim popravcima pa to nije potrebno objašnjavati.

Kada je ravni krov izveden s višestrukim izolacijskim i konstruktivnim slojevima a ipak se dogodi prokišnjavanje, vrlo je teško otkriti mjesto prodora. Tu je važno napraviti pomniji vizualni pregled krova i na sumnjivom mjestu (pukotina ili rupica) treba injekcijom uštrcati malu količinu vodene otopine uranina (natrijeva fluoresceina). Uranin je crvenkasto-smeđi prah koji otopljen u vodi daje intenzivnu zelenu fluorescirajuću boju. Može se golim okom zapaziti u vrlo visokim razrjeđenjima, a kolorimetrijskim postupkom može se njegova koncentracija kvantificirati. Zadovoljava sve ekološke zahtjeve pa se rabi i za trasiranje izvora pitke vode. Nakon uštrcavanja uranina slijedi prskanje krova vodom pod tlakom i praćenje prodora u unutrašnjost. Ako se unutra pojavi vlažna mrlja s intenzivnim fluorescirajućim obojenjem, stvar je jasna. No, ako se pojavi mrlja bez obojenja, znači da je voda prodrila kroz neku drugu pukotinu. Postupak se ponavlja do za-

dovoljavajućeg rezultata. Jedna od teškoća koja se pojavljuje u ovom ispitivanju je ta što se u unutrašnjosti teško može postići negativan barometarski tlak. On se inače stvara kod kiše nošene jakim vjetrovom pa ovdje izostaje efekt usisa koji je možda presudan za procurijevanje.

2.2.10. MJERENJE TEMPERATURE I RELATIVNE VLAGE ZRAKA, TEMPERATURE ZIDA I ODREĐIVANJE ROSIŠTA

Temperatura zraka može se mjeriti boljim živinim termometrom ili u novije vrijeme digitalnim termometrom. Relativna se vlaga mjeri higrometrom. Klasični je higrometar izrađen od snopa odmašćenih ljudskih vlasi koje su s jedne strane pričvršćene na armaturu instrumenta, a s druge na elastično pero (sl. 50a). Vlasi imaju svojstvo da se rastežu kod veće relativne vlage, a stežu kod manje. Preko prijenosnog mehanizma ovi su pokreti vezani za kazaljku koja na baždarenoj skali pokazuje visinu relativne vlage zraka u postocima. Higrometri se povremeno trebaju baždariti pomoću psihrometra. Danas se mnogo češće rabe digitalni termohigrometri koji su precizniji i na kojima se mogu brže očitavati traženi podaci. Kao senzor služi im neka vrlo higroskopna tvar (npr. LiCl), koja je kao elektrolit uključena u strujni krug s izvorom struje i galvanometrom baždarenim u postocima vlage (sl. 50b).

Vlaga zraka može se vrlo točno odrediti s pomoću psihrometra. Postoje razne izvedbe sa suhim i mokrim termometrom, kod kojih je potrebno izmjeriti temperature na oba termometra i potom očitati vlagu na Mollierovu ix - dijagramu ili na psihometrijskim tablicama. Danas postoje digitalni aspiracijski psihometri kojima se lakše rukuje (sl. 50c).

Različiti materijali različito reagiraju na relativnu vlagu zraka. I temperatura ima određenu ulogu za stabilnost materijala ali relativna vlaga ipak ima presudnu ulogu. Iskustvom su prikupljeni podaci o optimalnim rasponima relativne vlage zraka za pojedine materijale (v. poglavlje 3.2.8.).

Za mjerenje temperature zida uporabljaju se kontaktni električni termometri. Temperaturne sonde različitih su izvedbi pa se tako može mjeriti temperatura površine zida, temperatura bušotine ili temperatura pukotine (sl. 51a). Postoje i digitalni infracrveni termometri za daljinsko mjerenje temperature zida (sl. 51b). Oni su napose pogodni za mjerenja na teže dostupnim mjestima.



51 Termometri za mjerenje temperature zida: a) mjerenje temperature freske kontaktnim termometrom, b) digitalni infracrveni termometar za daljinsko mjerenje, c) suvremena, prijenosna termovizijska kamera za daljinsko mjerenje temperature zida i dobivanje termovizijske slike

Thermometers for measuring the temperature of a wall: a) measuring temperature of a fresco with contact thermometer; b) digital infrared thermometer for remote measuring; c) contemporary portable ThermoVision camera for remote measuring of wall temperature and obtaining a ThermoVision image.

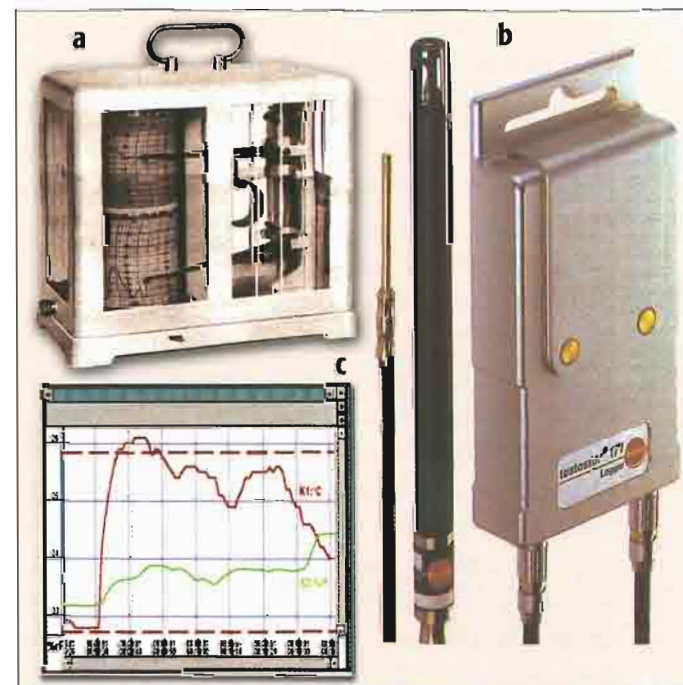
Za registriranje promjene temperature i relativne vlage zraka u nekom razdoblju rabe se *termohigrografi*. Postoje termohigrografi s mehaničkim ili električnim pogonom za pokretanje valjka s blanketom na kojoj se ucrtavaju krivulje vlage i temperature (sl. 52 a).

Za registriranje temperature i relativne vlage zraka kroz dulje razdoblje u najnovije se vrijeme rabe *data loggeri* (sl. 52 b, 52 c). To su mali elektronički instrumenti koji se na mjestu pogodnom za mjerenje mogu ostaviti kroz dulje vrijeme. Za pogon je

potrebna baterija, a rezultati se memoriraju. Kada se žele dobiti podaci za određeno razdoblje, oni se snime na disketu, te se pomoću odgovarajućeg računalnog programa i računala ispišu numerički ili grafički podaci. Naravno da se podaci pomoću prijenosnog računala i odgovarajućeg programa mogu očitati i na licu mjesta.

Najsuvremeniji je način prikupljanja mjernih podataka sustav *monitoringa*. Veći broj senzora raspoređenih na karakterističnim mjestima na objektu i/ili u njegovoj okolici kablovima se povezuje sa središnjom postajom. Postaja memorira podatke koje šalju senzori i preko modemske-telefonske (ili mobilne) veze može ih slati u udaljeni centar. U centru ih prima računalo na kojemu se podaci mogu dalje pratiti, proučavati i obrađivati. Tako se daljinskim putem mogu dobivati brojni podaci bez utjecaja tzv. ljudskog faktora.

Kao komplementarna metoda za upotpunjenje dijagnostike može poslužiti i *infracrveno termografsko snimanje*. Infracrvenom se kamerom snimi zid koji želimo istražiti. Na dobivenoj se slici na monitoru posebnim uređajem razdvajaju temperaturne zone izolinijama koje su obojene karakterističnim nijansama boje. Najuže područje temperaturnog razlučivanja je $0,2^{\circ}\text{C}$ što omogućuje da se dobro vidi raspodjela temperature na zidu (sl. 53). Mogu se vi-



52 Aparati za registriranje relativne vlage i temperature zraka kroz dulje razdoblje: a) mehanički termohigrograf, b) data logger, c) graf dobiven s pomoću data loggera
Apparatus for registering relative humidity and air temperature for a longish period of time: a) mechanical thermohygrograph; b) data logger; c) graph obtained with a data logger.

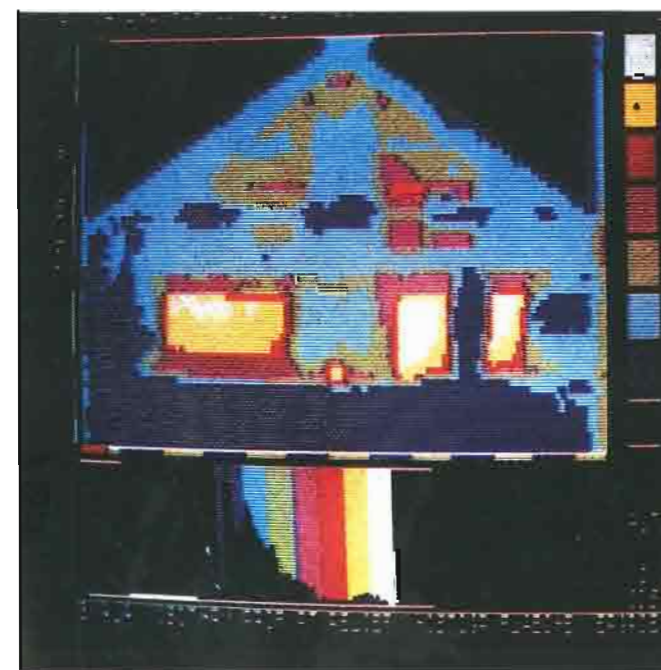
djeti toplije zone i »hladni mostovi« kojima se toplina gubi iz prostora. Takvi hladni mostovi mogu nastati zbog tanjeg zida na tom mjestu, zbog bolje toplinske vodljivosti (slabije izoliranosti) ili zbog povišenog sadržaja vlage. Ova nedestruktivna, nerazorna metoda pogodna je za postavljanje dijagnoze na oslikanim zidovima ili na teško dostupnim mjestima, ali je skupa u usporedbi s drugim vrstama istraživanja. U najnovije vrijeme na tržištu se mogu naći i lagane, *prijenosne infracrvene termografske kamere* kojima se daljinski može mjeriti temperatura zida, ali i dobiti termografska slika (sl. 51 c).

Za određivanje rosišta na nekom zidu potrebno je izmjeriti temperaturu i relativnu vlagu zraka izvan zgrade i temperaturu zida. Primjeri određivanja momenta rošenja kao i učestalosti rošenja prikazani su na sl. 54 i 55.

2.2.11. MJERENJE I TRASIRANJE ZRAČNIH STRUJANJA

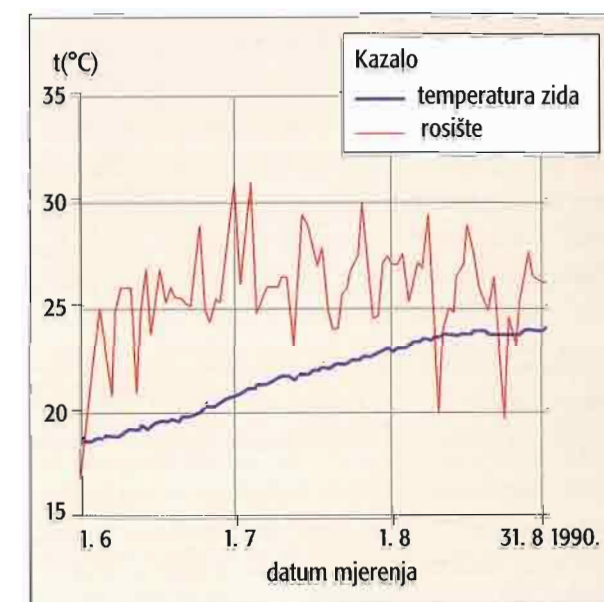
U dijagnostici vlage u zgradama važno je poznavanje zračnih strujanja i njihovih zakonitosti. To je napose potrebno prigodom proučavanja kondenzacije. Smjer zračnih strujanja trasira se posebnim napravama za stvaranje laganog dima.

U nedostatku komercijalno proizvedenih naprava možemo se poslužiti posudicom u koju nakapamo malo koncentrirane amonijačne vode i koncentrirane kloridne (solne) kiseline. Pri tome se stvara



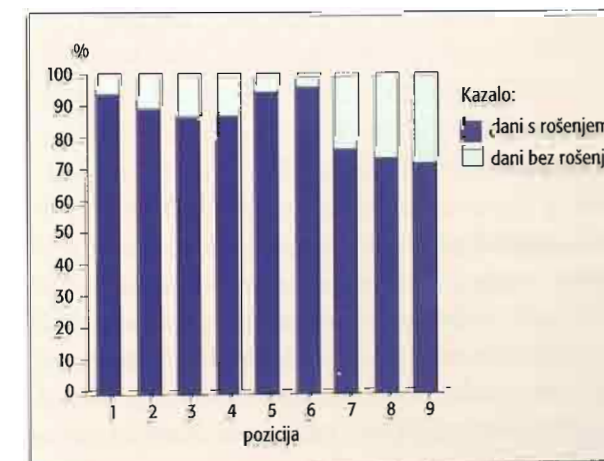
53 Termovizijska snimka napravljena stabilnom termovizijskom kamerom
ThermoVision image made with a stable ThermoVision camera.

»dim« od amonijeva klorida koji pokazuje smjer strujanja. Pri trasiranju zračnih strujanja ljudi u prostoriji ne bi se trebali gibati kako ne bi stvarali turbulencije i ometali prirodna strujanja. Brzinu strujanja možemo mjeriti preciznim *anemometrom*. Klasični anemometri imaju fino izrađenu malu turbinu ili tzv. Robinsonov križ s četiri šuplje polukugle, kojima se pokreće dinamo. Brža rotacija proizvest će jaču struju, pa će se to na galvanometru izravno očitati kao veća brzina zračnoga strujanja. Električni anemometri rade na principu žarne niti. Veća brzina zračnoga strujanja više će hladiti žarnu nit. To će mijenjati električni otpor niti, pa će se na galvanometru manifestirati kao promjena brzine strujanja.



54 Rošenje nastaje kada je temperatura zida jednaka ili niža od rosišta (podzemlje dubrovačke katedrale)

Dewing occurs when the temperature of the wall is equal to or lower than the dew point (underground of Dubrovnik Cathedral).



55 Prikaz učestalosti rošenja (u postocima vremena) na 9 mjernih pozicija u podzemlju dubrovačke katedrale

Depiction of the frequency of dewing (in time percentages) at 9 measuring sites in the underground of Dubrovnik Cathedral.

Brzina zračnoga strujanja izražava se na više načina, među ostalima, u prevaljenim metrima u sekundi (m/s). Za mjerenja u zatvorenom prostoru anemometar mora biti precizan tako da se mogu mjeriti i brzine manje od jednog metra u sekundi (sl. 56).

2.2.12. KEMIJSKE ANALIZE ŠTETNIH SOLI U ZIDU, ZRAKU I KIŠNICI

Za dijagnostiku vlažnog zida iznimno je važno određivanje štetnih topljivih soli. To se postiže kvalitativnim testovima i kvantitativnim kemijskim analizama. Pri tome se uglavnom određuju anioni: sulfati, kloridi, nitrati i karbonati. Određivanje kationa (kalij, natrij, kalcij, magnezij) izvodi se kada se sumnja na određenu sol koju možemo indicirati samo ako odredimo i anione i katione.

Sulfati najvećim dijelom potječu iz onečišćene atmosfere zbog izgaranja fosilnih goriva sa sumporom. Mogu također nastati oksidacijskim djelovanjem sulfobakterija (*Thiobacillus*) na sumporne sastojke u kamenu, i to na sam sumpor, na sulfide i sulfite, ali i na sumporni dioksid iz zraka. U obalnom pojasu dio sulfata može potjecati iz mora.

Kloridi su najčešći u obalnom pojasu, kamo ih donose snažni vjetrovi iz smjera mora, ali u zid mogu dospjeti i kapilarnom elevacijom iz tla, kao i nitrati.

Topljivi karbonati (natrijev i kalijev karbonat) uglavnom su dospjeli u zidove posljednjih stotinjak godina, kada se za različite sanacijske radove rabio portlandcement. Dio karbonata može dospjeti u zid iz tla.

Uz kvantitativne analize mjeri se i pH-vrijednost, te električna vodljivost vodenog ekstrakta ispitivanog građevnog materijala pripremljenog za analize. Povišena pH-vrijednost upućuje na sadržaj alkalijskih karbonata, a općenito veća električna vodljivost govori o povišenom sadržaju topljivih soli koje u vodi djeluju kao elektrolit. Ta pH-vrijednost jednostavno se određuje s pomoću pH indikatorskih traka. Papirnata traka indikatora namoči se u vodeni ekstrakt i promatra se promjena boje. Dobivena se boja uspoređi s numeriranom skalom boja na predlošku i očita pH-vrijednost za tu boju. Točnost je očitavanja 0,5. Za precizna određivanja rabe se pH-metri (*pehametri*). To su elektronički instrumenti od kojih su neki vezani za mrežni napon, a danas se sve češće upotrebljavaju prijenosni digitalni pehametri na baterije.

Električna vodljivost otopine određuje se *konduktometrom*. I ove su sprave danas u prijenosnoj, digitalnoj izvedbi.



56 Mjerenje brzine strujanja zraka s pomoću anemometra sa žarnom niti (dubrovačka katedrala)

Measurement of the speed of the currents of air with the aid of an anemometer with a filament (Dubrovnik Cathedral).

Jedinica električne vodljivosti otopine jest *mikrosimens* (μS). Budući da vodena otopina može imati vrlo velike raspone brojčanih vrijednosti električne vodljivosti, one su za više vrijednosti označene u eksponencijalnom obliku. Tako npr., ako očitana vrijednost električne vodljivosti iznosi $5700\mu\text{S}$, onda se ona označuje kao $5,7 \times 10^3\mu\text{S}$.

Klasične metode kvalitativnih i kvantitativnih analiza izvode se tako da se uzorci materijala (kamena, opeke, žbuke, morta) usitne i razmulje u destiliranoj ili deioniziranoj vodi. Za kvantitativne analize potrebno je uzorak precizno odvagati i otopiti u točno odmjerenom količini vode. Za kvalitativne analize omjer krutog uzorka i vode ne mora biti precizan. Nakon toga otopine se filtriraju. Daljnji analitički postupak izvodi se na filtratu i jednak je postupku za analizu vode.

Kvalitativni testovi glavnih aniona izvode se na klasičan način s pomoću određenih reagensa. **Kloridi** se određuju srebrnim nitratom uz prethodno zakiseljenje vodenog ekstrakta nitratnom kiselinom. Pojava bijelog taloga srebrnog klorida dokazuje nazočnost klorida. Obično se provodi stupnjevanje pojave taloga i njihovo označavanje. Tako bistar ekstrakt znači da klorida nema i označuje se s (-). Vrlo slabo замуćenje označuje se oznakom (+), što znači da ima relativno malo klorida. Jače замуćenje se označuje oznakom (++) , a talog koji pada na dno znači da klorida ima mnogo i označuje se oznakom (+++).

Reagens za **sulfate** jest barijev klorid. Ekstrakt se zakiseli s malo koncentrirane kloridne kiseline. Na-

kon reakcije promatra se stupanj замуćenja i na jednak se način ocjenjuje i označuje.

Nitrati se kvalitativno dokazuju s pomoću »smeđeg prstena«. Vodenom ekstraktu u epruveti doda se FeSO_4 do zasićenja. Toj se smjesi dodaje uljevajući uz stijenku epruvete koncentrirana H_2SO_4 . Ako su prisutni nitrati pojaviti će se smeđi prsten od kompleksa $[\text{Fe}(\text{NO})]^{2+}$. Metoda nije pouzdana za male koncentracije nitrata.

Kvalitativno dokazivanje topljivih **karbonata** i **hidrokarbonata** zahtijeva isparivanje vodenog ekstrakta. Na zaostali se talog kapne par kapi kloridne kiseline i promatra reakcija. Nastanu li mjehurići ugljikova dioksida, to je potvrda za prisutnost tih aniona. Ako očekujemo vrlo male količine karbonata, motrenje mjehurića treba izvoditi pod jačim povećalom ili mikroskopom.

Za kloride, sulfate i nitratre postoje brzi semikvantitativni testovi s pomoću indikatorskih traka (*Mercokoquant*[®] i *Quantofix*[®]). To su uske plastične trake s nanesenim indikatorom (sl. 57). Trake se jednostavno urone u vodeni ekstrakt. Prema promjeni boje indikatora vidi se ima li u uzorku traženog aniona. Na priloženom se predlošku približno može odrediti njihova koncentracija. Nažalost ne postoje takvi indikatori za karbonate pa se oni kvalitativno mogu odrediti jedino klasičnim postupkom.

Jedan od važnih pokazatelja jest ukupni sadržaj topljivih tvari u uzorku. Taj se podatak dobiva određivanjem *isparnog ostatka* što spada već u kvantitativne analize. Posušeni i točno odvagani uzorak smrvi se i određeno vrijeme otapa u određenoj količini deionizirane vode. Topljive soli iz uzorka difuzijom odlaze u otopinu. Filtriranjem se odijeli kruti dio uzorka od vodenog ekstrakta. Dalje se analize izvode u filtratu. Alikvotni dio otopine pipetira se i na vodenoj kupelji ispari do suhog. Isparni ostatak ohlađen u eksikatoru se odvaže. Iz te odvage i odvage krutog uzorka izračuna se postotak svih topljivih soli sadržanih u krutom uzorku. Ovaj isparni ostatak govori nam o ukupnoj količini topljivih tvari u uzorku. To su poglavito topljive soli, a u žbuci i mortu to može biti i nevezani dio vapna koji još nije prešao iz hidroksida u karbonat.

Ishodište za kvantitativne analize aniona također je vodeni ekstrakt od kojeg se odvoji posebna alikvotna količina za analizu svakog aniona. Klasične metode kvantitativnih analiza klorida, sulfata i nitrata danas uglavnom zamjenjuju instrumentalne metode (sl. 58).



57 Indikatorske trake za semikvantitativno određivanje sulfata i nitrata

Indicator tapes for the semi-quantitative determination of sulphates and nitrates.

Tako se **kloridi** određuju *kolorimetrijskim mjerenjem* nakon reakcije sa živinim tiocijanatom i feriperkloratom kod valne dužine od 455 nm. Intenzitet obojenja feritiocijanata razmjern je kloridima sadržanim u uzorku.

Sulfati se kvantitativno analiziraju jednakom kemijskom reakcijom kao i u kvalitativnom testu, a turbiditet (zamućenje) suspenzije barijeva sulfata mjeri se *fotometrijski*. Prije dodavanja barijeva klorida potrebno je dodati stabilizirajuću otopinu ($\text{NaCl} + \text{HCl} + \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), koja inhibira rast mikrokristala BaSO_4 .

Nitrati se kvantitativno određuju kolorimetrijski kao nitriti uz prethodnu redukciju sa smjesom cinka i acetatne kiseline. Potrebno obojenje za kolorimetriju dobije se reakcijom s 1-naftilaminom i sulfamilnom kiselinom.

Rezultati dobiveni u postocima sami po sebi ne govore mnogo. Njih treba usporediti s nekom vrijednošću dobivenom na temelju iskustva, koja pokazuje znači li neki postotak bezopasnu količinu ili je štetan za građevni materijal. U stručnoj literaturi mogu se naći razni podaci o štetnosti pojedinih soli, ali su dosta šturi. U Hrvatskoj se služimo vrijednostima štetnosti topljivih soli prema Austrijskom standardu B 3355 - 1, prikazanima u sljedećoj tablici (D i g l a s, 1994):



58 Digitalni filterfotometar – instrument kojim se mogu razne kemijske analize izvesti brže i točnije nego što je to moguće klasičnim metodama

Digital filter photometer – instrument with which various chemical analyses can be done more rapidly and accurately than with classical methods.

Ocjena	Kloridi (Cl ⁻ %)	Nitrati (NO ₃ ⁻ %)	Sulfati (SO ₄ ²⁻ %)
neštetno	< 0,03	< 0,05	< 0,01
moguće štetno	0,03 - 0,10	0,05 - 0,15	0,01 - 0,25
štetno	> 0,10	> 0,15	> 0,25

Nedostatak je te tablice što ne sadrži podatke za topljive karbonate, jer su i oni štetni za zidove. Nije poznata metodologija na temelju koje su dobiveni ti podaci. Također je upitno za koje materijale vrijede ti kriteriji, jer vjerojatno nije svejedno kakve je strukture materijal, tj. je li porozan ili gust i jesu li pore međusobno povezane i propusne za vlagu i soli ili su izolirane. Ipak, to su za sada najbolji kriteriji prema kojima možemo ocijeniti i svrstati rezultate naših analiza.

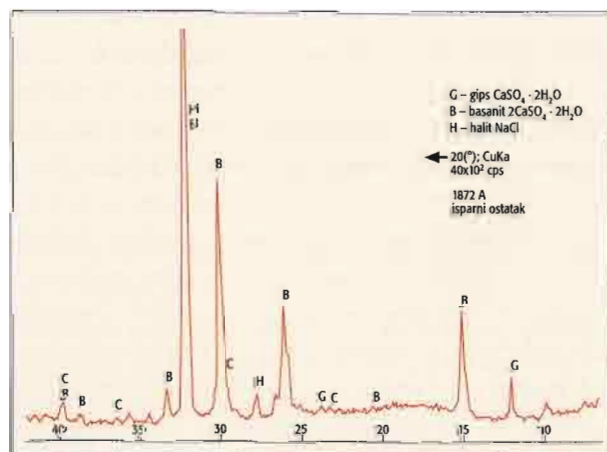
Ako nas zanima kvantitativni sadržaj pojedinih uobičajenih kationa (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), oni se također određuju instrumentalnim metodama. Tako se osim klasičnim metodama, svi navedeni kationi mogu analizirati metodom *plamene fotometrije*.

U analitici postoje i druge instrumentalne metode, a iz godine u godinu pojavljuju se novije i sofisticiranije. Neki su uređaji vrlo skupi i zahtijevaju dobru podučnost. Na tržištu se pojavljuju i lagani prenosivi instrumenti kao detektor za soli, protimeter, reflektometar, ionski kromatograf i dr. Za nas je ovdje posebno zanimljivo ispitivanje sadržaja pojedinih soli (ne kationa ili aniona) metodom *x-difrakcije* ili *rentgenske difraktometrije*. Iz uzorka so-

li izlučenih na površinu zida ili iz isparnog ostatka ovom se metodom mogu semikvantitativno odrediti soli, uključujući i sadržanu kristalnu vodu, što je klasičnim kemijskim metodama vrlo teško postići (sl. 59). Ova se metoda primjenjuje poglavito kao komplementarna prije navedenim metodama. Njome upotpunjavamo sliku o onečišćenosti zida pojedinim štetnim sastojcima.

Uz navedenu metodu x-difrakcije soli se mogu odrediti i polarizacijskim mikroskopom. To se postiže mjerenjem indeksa loma mikropreparata u imerzijskom ulju s indeksom loma $n_D = 1,515$ (Arnold, 1984). I ta se metoda primjenjuje kao komplementarna mikrokemijskim analizama, a katkad i rentgenskoj difraktometriji. Ove metode imaju kvalitativni karakter pa ne mogu zamijeniti kvantitativne kemijske analize tamo gdje su one prijeko potrebne.

Soli u zraku u obliku aerosola kvantitativno se određuju slično kao i one u zidu, ali je uzimanje uzorka vrlo različito, kao i iskazivanje dobivenih rezultata. Zrak koji želimo analizirati usisava se s pomoću posebne crpke preko filtra s reagensima za određene sastojke koje ispituje. U sustav usisavanja mora biti uključeno i plinsko mjerilo kojim mjerimo volumen analiziranoga zraka. Filtri s reagensima obično se mijenjaju jednom na dan uz zapisivanje volumena zraka koji je prostrujio kroz filtre. Sadržaj se filtra ekstrahira u deioniziranoj vodi i potom se kvantitativno analizira nekom od metoda za vodeni ekstrakt. Dobiveni se rezultati izražava-



59 Rezultati analize soli u kamenu šibenske katedrale s pomoću x-difrakcije. NaCl je sadržan u dominantnoj količini, CaSO₄ · H₂O je u rasponu od vrlo malo do znatno, a CaSO₄ · 2H₂O u maloj količini. Neidentificiranih soli i kalcita ima vrlo malo do malo.

Result of analysis of salt in the stone of Šibenik Cathedral with X-diffraction. NaCl is contained in predominant amount, CaSO₄ · H₂O is in a range of very little to considerable and CaSO₄ · 2H₂O in small amounts. Unidentified salts and calcite are present little to very little.

vaju u mikrogramima analizirane tvari po kubnom metru zraka (μg/m³). Tako se mogu određivati kloridi, sulfati, ali i sumporni dioksid, sumporna (sulfatna) kiselina, solna (kloridna) kiselina, krute čestice (čada i prašina) i dr.

Analiza topljivih soli u kišnici određuje se uobičajeno kao soli iz vodenog ekstrakta, a uzorci se uzimaju iz kišomjera (*ombrometra*).

2.3. SINTEZA REZULTATA ISTRAŽIVANJA I IZRADA SANACIJSKOGA ELABORATA

Svi podaci dobiveni vizualnim pregledom moraju se na kraju dobro razmotriti i usporediti s dobivenim rezultatima fizikalnih mjerenja i kemijskih analiza. Same dobivene brojke ne znače mnogo ako ih se ne zna interpretirati, bez obzira na to je li riječ o fizikalnim mjerenjima ili o kvantitativnim kemijskim analizama. Numerički podaci daju ocjenu neke procavane pojave. Ta ocjena mora biti putokaz za traženje rješenja problema. O obradi podataka ne mogu se dati jedinstveni recepti niti se može izraditi »kuharica«. Važno je da se mnoštvo teško preglednih i teško shvatljivih numeričkih podataka dobivenih mjerenjima prevede u oblik koji se može lakše predočiti. Nizovi brojeva pretvaraju se u jednoznačne reprezentante ili u dijagrame u kojima će se prepoznati tendencije nekih zbivanja ili pojava u vremenu i istraživanom prostoru. Pri toj će obradi poslužiti razne statističke analize kojima se uočavaju određene zakonitosti pojava. Usporedba dobivenih reprezentanata s usvojenim normativima daje ocjenu nekog istraživanog problema. Svakako će veći broj numeričkih podataka dati sigurniju ocjenu stanja. Ako za neke mjerene pojave ne postoje normativi za usporedbu, treba ih usporediti sa sličnim podacima iz vlastitoga ili tuđeg iskustva. Ako pak nemamo ni to, potrebno je provesti istraživanja koja će pokazati određenu zakonitost pojava. Taj je put najteži, ali je vrlo koristan i nuždan za daljnje napredovanje ove struke. Stupanj vjerojatnosti da rezultati mjerenja dokazuju neku pojavu utvrđujemo statističkim testiranjima rezultata. Njima ćemo utvrditi je li neka razlika značajna ili slučajna. Samo se pravilnom obradom mjernih podataka dolazi do točnih i jednoznačnih zaključaka i ispravne dijagnoze.

Sanacijski se elaborat ne bi smio sastojati samo od simptomatične obrade, odnosno uklanjanja simptoma, nego težište treba staviti na kauzalnu obradu kojom će se eliminirati uzročnici vlaženja. Za ilustraciju može poslužiti primjer sušenja zraka u zgradi s vlažnim zidovima s pomoću dehumidifikatora, umjesto da se problem u dugoročnom smislu riješi sanacijom vlage u zidovima.

Na temelju rezultata analiza i ostalih istraživanja treba napraviti sintezu svih relevantnih podataka i izraditi *sanacijski elaborat*.

Preporuke u sanacijskome elaboratu moraju sadržavati:

- način odstranjivanja (jednog ili više) izvora vlaženja
- metodu saniranja posljedica vlaženja i iscvjetavanja soli
- način isušivanja zidova
- najprikladniju metodu konsolidacije trošnog materijala i preporuku koje materijale rabiti za restauriranje
- davanje uputa za kontrolu i održavanje objekta.

Na kraju sanacijski elaborat mora sadržavati i troškovnik sanacijskih radova baziran na procjeni potrebnih radnih sati, materijala, putnih troškova, dnevnica, troškova smještaja, kao i troškova suradnje s raznim specijaliziranim stručnjacima.

Pri davanju smjernica za sanaciju često treba naći kompromis između manjeg od dvaju zala. Naime, neki sanacijski materijali imaju osim korisnih svojstava i kontraindicirajuće karakteristike, pa o tome treba voditi računa.

Za sanaciju treba preporučiti dobro proučene i dokazane sustave i materijale. Preparati koji se rabe u sanacijskom postupku moraju imati deklaraciju o kemijskom sastavu baš kao i lijekovi koji se upotrebljavaju u humanoj medicini. Preparate za koje tvornički tehnolozi kažu da je njihov kemijski sastav tvornička tajna, treba u pravilu izbjegavati. Tehnološki propis za proizvodnju smije biti tajna, ali se ne smije tajiti i kemizam. Svakako je potrebno ustajno inzistirati na kemizmu sanacijskih preparata.

I još jedna ne manje važna preporuka. Mjerenja i analize u svrhu postavljanja dijagnoze kao i kasnije kontrole učinkovitosti sanacijskog postupka mora obavljati neovisna institucija ili laboratorij. To nikako ne bi trebao biti izvođač radova, proizvođač preparata ili njegov zastupnik.

3. SANACIJSKI POSTUPCI

U borbi protiv vlage važan je redosljed sanacijskih zahvata. Nakon pregleda objekta i postavljanja dijagnoze prvi korak u sanaciji jest **uklanjanje izvora vlaženja**. Potom slijedi **odstranjivanje akumuliranih štetnih soli** i **stabiliziranje kriptoklime** radi sprječavanja kondenzacije i higroskopsnoga vlaženja. Sljedeća je faza **sušenje zida**, koje može biti prirodno ili umjetno. Na kraju se poduzimaju postupci za **konsolidaciju** trošnog materijala i **restauriranje**. To, međutim, nije jasno mnogim specijaliziranim stručnjacima za pojedini sanacijski sustav. U većini slučajeva misli se da je dovoljno ukloniti izvor vlaženja i obnoviti žbuku, pa će time biti sve u redu. Budući da su često i oni sami zbog neznanja uvjereni u to, oni u to nastoje uvjeriti i vlasnike, odnosno korisnike zgrada. Zbog toga se ne treba čuditi što su sanacijski zahvati nerijetko neuspješni. Radi lakšeg pregleda ovdje će sanacijski postupci biti prikazani prema izvorima vlaženja.

3.1. SANACIJA LIKVIDNE VLAGE

Kada se govori o vlazi u zgradama, najčešće se spominje kapilarna vlaga. Razni su priručnici najviše prostora posvetili toj pojavi. I ovdje će biti tako, ali ne smijemo zaboraviti ni ostale oblike vlaženja i njihovu sanaciju. Osim o kapilarnoj vlazi, u poglavlju o likvidnoj vlazi govori se o prodorima kiše i o neispravnim vodovodnim instalacijama. O saniranju prodora kiše, kao i vlage uzrokovane curenjima instalacija govorit će se mnogo manje, jer je taj problem uglavnom lakše rješiv od kapilarne vlage.

3.1.1. SANACIJA KAPILARNE VLAGE

3.1.1.1. Drenaža i zračni kanali

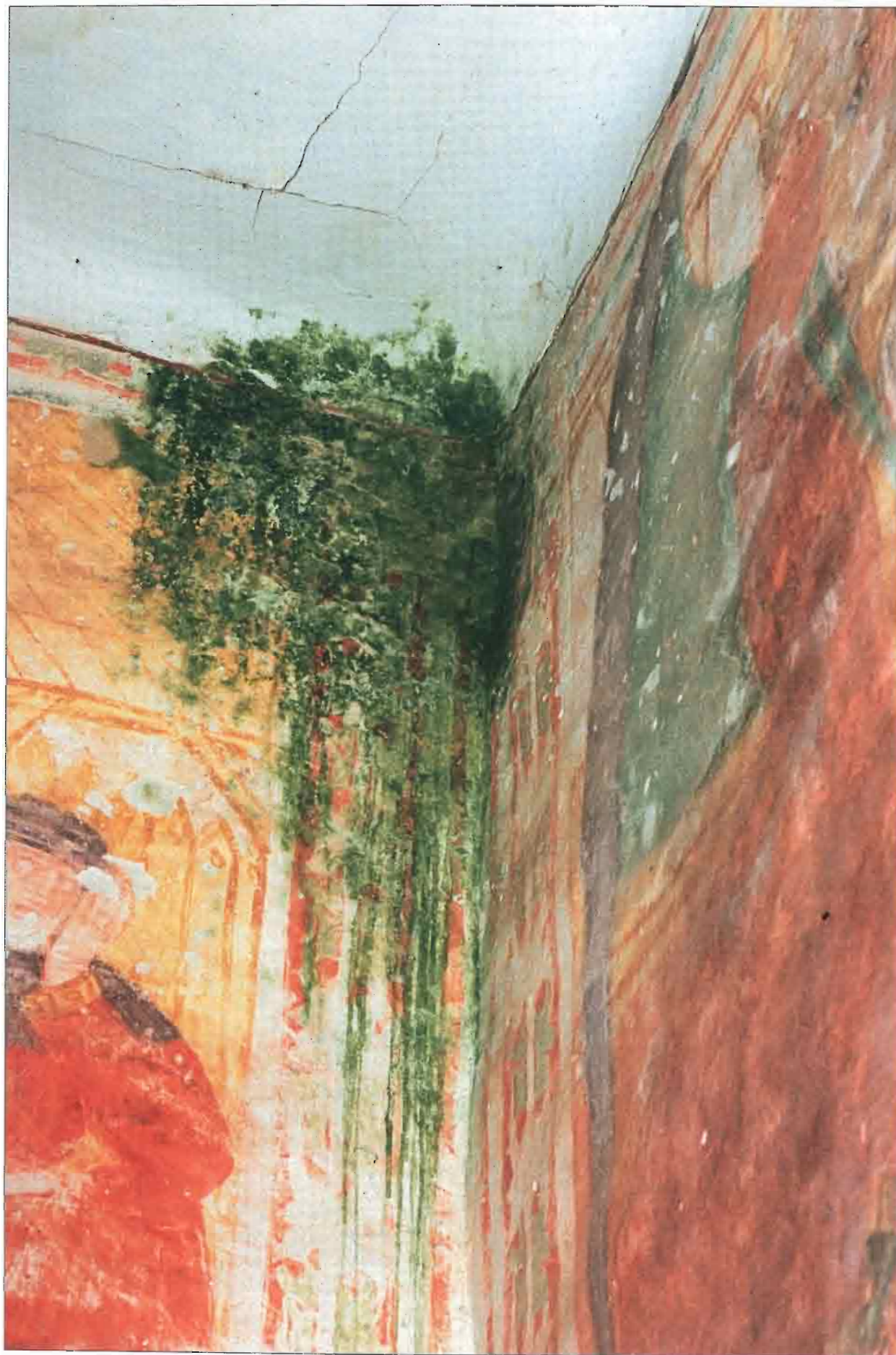
Drenaža se primjenjuje za sprječavanje bočnoga prodora površinskih voda nastalih od jakih kiša, kao i za limitiranje povišenja vodnog lica za visokih vo-

da, tako da razina vode temeljnica ne može doseći zid i uspinjati se kapilarnim silama (Stambolović i van Asperen de Boer, 1976). Dovoljno duboko položeni drenažni kanali i pravilno riješen odvod krovnih voda sigurno će smanjiti vlagu u zidu u usporedbi sa situacijom kada drenaže nije bilo. Isto je tako sigurno da drenaža neće riješiti posljedice dugotrajnoga vlaženja u obliku akumuliranja štetnih topljivih soli u zidu, pa će higroskopnu vlagu trebati sanirati na drugi način. Izvedbe drenaže se razlikuju. Drenažne se cijevi izrađuju od perforiranog betona ili perforirane plastike, koja može biti kruta ili savitljiva. Proizvodi se u više profila. Polaze se na dno kanala iskopanog uz zid malo ispod razine temelja. Zatrpava se separiranim krupnim šljunkom. Zamuljivanje šljunka sprječava se umećanjem geotekstila između zemlje i šljunka. Ako je to moguće, perforirane se cijevi polažu oko cijele zgrade. Na mjestima skretanja cijevi postavljaju se revizijska okna. Ako je objekt smješten na vrhu brda, odvodnja se izvodi zvjezdasto na sve strane, a ako je na padini, onda se odvodnja provodi nizbrdo neperforiranom cijevi koja ima dovoljan profil za odvodnju svih prikupljenih voda.

Najčešće se iskop za polaganje perforiranih cijevi radi uza sam zid (temelj). Neki projektanti predviđaju pri tome i izvedbu vertikalne hidroizolacije. Takav je zahvat potreban samo kada se sumnja na jak bočni prodor vode. Općenito, ako je drenaža zaista dobro izvedena, ovaj, dodatni zahvat nije potreban (sl. 60).

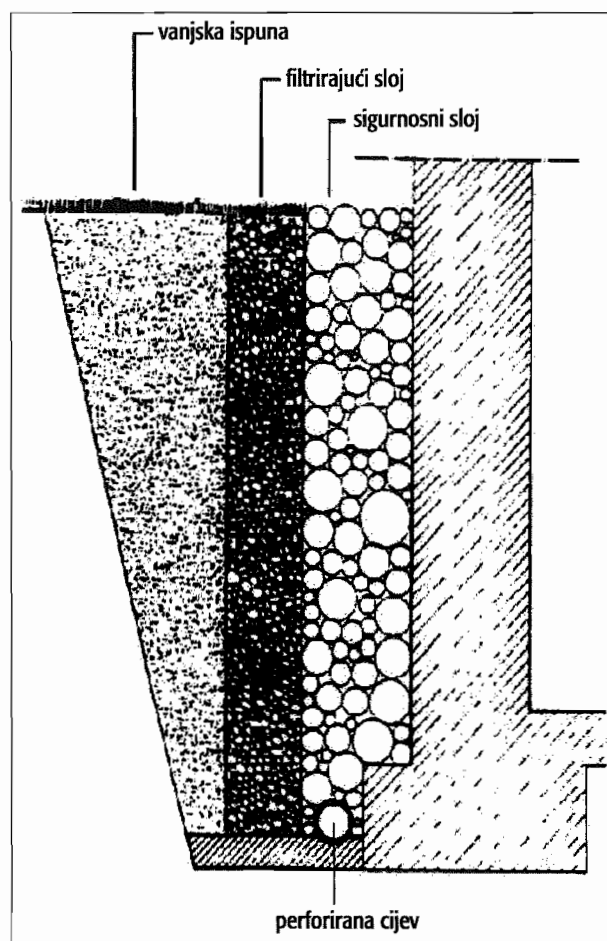
Katkad, zbog upitne statike zgrade ili zbog nekog drugog razloga, drenažni se kanal može izvesti i nešto dalje od zida, ali se tada obično izvodi u kombinaciji sa zračnim kanalom (sl. 61). Zračni kanali osiguravaju prosušivanje temelja nakon iskopa i izvedbe drenaže.

Kod zgrada u ravnici postoji još jedan problem. Temelj može biti dublji od obližnje kanalizacije u koju



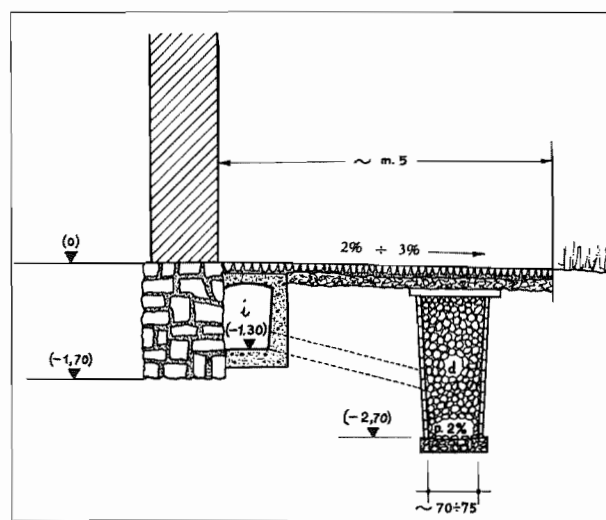
Kanfanar, kapela BD Marije »od Lakuća«, zelene alge na mjestu prodora oborinske vlage (foto Vid Barac)

Kanfanar, Chapel of the BVM »of Lakuć«, green algae where rainwater has penetrated (photo by Vid Barac)



60 Drenaža s perforiranom cijevi
Drainage with a perforated tube.

treba odvesti drenažnu vodu. Polaganje drenažne cijevi iznad dna temelja nema osobitog smisla. Drenažne cijevi treba postaviti ispod razine temelja, a na najnižoj točki drenažnog kanala treba postaviti kaljužnu pumpu s graničnikom za automatsko



61 Zračni kanal s odvodnjom prema upojnom bunaru (iz: Massari, 1971)
Air channel for drainage to a soakaway (from Massari, 1971).

uključivanje pri prvoj pojavi povišenja vodostaja. Odavde se voda prepumpava na višu razinu i odvođi u kanalizaciju.

Takvo rješenje ima nekoliko nedostataka u usporedbi s klasičnom odvodnjom drenažne vode. U slučaju kvara crpke sustav ne funkcionira i voda može prodrijeti u zid. Drugi je problem mogući nestanak električne energije (zbog udara groma u trafostanicu i sl.). Prvi se problem može riješiti relejnim prebacivanjem na rezervnu crpku, a drugi je objektivno teško rješiv.

Stambolov i van Asperen de Boer (1976) upozoravaju da drenaža može s vremenom smanjiti gustoću tla i u dugoročnom smislu uzrokovati statičke poremećaje. Ako se procijeni da bi drenaža mogla biti štetna, kombinira se i sa statičkim učvršćenjem temelja. Za snižavanje vodnog lica Feilden (1982) sugerira iskopavanje bunara na strateškim točkama oko zgrade i prepumpavanje. Pri tome treba paziti da se ne ispiru najsitnije čestice tla zbog poremećaja statike. Izvedba vertikalne vodonepropusne zavjese oko povijesnih građevina smanjit će opasnost od ispiranja sitnih čestica iz tla. Česte inspekcije funkcioniranja sustava i ugradnja automatskog alarma u slučaju kvara smanjit će rizike od poplavlivanja temelja.

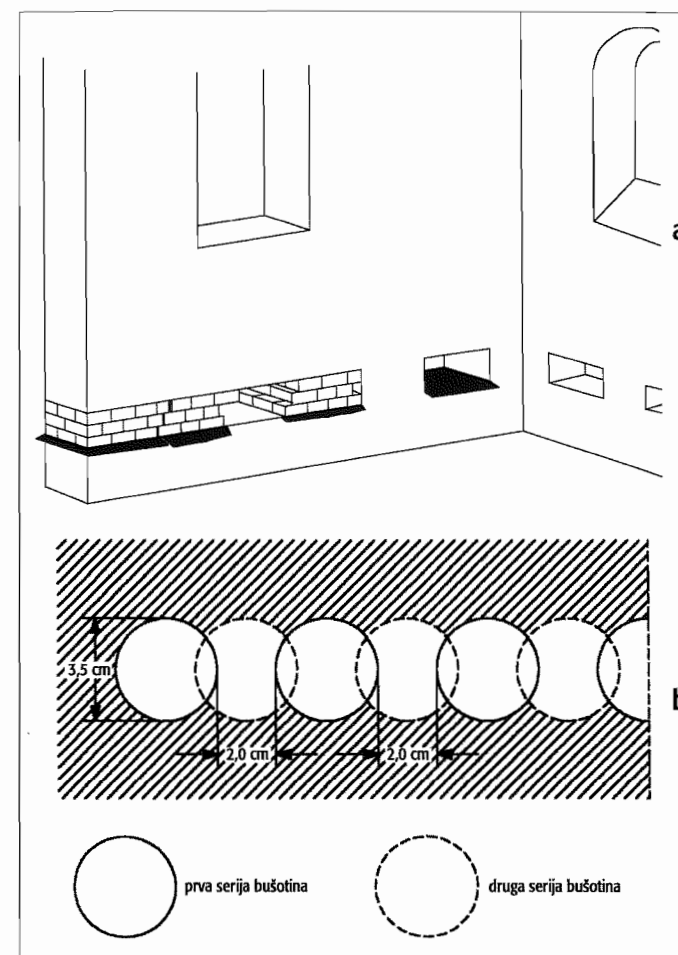
3.1.1.2. Mehanički postupci za horizontalnu hidroizolaciju

Najstariji postupak sprječavanja kapilarnog uzlaza jest zamjena zida iznad temelja »u kampadama«¹³ i polaganje bitumenske ljepenke za horizontalnu izolaciju. U naizmjeničnim sekcijama oprezno se izvade opeke (ili kamen), položi hidroizolacija i opet se zazidaju te sekcije. Kada taj dio dovoljno očvrstne, vadi se opeka iz sljedeće sekcije i polaže izolacija. Postupak se nastavlja dok se ne izvede cjelokupna horizontalna hidroizolacija zida (sl. 62a).

Umjesto polaganja novih redova opeke, ti se dijelovi zida često podbetoniraju. Ovo je dug, mukotran i skup zahvat, ali je učinkovit ako se za žbukanje obje strane zida upotrebljavaju hidrofozne žbuke. Obična žbuka može s vremenom poslužiti kao most za vlagu, pa cijeli zahvat nakon više godina postaje upitan.

Varijantu podrezivanja zida i umetanja hidroizolacije razradio je Massari (1971). To je proveo bušenjem niza bušotina u temeljnom dijelu zida i ispunjavanjem bušotina vodonepropusnom umjetnom

¹³ campo (tal.) – polje



62 Ulaganje hidroizolacijskoga sloja nakon podsijecanja zida: a) »u kampadama«, b) Massarijevom metodom (iz: Mora i Phillipott, 1977; Massari, 1971)
Laying down a hydroisolation layer after undercutting the wall: a) in alternate length work b) by the Massari method (from Mora and Phillipott, 1977; Massari, 1971).

smolom. Najprije se na preskoke izbuši jedan niz bušotina i zabrtvi, a potom se između zabrtvljenih bušotina izbuši drugi niz. Bušotine iz drugog niza moraju se malo preklapati s onima iz prvog niza. Nakon ispunjenja drugog niza smolom dobiva se za vlagu nepropustan horizontalni sloj (sl. 62b).

Nešto kasnije pojavila se metoda piljenja zida dijamantnim pilama s istodobnim umetanjem hidroizolacije u prorez. I tu je razrađeno više inačica. Tani se zidovi podrezuju lančanom pilom (poput pile za rušenje stabala) s dijamantnim oštricama. Deblji se zidovi režu pilom koja je vođena na vodilici. Drugi način jest piljenje zida s pomoću čeličnih žica (sajla) s dijamantima, slično kako se danas vade kameni blokovi u kamenolomima (sl. 63).

Za navedene metode primjenjuju se različita sredstva za hidroizolaciju. To su deblje sintetičke folije, bakreni limovi, kombinacija limova i ploča od škripljavaca.

U mehaničke postupke izvedbe horizontalne hidroizolacije zida ubraja se i umetanje valovitog lima od nehrđajućeg čelika u reške između opeka. Lim se ubacuje u rešku s pomoću posebno konstruiranoga vibracijskog stroja (sl. 64).

Česte su primjedbe na ovu metodu da se tim postupkom objekt statički oslabljuje i da nije više otporan na horizontalne sile koje nastaju prigodom potresa. Izvođači radova brane ovaj sustav tvrdeći da upravo valovitost lima pruža otpor horizontalnim silama i sprječava horizontalne pomake.

3.1.1.3. Kemijska horizontalna hidroizolacija

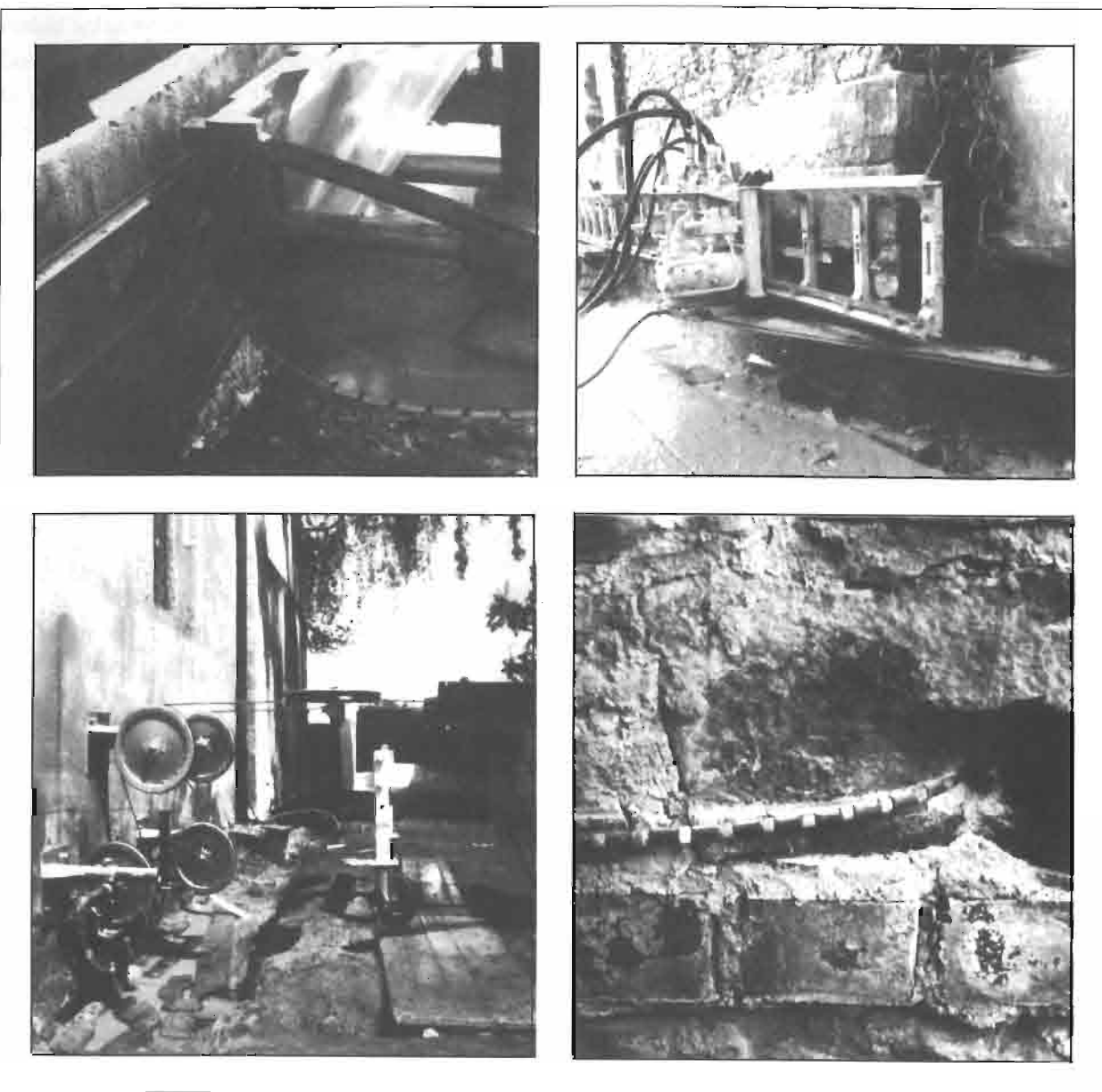
Kemijska horizontalna hidroizolacija zidova izvodi se bušenjem niza bušotina iznad temelja i unošenjem hidroizolirajuće tekućine. Hidroizolirajuća se tekućina difuzijom koncentrično širi kapilarama i nakon nekoga vremena skrtnjava. Zona u kojoj je zid natopljen kemikalijom stvara barijeru za kapilarni uspon vlage. Tekućina može biti različitoga kemijskog sastava, kao i otapala za nju. Izvedba bušotina razlikuje se od sustava do sustava, kao i način unošenja tekućine u bušotinu.

U nekim se slučajevima buše cikcak-bušotine nagnute prema unutrašnjosti zida pod kutom od 20 do 45°. U svaku se bušotinu ulijeva hidroizolirajuća tekućina običnom kantom za zalijevanje vrta (sl. 63a). Ovaj postupak je najjeftiniji i pristupačan izvedbi po sistemu »sam svoj majstor«, ali je ujedno i najmanje učinkovit.

Sličan, ali poboljšani sustav jest privremena ugradnja plastičnih posuda oblika lule u bušotine u koje se ulijeva tekućina za impregnaciju. U ovom je slučaju bolja kontrola upijanja zida u pojedinim bušotinama nego u prvom slučaju. Postupak ulijevanja izvodi se sve dok bušotina može primiti tekućinu (sl. 65b). Impregnirajuća tekućina treba imati približnu viskoznost kao voda, ili manju od nje, tako da može ispuniti pore u kojima je bila voda.

U oba slučaja impregnirajuća tekućina unosi se u zid samo pod hidrostatskim tlakom, pa to neki nazivaju *infuzijom* (ili katkad *transfuzijom*).

Postoje sustavi horizontalne kemijske hidroizolacije gdje se tekućina unosi u bušotine pod povišenim tlakom (sl. 66). U tu se svrhu obično napravi niz bušotina koje nisu nagnute. U bušotine se privremeno ugrađuju krute perforirane cijevi. Krajevi cijevi koji vire iz bušotina spajaju se savitljivim plastičnim cijevima za povećani tlak, koje su sve spojene za uređaj



63 Piljenje zida radi ubacivanja hidroizolacijske folije: a) cikularom, b) lančanom pilom, c) »sajlom«, d) detalj »sajle« s dijamentima (iz: Arendt i Wiesen, 1990)

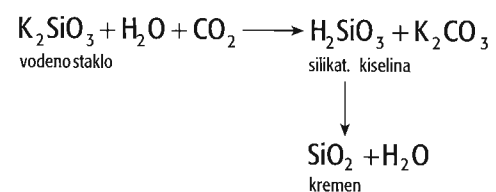
Sawing a wall for the purpose of inserting hydro-insulation foil: a) with a circular b) with a chain saw, c) with a cable d) detail of a cable with diamonds (from Arendt and Wiesen, 1990).

za injiciranje tekućine. Ovaj se način unošenja tekućine zove injiciranje¹⁴ i efikasniji je od sustava infuzije, jer je veća vjerojatnost natapanja i impregnacije zida od jedne do druge bušotine. Postoje i uređaji za injiciranje pod pulzirajućim tlakom.

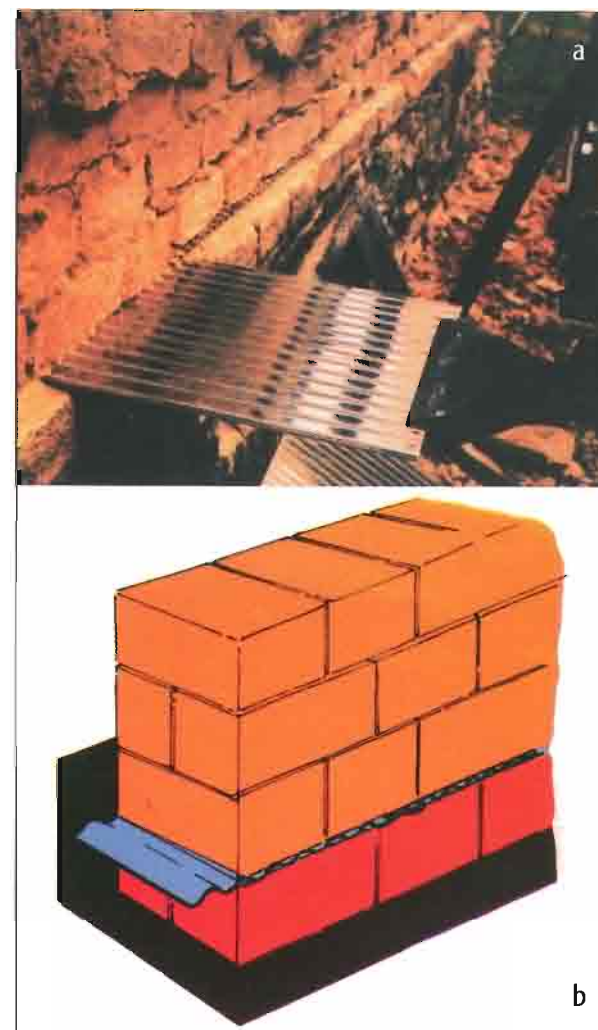
Nakon završetka unošenja tekućine u zid bušotine se ispunjavaju vlagonepropusnom žbukom. Kako je na početku rečeno, kemizam je impregnirajućih tekućina različit.

Za kemijsku hidroizolaciju često se upotrebljava otopina alkalijskih silikata u vodi. To može biti natrijev ili kalijev silikat čiji su trgovački nazivi kalije-

vo ili natrijevo vodeno staklo. Silikat reagira s CO₂ iz zraka i stvara silikatnu (kretničnu) kiselinu:



Ta silikatna kiselina otpušta vodu i razgrađuje se u kremen, SiO₂, koji stvara vodonepropusni sloj u porama zida. No, nusprodukt ove reakcije jest kalijev karbonat, K₂CO₃, koji je u ovom slučaju kontraindiciran. To je topljiva sol koja s vremenom može iscvjetavati i napraviti štetu zidu. Novija su istraži-



64 a) Umetanje nehrđajućeg valovitog lima u rešku između redova opeka s pomoću posebnog tlačno-vibracijskoga uređaja; b) Crtež ubačenog lima u reški

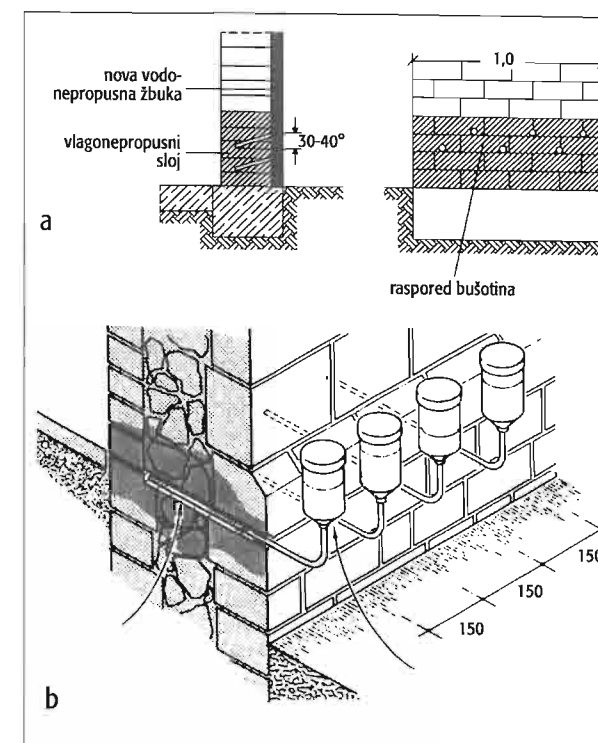
a) Insertion of non-rusting corrugated metal sheeting in the joint between layers of brick with the help of a special pressure-vibration device; b) drawing of the inserted metal in the joint.

vanja pokazala da konsolidanti ne mogu formirati nepropusnu barijeru oko kristala soli i time sprječiti gibanje soli u obrađenom zidu. Pokretljivost soli bit će donekle smanjena, ali hidracijski procesi neće biti zaustavljeni (Berry i Price, 1994). Zbog tog je razloga vrlo upitna uporaba vodenoga stakla za ovu svrhu.

U obliku vodenih otopina za impregniranje rabe se još:

- kalijev metilsilikonat
- smjesa kalijeva silikata i kalijeva metilsilikonata
- kalijev propilsilikonat
- smjesa silikonata i lateksa.

I ove kemikalije reagiraju s CO₂ iz zraka. Djeluju tako da kapilare postaju hidrofobne. Nusprodukt reakcije i ovdje je kalijev karbonat.



65 Ulijevanje (infuzija) impregnirajuće tekućine u bušotine: a) povremeno, s kantom za zalijevanje vrta, b) kontinuirano, s pomoću niza privremeno ugrađenih posuda s »lulama«.

Infusion of impregnating liquid in boreholes: a) from time to time, with a watering can; b) continuously, with a number of vessels with pipes temporarily installed.

Otopina etilsilikata u organskom otapalu koristi za skrutnjavanje vlagu iz zida. Hidrolizom se razgrađuje na silicijsku kiselinu i etilni alkohol koji isparava iz zida, pa ne zaostaju štetni sastojci.

Silan i oligomerni siloksan priređuju se u organskim otapalima. Za proces skrutnjavanja uzimaju također vlagu/vodu iz zida i hidrofobiraju kapilare.

Kao hidroizolirajuće tekućine upotrebljavaju se još bitumenske emulzije, otopine sintetičkih smola u organskim otapalima i vrući parafin. Te emulzije, otopine i parafin nisu hidrofobni, ali djeluju tako da ispunjavaju kapilare. Od smola se upotrebljavaju poliuretan, poliester, epoksidi i akrilati. Poliuretan polimerizira s vlagom iz zida, a za plijester i epokside potrebni su za skrutnjavanje katalizatori i utvrđivači. Akrilati se skrutnjavaju isparivanjem otapala.

U svrhu ispunjavanja pornoga prostora, kojim se stvara hidroizolirajući sloj, rabi se još i cementna emulzija, koja nije pokazala zadovoljavajuće rezultate.

Novija su istraživanja pokazala da je najpovoljniji materijal za kemijsku horizontalnu hidroizolaciju silikonska mikroemulzija. Vrlo dobre rezultate dale su i otopine siloksana u organskom otapalu (van Hees i Koek, 1995).

¹⁴ Sinonim za injiciranje jest injektiranje (lat. injicio = ubaciti)

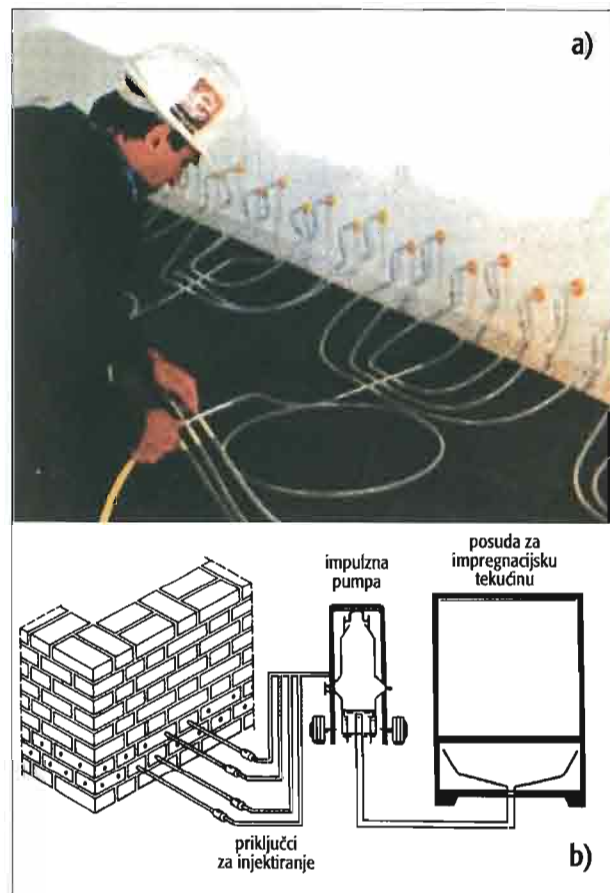
Na kraju treba napomenuti nekoliko važnih stvari. Prije svega izvođač se mora držati uputa proizvođača. Cijeli pothvat na stvaranju kemijske hidroizolacije neće uspjeti ako se žbukanje zida izvede prije skrutnjavanja impregnirajuće tekućine. Potrebno vrijeme za skrutnjavanje ovisi o debljini zida, pa kadšto treba prije žbukanja čekati i više mjeseci. Mjerenjem sadržaja vlage određuje se kada se smije započeti nanošenje žbuke. **Žbukanje je potrebno izvesti vlagonepropusnom, hidrofobnom žbukom** kako žbuka ne bi postala »most za vlagu«

3.1.1.4. Isušivanje zida

Ako je stupanj provlaženosti zida veći od 50%, izvedba kemijske horizontalne hidroizolacije infuzijom ili injiciranjem neće biti uspješna jer nema dovoljno mjesta za ispunjenje pornog prostora impregnacijskom tekućinom. Stoga je potrebno prije toga zid isušiti (Arendt i Wiesen, 1990).

Isušivanja se izvode na više načina:

- mikrovalno isušivanje u bušotini (sl. 67a)
- toplim zrakom u bušotini



66 a) Ubacivanje (injiciranje) impregnirajuće tekućine u bušotine pod povišenim tlakom i impulsima. b) Shematski prikaz rada uređaja (iz: Venzmer et al., 1991)

a) Injecting impregnating fluid into boreholes under pressure and impulses. b) Diagrammatic depiction of the work of the device (from Venzmer et al., 1991).

- infracrvenim patronama u bušotini (sl. 67b)
- isušivanje zida elektroosmozom
- grijanje prostora i prozračivanje
- sušenje zraka u prostoriji odvlaživačima (dehumidifikatorima).

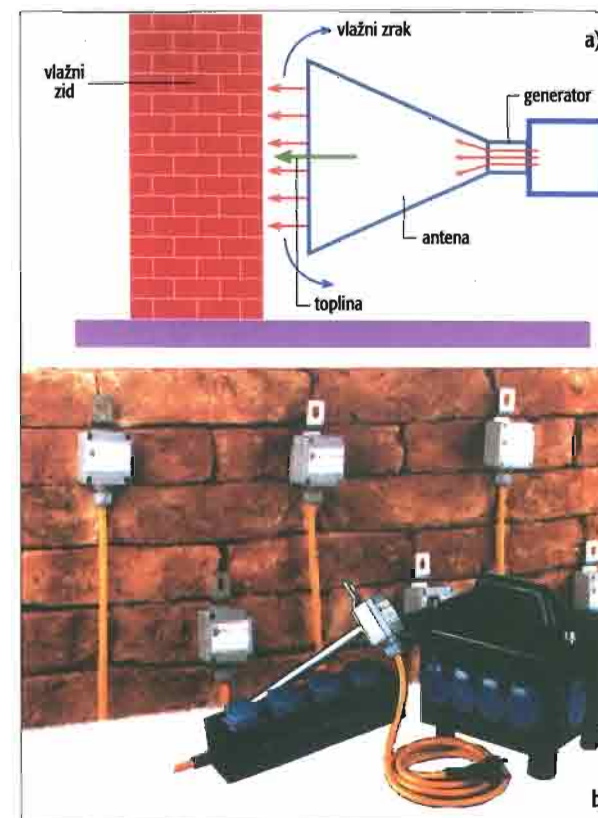
Sušenje zida poželjno je provesti i u nekim drugim fazama sanacijskih postupaka. Tako npr. nakon izvedbe neke od metoda horizontalne hidroizolacije zid još može biti mjesecima vrlo vlažan u zoni iznad izvedene barijere za vlagu. Za ubrzanje procesa prirodnoga sušenja prije nanošenja sanirne žbuke, zid se može isušiti na umjetni način jednom od navedenih metoda.

Ovdje treba naglasiti da se zid ne smije isušivati prije desalinizacije, jer će u protivnome nastati akumulacija soli u površinskoj zoni sa svojim štetnim djelovanjem.

3.1.1.5. Vertikalna hidroizolacija

U borbi protiv uzlazne kapilarne vlage u prošlosti je bilo dosta pokušaja da se problem riješi vertikalnom hidroizolacijom zida. Izvedaba vertikalne hidroizolacije ima svakakvih, ali nisu sve djelotvorne. U nekim slučajevima izolacija je stavljena samo s vanjske strane zida, u drugim s unutarnje a ponekad i s objiju strana. Za izolaciju je uglavnom služio bitumenski premaz na koji je nabacan cementni »špric«, a potom gruba i fina žbuka. Katkad se uz bitumenski premaz stavljala i krovna ljepjenka. Obično se tada na ovako izolirani zid žbukom naljepio još jedan red opeke »na kant«, odnosno »na nož«. Negdje su upotrebljavani i cementni premazi s dodacima za brtvljenje pora kao što je ribana koža i druge tvari koje bubre s vlagom. Kroz više godina pokazalo se da izvedbe vertikalnih hidroizolacija bez kombinacije s horizontalnom izolacijom nisu bile uspješne. Posljedica je toga bila da se vlaga uspinjala još više do zone gdje je mogla isparavati (sl. 68 i 69).

Vertikalna hidroizolacija ima smisla samo onda kada je kombinirana s nekim načinom horizontalnog presijecanja dovoda vode, odnosno uspona vlage. To posebno vrijedi u slučaju ukopanih ili poluukopanih prostorija. Najbolje je rješenje da se najprije iskopa rov do podnožja temelja. U razini poda izvede se horizontalno presijecanje kapilarnog uzdizanja vlage. To može biti jedan od mehaničkih ili kemijskih postupaka. S vanjske strane izvede se vertikalna izolacija koja ide od spoja s horizontalnom izolacijom do visine između 60 i 100 cm od poda, gdje će poslije doći sokl. Kao dodatna mjera sigurnosti



67 Uređaji za sušenje zida: a) mikrovalovima, b) električnim patronama

Device for drying a wall: a) with microwaves, b) with electrical cartridges.

nosti izrađuje se i drenažni kanal (sl. 70a). Ova metoda bit će uspješnija ako se uz navedene zahvate izvede i podna hidroizolacija.

Ako zbog nekog razloga nije moguće izvesti iskop za vertikalnu hidroizolaciju s vanjske strane podruma (ili poluukopanoga prostora), vertikalnu hidroizolaciju treba izvesti s unutarnje strane. U tom se slučaju horizontalna hidroizolacija zida mora izvesti u razini vanjskoga tla. Ovaj način također zahtijeva izvedbu podne hidroizolacije (sl. 70b).

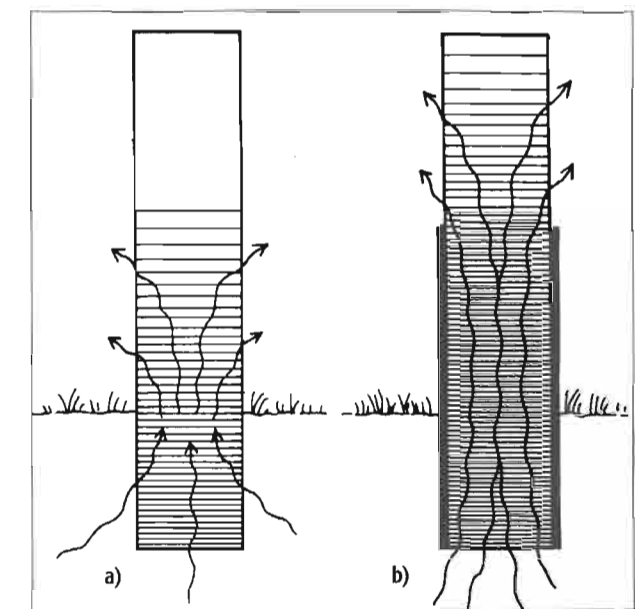
Dosta čest slučaj pokušaja zaštite od kapilarne vlage jest i montiranje drvene obloge zida u zoni od poda do približno visine čovjeka. Takav zahvat donekle funkcionira kao i izvedba vertikalne hidroizolacije bez horizontalne hidroizolacije. U prvo vrijeme sve je naoko dobro, ali kroz nekoliko godina kapilarna vlaga doseže još veću visinu, a drvena obloga počinje trunuti.

Nešto je bolji postupak oblaganje unutarnje strane zida šupljom opekom zidanom »na nož« s malim razmakom od vlažnoga zida tako da se dobije »zračni jastuk«. Novija je inačica toga postupka oblaganje gipsanim pločama sa zračnim jastukom. Prethodno se otuče vlažna žbuka. Zid ostaje vlažan, ali

se vlaga ne prenosi na novu oblogu, koja je od njezga odmaknuta. To je, međutim, samo privremeno rješenje jer će vlaga unatoč zračnoj izolaciji prije ili kasnije prodrijeti na drugu stranu obloge.

3.1.1.6. Hidroizolacija poda

Kapilarna vlaga iz tla prolazi i kroz neizolirani pod u prizemlju ili podrumu zgrade pa isparavanjem povećava relativnu vlagu zraka u prostoriji (sl. 71). Ako želimo smanjiti relativnu vlagu zraka, potrebno je izvesti među ostalim zahvatima i hidroizolaciju poda. Stari, neizolirani pod se uklanja, a na njegovo se mjesto polaže armiranobetonska ploča. Na-



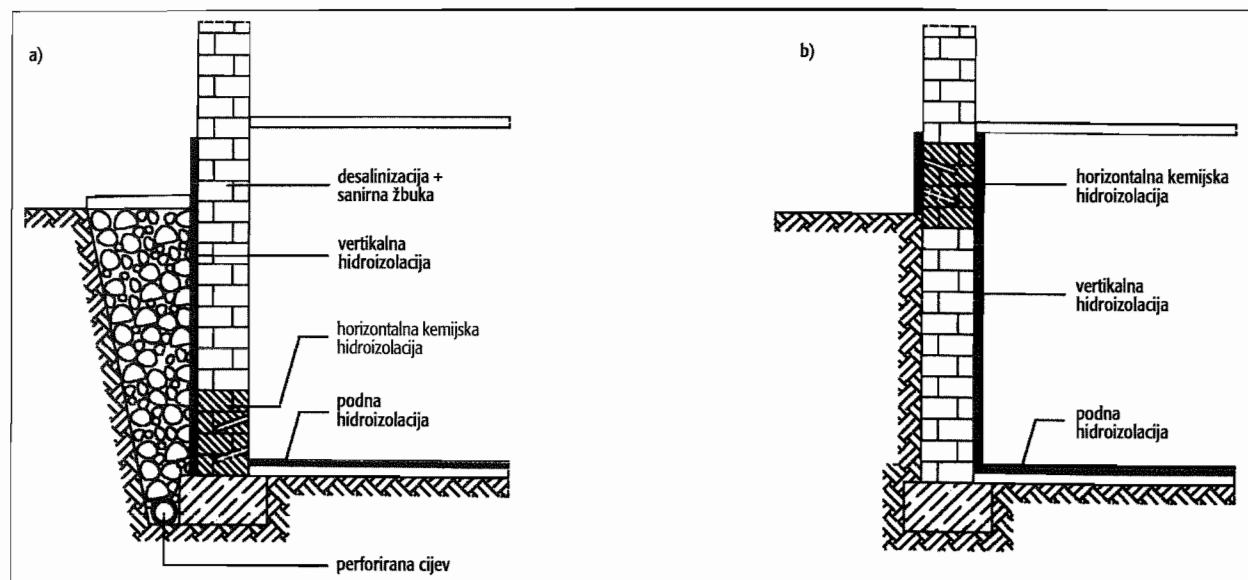
68 Vertikalna hidroizolacija bez odgovarajuće horizontalne: vlaga se još više uspinje (iz: W i h r, 1986)

Vertical hydro-insulation without the appropriate horizontal insulation: the moisture climbs still higher (from W i h r, 1986).



69 Unatoč izvedenoj vertikalnoj hidroizolaciji s bitumenom vlaga se pojavila zbog uporabe neispranoga morskog pijeska u žbuci (palača Sponza u Dubrovniku).

In spite of vertical hydro-insulation done with bitumen, the moisture appeared because of the use of unwashed sea salt in the plaster (Sponza Palace, Dubrovnik).



70 Dvije mogućnosti izvedbe hidroizolacije podruma: a) vertikalna izolacija s vanjske strane zahtijeva izvedbu horizontalne izolacije u razini poda, b) vertikalna izolacija s unutrašnje strane zahtijeva izvedbu horizontalne izolacije u razini vanjskoga tla. U oba slučaja nužno je izvesti podnu izolaciju, kao i izolaciju sokla.

Two ways of carrying out hydro-insulation of a cellar: a) vertical insulation from the outside requires the execution of horizontal insulation at floor level, b) vertical insulation on the inside requires the execution of horizontal insulation at the level of the ground outside. In both cases it is necessary to carry out insulation of the floor and the plinth.

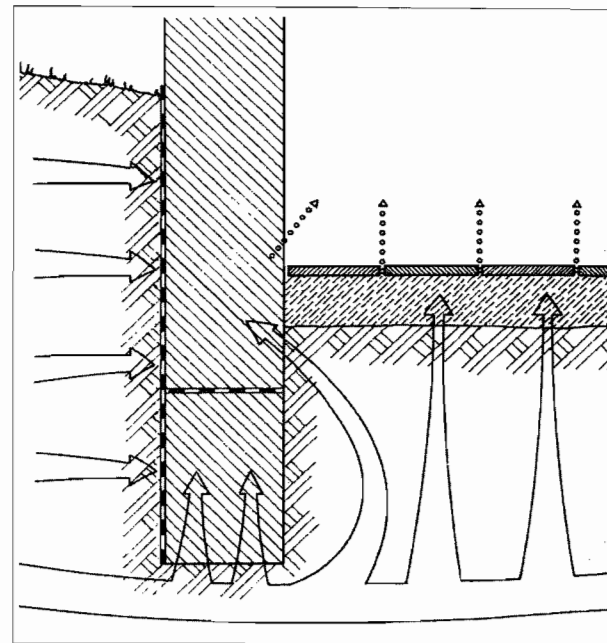
kon prosušivanja betona na ploču se stavlja višestruki bitumenski premaz sa slojevima krovne ljepenke. Osim ovog, klasičnog načina izoliranja poda, danas postoje gotove bitumenske folije koje se termičkim putem nanose na podlogu, kao i raznovrsni anorganski premazi. Na ovako hidroizoliranom podu izvodi se glazura na koju se polažu podne ploče, parket ili drugo prema potrebi. Kod ovih zahvata treba razmisliti o eventualnoj potrebi za dodatnom toplinskom izolacijom poda koja se polaže na sloj hidroizolacije prije nanošenja glazure. Ovakva toplinska izolacija spriječit će kondenzaciju na podu u za to povoljnim kriptoklimatskim uvjetima. Usto će smanjiti toplinske gubitke pri grijanju prostorija u zimskom periodu i općenito učiniti boravak u prostoriji ugodnijim. Uz prethodno izlaganje, potrebno je napomenuti da betonski pod bez prave hidroizolacije propušta vlagu i dopušta isparavanje u prostor. Korisnici objekata često griješe tako da izvedu toplinsku izolaciju na betonu koji nije hidroizoliran, i to tako da na pod polože drvene gredice između kojih stave mineralnu (ili staklenu) vunu, to prekriju brodskim podom, a preko svega polože linoleum, gumeni pod ili neki drugi plastični paronepropusni materijal. Isparavanje iz betonskog poda zaustavlja se na takvoj parnoj brani i tu se kondenzira. Truljenje drvene konstrukcije i brodskog poda tada je neizbježno, pa je takav zahvat kratkog vijeka i stoga skup. Mnogo više isplati se kompletan zahvat s hidroizolacijom poda.

Na sl. 72. prikazano je jedno od mogućih rješenja vlage poda u crkvi (Wihr, 1986). Stare podne ploče podignu se s poda i iskopa se zemlja do podnožja temelja. Tu se polože drenažne cijevi s odvodnjom izvan objekta. Iskopani se dio zatrpa krupnim šljunkom. Povrh njega izvede se ploča od mršavog betona na koji se polože stare desalinizirane podne ploče ili njihova nova, adekvatna zamjena.

3.1.1.7. Elektrofizikalne metode

Pod elektrofizikalnim metodama razumijevaju se razni elektroosmotski postupci za snižavanje razine kapilarne vlage u zidu. Poznato je da se prigodom kapilarnog uzlaza vlage stvara negativan električni potencijal između mjesta najvišeg uspona vlage u zidu i tla. Znamo da je električno polje usmjereno od pozitivnog prema negativnom potencijalu. To znači da je smjer električnog polja u vlažnom zidu prirodno usmjereno prema gore. Elektroosmotsko sprječavanje kapilarne elevacije bazira se na principu obrtanja električnog polja. To se postiže ugradnjom pozitivne elektrode (anode) u zid u visini maksimalnog kapilarnog uzdizanja, a negativna elektroda (katoda) ukopava se u tlo pokraj zida. Elektrode se spoje na izvor istosmjerne struje niskog napona, čime se postiže usmjerenje električnog polja od zida prema tlu. Ovakvo orijentirano polje stvara obrnuti smjer kapilarnoga transporta vode.

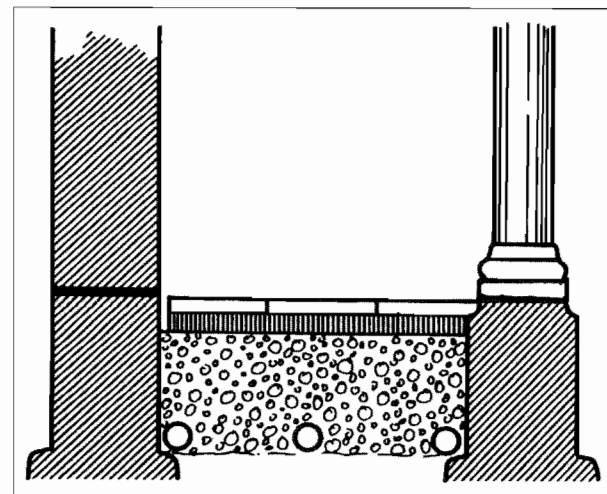
U razvoju elektroosmotskog sustava sprječavanja vlage mijenjali su se oblici i materijali za izradu ano-



71 Bez izvedene podne hidroizolacije zemna će vlaga dospjeti u zid i isparavati u prostoriju iako je izvedena vertikalna i horizontalna izolacija (iz: Arendt, 1994).

If floor insulation is not carried out, ground moisture will get into the wall and evaporate into the room although vertical and horizontal isolation has been carried out (from Arendt, 1994).

da jer je u eksploataciji ubrzo dolazilo do njihove korozije. Primjenjivane su u seriju spojene štapne anode, zatim anode mrežastog oblika, dok su najnovije u obliku horizontalnog kabela. Što se tiče izbora materijala, u samom je početku bilo upotrebljavano obično željezo, zatim grafitne elektrode, pa nehrđajući čelik i elektrovodljiva plastika. U najnovije vrijeme anode se izrađuju od titanove legure s oblogom od elektrovodljive plastike. Katode



72 Primjer metode isušivanja poda u crkvi (iz: Wihr, 1986). Bolje rješenje bilo bi u kombiniranoj izvedbi podne hidro- i termoizolacije.

Example of a method of drying out a floor in a church (from Wihr, 1986). A better solution would be in the combined execution of floor hydro- and thermal insulation.

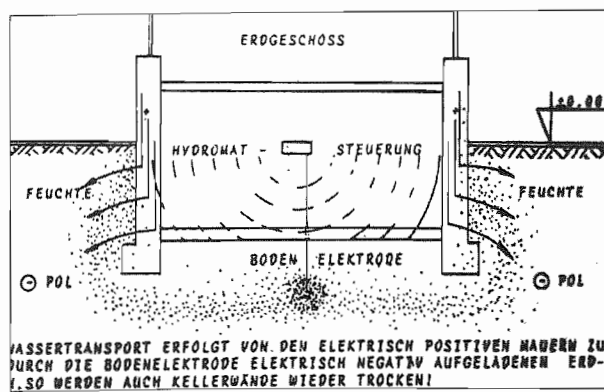
se proizvode od posrebrene bakrene žice u omočaju od elektrovodljive plastike.

U Hrvatskoj su se devedesetih godina pojavili na tržištu uređaji koji bi prema prospektom materijalu trebali djelovati kao *bežična elektroosmoza*. Prema tvrdnji proizvođača funkcioniraju na bazi iskorištavanja prirodnih elektromagnetskih zračenja i tako stvaraju obrnuto električno polje bez uporabe mrežnog napona i elektroda. Austrijski standardi (ÖNORM B 3355) priznaju elektroosmozu s anodom od titana, ali ne i ovakve bežične uređaje. Claus Arendt i Hubert Wiesen (1990) uređaje za bežičnu elektroosmozu nazivaju »čarobnim kutijama« i svrstavaju ih u grupu neprihvatljivih postupaka zajedno s Knapenovim keramičkim cijevima i zračnim kanalima za isušivanje zidova (sl. 73).

Koliki je općenito učinak elektroosmoze, bez obzira na vrstu elektroda, ostaje otvoreno pitanje. Nakon brojnih teoretskih izlaganja o uspješnosti elektroosmoze u sprječavanju kapilarnog uzlaza vlage i mogućnosti isušivanja zida pojavili su se i neki autori koji donekle poriču spomenutu teoriju.

Stambolov i van Asperen de Boer (1976) pišu da su matematički proračuni dokazali da su pore u opekama i pješčenjacima prevelike da bi elektroosmoza mogla dati zadovoljavajuće rezultate, osim u postupcima desalinizacije. Također citiraju Kurdenkova (1968) da »u većini slučajeva uporaba elektroosmoze za isušivanje nije efikasna..., zapravo mogla bi biti učinkovita pri uporabi napona iznad 100 volta«. Njemački stručnjak Wittmann (1983) tvrdi da elektroosmoza nije prikladna za isušivanje zidova jer zahtijeva struju viših napona. To isto tvrdi i talijanski stručnjak Torra (1988). Kaže da, ako se zna da je za isparivanje 1 litre vode potrebna energija reda veličine od 1 kWh, nije jasno kako struja niskog napona i male jakosti može u razumnom vremenu posušiti veliku masu vode. Daje primjer: zid debljine 60 cm, dugačak 4 m i visok 2 m (koji ima masu od 10 t), sa sadržajem vlage od 10% sadrži jednu tonu vode. Za smanjenje udjela vlage na 3% potrebno je 700 kWh energije. Uz preporučeni niski napon i malu amperazu za takvo isušivanje potrebno je potrošiti vrlo mnogo vremena. U drugu ruku, višu je voltažu zbog opasnosti od strujnog udara u praksi teško upotrijebiti.

Naponi od preko 100 V zaista mogu osušiti vlažne zidove kroz nekoliko mjeseci. Uz povećane sigurnosne mjere moguće je na taj način provesti jednokratno isušivanje. Primjer uspješnog isušivanja zidova s istosmjernom strujom napona od oko 300 V



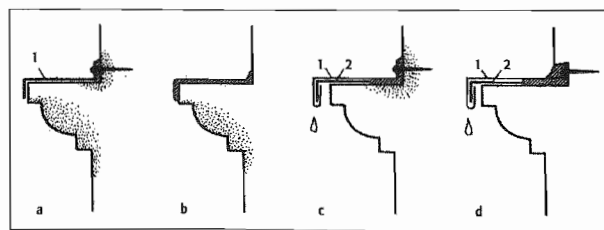
73 Shematski crtež elektrofizikalnog postupka isušivanja zida s lažnim prikazom stanja (iz: Arendt i Wiesen, 1990)

Diagrammatic drawing of an electro-physical approach to drying a wall with a false presentation of the state of affairs (from Arendt and Wiesen, 1990).

provedenog krajem osamdesetih godina prošloga stoljeća jest crkva svete Katarine u Zagrebu. No zbog velike opasnosti od strujnog udara ovim se načinom ne može provoditi permanentno sprječavanje kapilarnog uzlaza vlage. Nakon takvog elektroosmoskog isušivanja mora slijediti neka druga metoda kojom će se onemogućiti daljnje kapilarno vlaženje zidova.

3.1.2. SANACIJA PRODORA KIŠE

Prodore kiše kroz oštećene crjepove, trulu šindru, korodirane žljebove, kroz prevelike zazoru na prozorima i vratima ili duž neispravno postavljenih okapnica (sl. 74), treba sanirati uobičajenim obrtničkim zahvatima uz redovito održavanje. Općenito, pojam održavanja zgrade u nas nije previše udomaćen. Podrazumijeva se kao normalno da, ako su u kući bili majstori i otklonili kvarove, nije potrebno voditi nikakvu skrb za zgradu. To međutim nije tako. Nužni su redovita kontrola i održavanje. Žljebove treba periodično čistiti od nanesenog lišća i ostalih taložina koje sprječavaju normalno otjecanje vode. Kod kamenih žljebova otklesavanjem treba riješiti problem zadržavanja vode zbog pogrešnog nagiba. Reške iz-



74 Okapnice: nepravilno (a, b, i c) i pravilno (d) izvedene (iz: Wibr, 1986)

Dripping edge: incorrectly (a, b and c) and correctly (d) done (from Wibr, 1986)

među kamenih elemenata žljebova potrebno je zabrtviti elastoplastičnim kitovima koji mogu podnijeti dilatacijska naprezanja.

Procurijevanje ravnih krovova na modernim kućama prilično je česta pojava unatoč uporabi suvremenih materijala za njihovo prekrivanje. U većini slučajeva materijali su kvalitetni, ali su napravljene pogreške u izvedbi. Te pogreške treba otkriti i obrtnički riješiti.

Kiša nošena vrlo jakim vjetrovom može prodrijeti i kroz kupole i bačvaste krovove prekrivene kamenim pločama unatoč tomu što se crjepasto preklapaju. To se događa zbog efekta usisa uzrokovanog negativnim tlakom u zgradi kao posljedicom jakog vjetrova. S tim su se problemom susreli konzervatori na katedrali sv. Jakova u Šibeniku, na mauzoleju Ivana Meštrovića u Otavicama¹⁵, mauzoleju obitelji Račić u Cavtatu i drugdje. Problem se nastojao riješiti zamjenom stare žbuke za brtvljenje reški između ploča s novom žbukom. Analizama su ustanovljene recepture starih originalnih žbuka i prema toj su recepturi izrađene i ugrađene nove. Pokušaji nisu uspjeli. Ponovljeni su pokušaji s hidrofobnim žbukama koji su također bili bezuspješni. Tada se shvatilo da žbuke kao kruto brtvilo ne mogu izdržati naprezanja koja nastaju dilatacijom. Dnevne i sezonske oscilacije temperature prevelike su da bi to žbuka mogla izdržati. Zagrijavanje kamenih ploča na ljetnome suncu uzrokuje njihovo širenje, pa te ploče tlače žbuku između njih. Žbuka se tada komprimira. Kad se ploče ohlade one se skupljaju, ali žbuka u reškama zbog svoje krutosti ostaje komprimirana. Tako zaostaju pukotine između žbuke i kamena. Time je put za vodu ponovno otvoren. Rješenje je toga problema u uporabi plastoelastičnih brtvila za reške između kamenih ploča. Od materijala tu se nude dvokomponentni polisulfidni kitovi, jednokomponentni silikonski kitovi i poliuretanska brtvila. Svi oni zahtijevaju prethodnu obradu reški odgovarajućim prajmerima (Malinar, 1992/3; Šarić, 1996).

Ako voda prodire u zid zbog pogrešnoga nagiba terase, balkona, prozorskih klupčica, vijenaca ili pločnika uz zgradu, potrebno je taj nagib izraditi tako da voda otječe od zida. Eventualne reške između zida i tih nagnutih ploha treba zabrtviti, a potom otkloniti posljedice curenja.

¹⁵ Navedena građevina poznata je u cjelokupnoj literaturi kao Meštrovićev mauzolej u Otavicama. Zapravo, ispravnije bi bilo: crkvića Presvetoga Otkupitelja u selu Ružići.

Zidovi koji su izloženi čestim kišama nošenima vjetrovom i kroz koje prodire vlaga u unutrašnjost, saniraju se ovisno o vrsti zida. Ako su zidani od kamena klesanca i ne smiju biti ožbukani, treba pravilno obraditi reške između kamena tako da kroz njih voda ne može više prodirati. Potom se cjelokupna površina obrađuje sredstvom za hidrofobiranje. S druge strane zida, u unutrašnjosti, treba sanirati higroskopnu vlagu desalinizacijom ili kemijskom pretvorbom štetnih soli u netopljive (v. poglavlje o sanaciji higroskopne vlage) i ožbukati unutrašnjost sanirnom žbukom. Ako je zid imao fasadnu žbuku koja je djelovanjem kiše propala, staru žbuku treba odstraniti, reške propisno očistiti, površinu zida dobro isprati vodom pod tlakom i nanijeti sanirnu hidrofobnu žbuku. I završna boja mora biti otporna na vlagu.

3.1.3. SANACIJA VLAGE OD CURENJA NEISPRAVNIH VODNIH INSTALACIJA

Kvarovi na instalacijama vodovoda, kanalizacije, centralnoga grijanja i dr. otklanjaju se rutinskim obrtničkim zahvatima, a posljedice, koje se uglavnom pojavljuju u obliku higroskopne vlage, rješavaju se postupcima za saniranje higroskopne vlage. Dobar nadzor nad izvedbom svih faza radova trebao bi spriječiti nastajanje novih šteta. Drastičan primjer loše izvedenih radova jest bivša sudnica u Kneževom dvoru u Dubrovniku. Prostorije bivše sudnice nalaze se u prizemlju dvora. Na katu iznad sudnice izvodili su se radovi na statičkoj sanaciji. U razini poda na katu bušene su rupe u koje su ugrađivana sidra za vezanje armiranobetonske ploče. Bušenje je izvedeno krunskim svrdlima uz vodenu isplaku. Pri tome nije bila osigurana odvodnja vode od isplake, pa je sva voda otjecala kroz pod i natapala križni svod sudnice i šutu u ispunama između poda na katu i svoda u prizemlju. Da stvar bude komplikiranija, svod je bio ukrašen vrijednim štukaturama, pa nije bilo moguće skinuti vodom natopljenu žbuku sa svoda radi lakšeg sušenja. Sušenje, iako je bilo potpomognuto kaloriferima, bilo je dugotrajno. To i ne začuđuje kad znamo da je za isparenje jedne litre vode potrebna energija od 1 kWh (Torraca, 1988). Usporedo sa sušenjem provedena je desalinizacija. Kada je postupak bio pri kraju, procurila je cijev iz sustava podnoga grijanja na katu, pa je došlo do ponovnog natapanja svoda. Opet su poduzeti sušenje i desalinizacija. I tu nije bio kraj nevoljama. Na posljetku je procurio hidrant na katu i opet obilno natopio svod. Komentar nije potreban!

3.1.4. SANACIJE OD VISOKE PLIME I POPLAVA

U našoj smo praksi imali takav slučaj s objektima koji su bili građeni u doba kada su podzemne vode bile niže nego što su danas, pa tada nisu ometale gradnju. To su građevine locirane uz more. Poznato je da naša obala Jadrana postupno tone i da je od antičkih vremena došlo do utonuća za 1-2 metra, a mjestimice zbog lokalne tektonike i više. Time se promijenio i odnos morske vode i vodnog lica slatke podzemne vode, koje se uz obalni pojas upravo toliko povisilo koliko je kopno utonulo. Ovakav oblik vlage jedan je od najtežih problema u pokušaju sanacije, koji se rješava od slučaja do slučaja prema danim okolnostima. Problem se teško može riješiti klasičnom drenažom, pa se prema mogućnostima preporučuje crpljenje podzemne vode električnim crpkama iz upojnih bunara, koji se postavljaju na najnižoj koti drenaže, te odvodnja u kanalizaciju, koja je redovito na višoj koti. Uključivanje i isključivanje crpke obavlja se automatski graničnim sklop-kama. Problem s tehničke strane nije teško rješiv, ali se dovodi u pitanje sigurnost funkcioniranja zbog ljudskog faktora pri održavanju uređaja u dugoročnom pogledu. Jedna od mogućnosti rješenja jest vertikalna dislokacija objekta na razinu koja je sigurna od poplavlivanja. U svijetu postoje specijalizirane tvrtke za takve zahvate. Također postoji mogućnost izvedbe injekcijske zavjese prema prodoru podzemne vode, ali to ne isključuje nužnost ugradnje automatske crpke za vodu.

3.2. SANACIJA HIGROSKOPNE VLAGE

U prethodnim smo poglavljima vidjeli da za eliminaciju vlage u zidu nije dovoljno samo odstraniti izvor vlaženja zida nego treba ukloniti i posljedice djelovanja vlage kroz dulje razdoblje. To su akumulirane topljive soli koje su dospjele pod površinu zida i na nju u zoni isparavanja vlage. Takve su soli higroskopne. Za vlažna vremena navlače vlagu iz zraka i ovlažuju zidove, iako je prvotni izvor vlaženja odstranjen. Postupak odstranjivanja soli zove se *odsoljavanje* ili *desalinizacija*. To je zahtjevan posao koji se temelji na dobro postavljenoj dijagnozi kojoj prethode vizualna motrenja i analize sastava i količina topljivih soli u zidu. Ovisno o vrstama soli, te o vrsti i sastavu zida, u praksi se uporabljaju razne metode za odsoljavanje. Pri tome je važno znati da prije njih treba odstraniti primarni izvor vlaže-

nja, odnosno uzročnika nakupljanja soli. Akumulirane soli možemo odstraniti iz zida ovako:

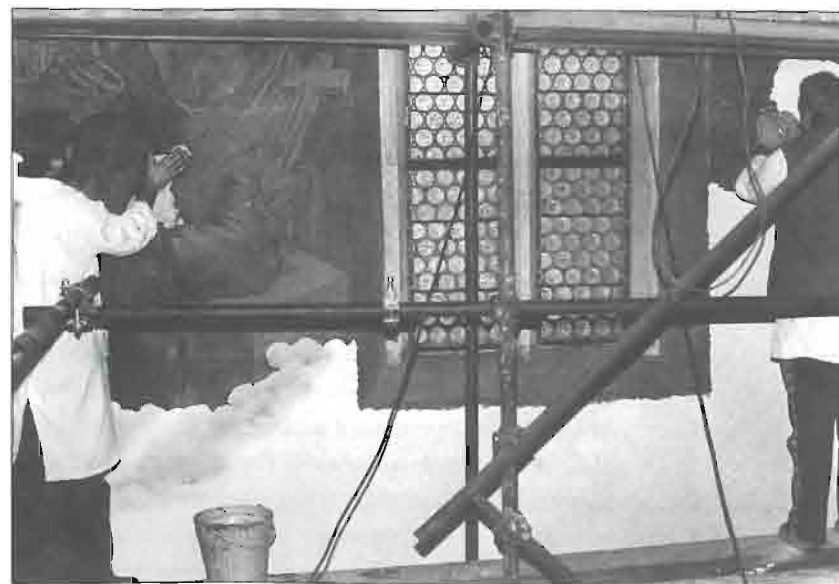
- četkanjem
- ispiranjem
- papirnatom /celuloznom/ pulpom
- žrtvovanom žbukom
- elektrokinetičkim metodama
- kemijskim metodama
- vakuumom.

U praksi se pokazalo da je racionalno kombiniranje dvaju ili čak više postupaka, ali će oni biti prikazani odvojeno.

3.2.1. SANACIJA HIGROSKOPNE VLAGE ČETKANJEM I ISPIRANJEM

Kada se soli nakupe u vidljivim količinama na površini zida, treba ih jednostavno očistiti. Pri tome ih se ne smije ostaviti na tlu, jer će dio njih opet postupno migrirati u zid.

Soli s vanjske strane zida mogu se ukloniti ispiranjem. Najprije se odstranjuje trošna zasoljena žbuka s donjeg dijela zida i očiste se reške. Poželjno je da se žbuka odstranjuje za suhoga vremena, jer će tada veliki dio soli biti na površini žbuke. Kad se iskopa drenažni kanal i polože perforirane cijevi, zid treba isprati vodom pod tlakom da bi se i tako odstranio znatan dio soli iz opeke ili kamena. Ako analize soli u građevnom materijalu nakon ispiranja pokažu da su soli još uvijek sadržane u štetnoj koncentraciji, preostale soli treba pretvoriti u neopipljive i neštetne produkte kemijskim putem. Preporučljivo je da se nakon desalinizacije i sušenja zid ožbuka sanirnom žbukom.



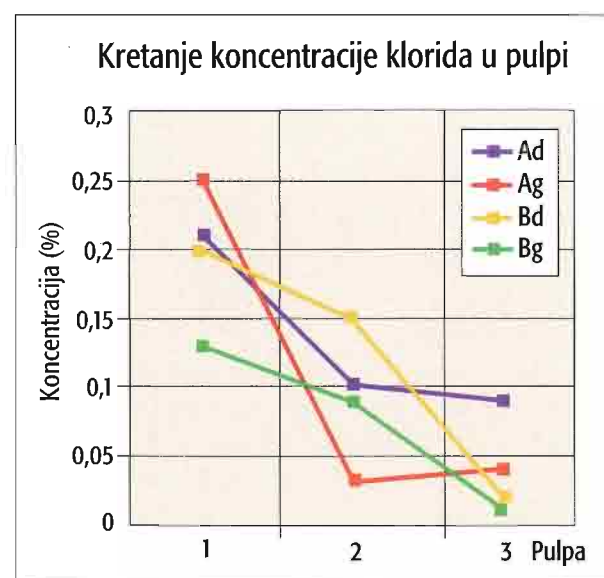
75 Skidanje papirne pulpe s freske u crkvi sv. Marka u Zagrebu
Taking paper pulp down from the fresco in the Church of St Mark, Zagreb.

3.2.2. SANACIJA HIGROSKOPNE VLAGE ŽRTVOVANOM ŽBUKOM

Soli iz zida mogu se odstraniti ili barem svesti na neštetnu količinu s pomoću žrtvovane žbuke. Ta se metoda primjenjuje na vanjskim zidovima i na unutarnjim ravnim neoslikanim zidovima. Sa zasoljenog zida obije se trošna žbuka, reške očiste i po mogućnosti zid se ispere vodom. Potom se na njega nanese lagana vapnena žbuka koja ni u kojem slučaju ne smije sadržavati cementno vezivo. John Ashurst i Francis G. Dimes (1990 b) preporučuju vapnenu žbuku koja se sastoji od jednog dijela gašenog vapna i četiri dijela finoga pijeska. Nanosi se u debljini oko 12 mm. Ne treba je zagladiti zidarskom žlicom, tako da njezina tekstura ostane otvorena radi lakšeg isparavanja i prolaska soli na površinu. Tu žbuku treba ostaviti na zidu do prvih znakova propadanja. Žbuka se odstranjuje sa zida u suhom periodu jer je tada u njoj najveća koncentracija soli iz zida. Pri odstranjivanju žrtvovane žbuke napravi se analiza preostalih soli u zidu i u skinutoj žbuci. Ako je potrebno, opet se nanosi žrtvovana žbuka. Postupak se ponavlja sve dok se ne postigne neštetna koncentracija soli u zidu. Jedan nanos žrtvovane žbuke na zidu može trajati od jedne do nekoliko godina.

3.2.3. SANACIJA HIGROSKOPNE VLAGE PAPIRNATOM PULPOM

Zasoljena žbuka unutarnjih zidova na kojoj se nalaze zidne slike ili štukature ne smije se odstraniti pa treba pristupiti eliminaciji soli na drugi način. To isto vrijedi i za zid od fino obrađenog kamena. S takvog se zida soli mogu ekstrahirati papirnatom



76 Dijagramski prikaz učinkovitosti desalinizacije freske u zvoniku crkve sv. Marije u Zadru s pomoću celulozne pulpe. Kratice Ad-Bg označuju položaje uzimanja uzoraka za kemijske analize.

Diagrammatic presentation of the effectiveness of the desalination of the fresco in the bell tower of the Church of St Mary in Zadar using cellulose pulp. The abbreviations Ad-Bg mark the sites at which samples for chemical analysis were taken.

pulpom. Na kontaminiranu površinu zida nanosi se kaša od papira razmuljenog u deioniziranoj vodi (sl. 75).

Ako na zidu ima plijesni, pulpu treba dezinficirati odgovarajućim biocidnim sredstvom. Danas se kod specijaliziranih dobavljača može nabaviti čista celuloza koju treba prije aplikacije samo natopiti u deioniziranoj vodi i nanositi na zid, čime je izbjegnuto mukotrpno usitnjavanje papira. Voda iz pulpe kapilarno prodire u zid i otapa štetne soli. Nakon nekoga vremena pulpa se počinje sušiti, što znači da će vlaga sa solima migrirati prema površini pulpe. Kada se pulpa potpuno posuši, što obično traje nekoliko tjedana, treba je ukloniti i zamijeniti novom. U uzorku odstranjene pulpe treba kvantitativno odrediti sadržaj soli. Postupak se ponavlja sve dok koncentracija soli u pulpi ne padne na minimum. Broj aplikacija pulpe ovisi o vrsti i koncentracijama soli. Katkad je dovoljno izvesti dvije ili tri izmjene pulpe, a u težim slučajevima i više. Radi kontrole učinkovitosti desalinizacije preporučuje se da se uz analizu soli u pulpi (sl. 76) napravi i kvantitativna analiza soli u žbuci prije i nakon desalinizacije. Praćenje koncentracije soli u pulpi može se izvesti i mjerenjem električne vodljivosti vodenog ekstrakta izvaganog uzorka pulpe. Tako se dobivaju samo relativni pokazatelji, a ne koncentracija, ali je postu-

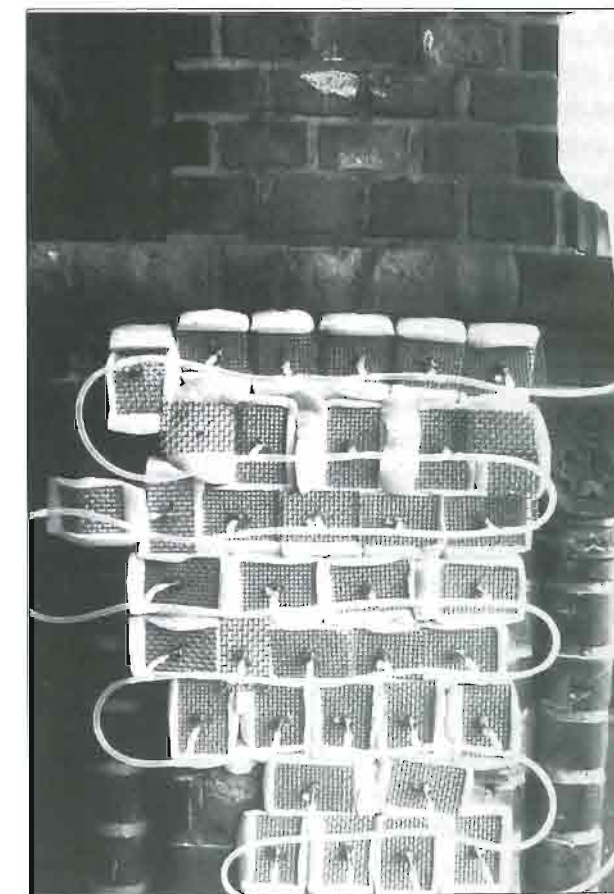
pak brz i kontrola se može provesti na samom objektu. Mjerni podaci prikazuju se dijagramski.

Sličnu metodu odstranjivanja soli iz zida spominju Paolo i Laura Mora i Paul Philippot (1977), ali umjesto papira ili celuloze preporučuju smjesu kaolina i kamenog praha s malim dodatkom polivinilnog alkohola i biocidnoga sredstva u vodi. Ovakav je postupak u nas primjenjen za desalinizaciju svoda u bivšoj sudnici u Kneževom dvoru u Dubrovniku, ali se nije pokazao racionalnim. Prema našem iskustvu, brži, učinkovitiji i jednostavniji jest postupak s papirnatom, odnosno celuloznom pulpom.

Srodan opisanim metodama jest postupak odsoljavanja zida od opeke injekcijama destilirane vode i kompresama (sl. 77).

3.2.4. SANACIJA HIGROSKOPNE VLAGE APSORPCIJSKIM GLINAMA I SRODNIM MATERIJALIMA

Princip desalinizacije sličan je kao i s pomoću papirne pulpe, ali je apsorpcijska moć veća, pa se tim postupkom, osim odstranjivanja soli, mogu u



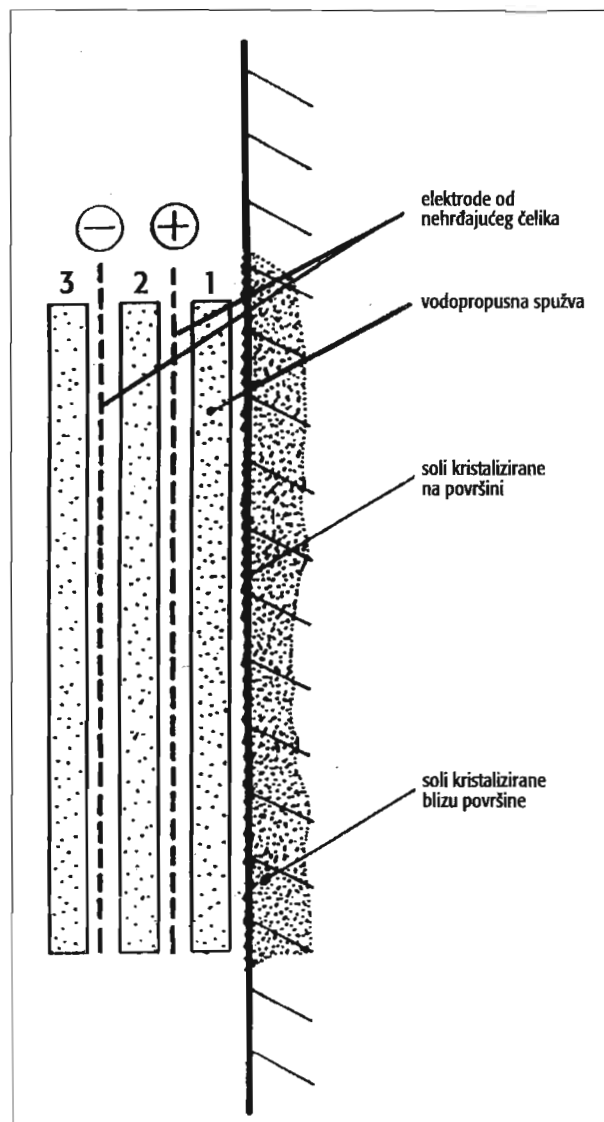
77 Odsoljavanje zida od opeke injekcijama destilirane vode i kompresama (iz: Friese i Hermoneit, 1996)
Desalting a brick wall with injections of distilled water and compresses (from Friese and Hermoneit, 1996).

velikoj mjeri ukloniti i nataložene nečistoće i tamne inkrustacije s kamenih zidova. Ashurst i Dimes (1990 b) preporučuju prethodno vlaženje zida vodom u obliku maglice s pomoću raspršivača, u trajanju od tri dana i tri noći. Time se aktiviraju i teže topljive štetne soli, a uvelike se omekšaju i tamne inkrustacije na površini kamena. Pri tome treba organizirati dobru odvodnju vode. Ako se postupak izvodi u zatvorenu prostor, pod treba prekriti debelom plastičnom folijom čiji su krajevi zabrtvljeni uz podnožje zida. I ovdje treba također osigurati odvodnju. Kada je proces vlaženja završen, zid se oblaže masom od apsorpcijske gline ili dijatomejske zemlje. Obično se upotrebljava smjesa *atapulgita* i *sepiolita* koja se namoči s vodovodnom vodom tako da se dobije meka i ljepljiva masa. Miješanje se može izvesti električnom miješalicom. Smjesa se na zid nanosi zidarskim alatom u debljini 2 do 2,5 centimetara. Pedeset kilograma suhe gline dovoljno je za oko 3 četvorna metra zida. Sušenjem gline ona se skuplja, pa postoji opasnost da se oljušti prije nego se postigne zadovoljavajući učinak apsorpcije soli. Da bi se to spriječilo može se u glinenu oblogu utisnuti pocinčana ili plastična mreža. Mreža se pričvrsti na zid s pomoću prethodno postavljenih galvaniziranih kuka umetnutih u fuge kamena ili u tiple. Ako je obloga izložena Sunčevim zrakama ili kiši, treba je zaštititi tendom. Sušenje, ovisno o uvjetima, može trajati od nekoliko dana do nekoliko tjedana. Dulje sušenje nije potrebno. Uklanjanje obloge je jednostavno ako je umetnuta mreža. Sav otpadni materijal treba staviti u plastične vreće i odvesti s radilišta. Ostatke gline treba očerkati i pomesti tlo kako se ne bi ponovno kontaminiralo solima. Postupak se može nekoliko puta ponoviti do zadovoljavajuće, neštetne razine soli u zidu. Proces desalinizacije treba kontrolirati kvantitativnim kemijskim analizama soli u zidu i u glini.

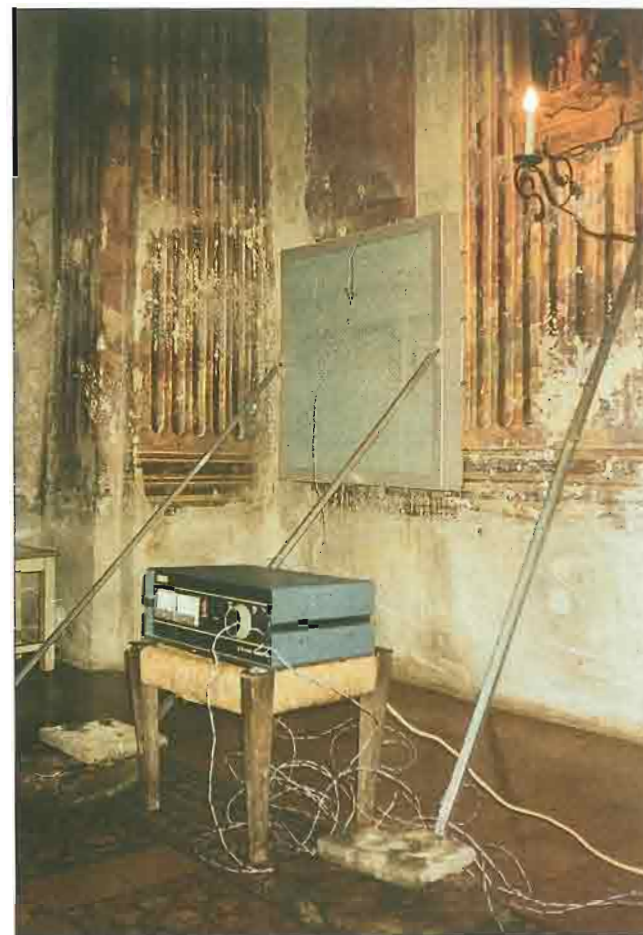
3.2.5. SANACIJA HIGROSKOPNE VLAGE ELEKTROKINETIČKIM METODAMA

U nastojanju da se pronađu što djelotvorniji načini desalinizacije zida razrađene su i neke *elektrokinetičke metode*. Tako su Kostrov i Nogid (1965) konstruirali jednostavan uređaj za uklanjanje topljivih soli iz freske elektrokinetičkom metodom, a sam su postupak nazvali elektrodijalizom. Poslije je Dinu Moraru (1978) konstruirao vrlo sličan uređaj, ali većega kapaciteta koji je nazvao »elektrosendvičem«. Sastoji se od triju slojeva porozne sintetičke spužve između kojih su ubačene mrežaste elektrode od nehrđajućeg čelika. Takav »sendvič«

natopi se destiliranom vodom i prisloni na površinu zida koju treba odsoliti. Krajevi mrežastih elektroda spoje se na izvor istosmjerne električne struje niskog napona, i to tako da je elektroda bliža zidu spojena na (+), a ona dalja na (-) pol. Destilirana voda iz spužve otapa soli, a elektrokinetički efekt uzrokuje gibanje otopine prema vanjskoj spužvi (sl. 78). Kontrola je procesa jednostavna i svodi se na mjerenje pH vrijednosti na anodi i katodi s pomoću univerzalnoga pH indikatorskog papira. Postupak se ponavlja do postizavanja neutralne vrijednosti na indikatoru. Prigodom ponavljanja postupka spužve treba dobro isprati od soli i namočiti ih destiliranom vodom. Ovakav je uređaj konstruiran u Hrvatskom restauratorskom zavodu i prvi je put upotrijebljen za odsoljavanje Rangerovih zidnih slika u baroknoj crkvi sv. Marije Snježne u Belcu (sl. 79). Rezultati su bili zadovoljavajući. Kontrola pro-



78 Shema »elektrosendviča« (prema: Dinu Moraru, 1978)
Electrical sandwich diagram (according to Dinu Moraru, 1978)



79 Desalinizacija Rangerovih fresaka u crkvi sv. Marije Snježne u Belcu

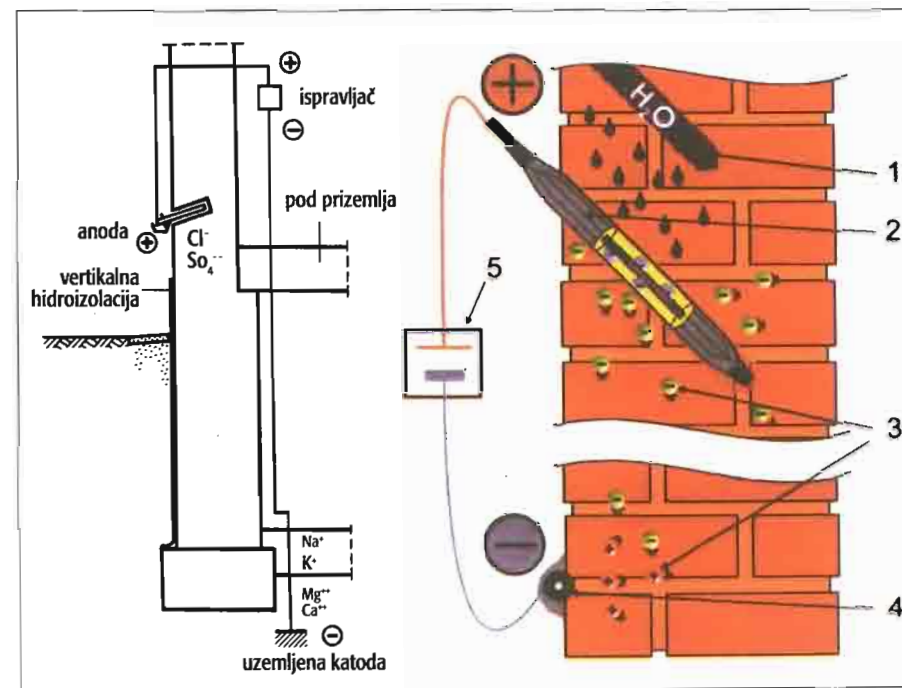
Desalination of the Ranger frescos in the Church of St Mary of the Snow, Belcu

cesa provođena je kemijskim analizama, pH-indikatorom i mjerenjima električne vodljivosti vodenog ekstrakta.

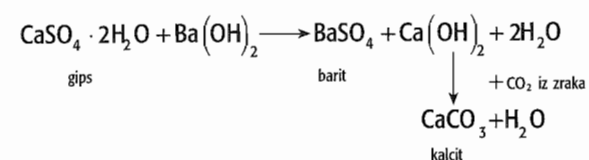
Sličan prethodnom jest AET elektrokinetički postupak desalinizacije (Venzmer et al., 1991). U zasoljeni dio zida ugradi se niz posebno izrađenih anoda a jedinstvena se katoda ugrađuje u tlo. Sustav se stavlja pod napon od 60 V istosmjerne struje. Na anodu putuju anioni topljivih soli (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , CO_3^{2-} , HCO_3^-), a prema katodi kationi (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Anioni se na anodi pretvaraju u odgovarajuće kiseline i potom s određenim reagensima u netopljive produkte ili se u tekućem obliku cijede u posebnu posudu kako ne bi kontaminirali zid. Kationi se kod katode zaustavljaju i prelaze u hidrokside i konačno u karbonate. Ovom se metodom postižu dva učinka: desalinizacija i isušivanje zida (sl. 80).

3.2.6. SANACIJA HIGROSKOPNE VLAGE KEMIJSKIM PUTEVIM

Neke se topljive soli mogu *kemijskim putem* pretvoriti u praktički netopljive soli ili u teže topljive komplekse. Ovaj je postupak poželjno primjenjivati za odstranjivanje preostalih, rezidualnih soli nakon odstranjivanja glavnine nekim od prije navedenih postupaka. Kemijskim se putem uspješno mogu tretirati sulfati i kloridi. Najstariji kemijski postupak jest pretvorba štetnoga kalcijeva sulfata – gipsa u netopljivu sol. On datira iz druge polovice 19. stoljeća. Ta je metoda racionalizirana potkraj šezdesetih godina 20. stoljeća (Lewin, 1970; Lewin i Baer, 1974). Štetni gips pretvara se u praktički netopljivi *barit* prema reakciji:

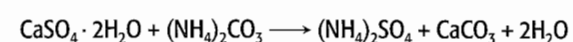


80 Dvije inačice AET-elektrokinetičkoga postupka odsoljavanja zida
Two versions of the AET electrokinetic procedure for desalinating walls.



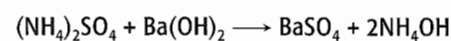
Inusproizvod reakcije, kalcit, netopljiv je, pa se, osim saniranja higroskopnosti, postiže i konsolidirajući efekt. Radi ubrzanja procesa pretvorbe kalcijeva hidroksida u kalcijev karbonat Lewin je u recepturu dodao i ureju koja se razgrađuje u amonijak i ugljikov dioksid. Taj CO₂ sada brže pretvara vapno u kalcit, a amonijak isparava i izlazi iz procesa.

Za pretvorbu gipsa u barit na zidu oslikanom freskama preporučuje se obrada u dva koraka (Mora i Philippot, 1977; Matteini, 1987). Na fresku se najprije učvrsti japanski papir a potom se radi čišćenja freske nanese sloj komprese od celuloze namočene u otopinu amonijeva karbonata. Pri tome dolazi do reakcije gipsa s amonijevim karbonatom:

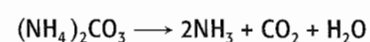


Nastaje amonijev sulfat i netopljivi kalcijev karbonat. Kompresa se upotrebljuje da bi se osigurala dovoljna količina kemikalije za reakciju na površini freske i da se spriječi isparavanje vode. Također služi i za odsoljavanje nastalog (NH₄)₂SO₄, koji kao vrlo topljiva tvar prigodom sušenja migrira s vodom na površinu komprese.

Sigurniji postupak odstranjivanja (NH₄)₂SO₄ jest nanošenje drugog sloja komprese namočenog u otopinu barijeva hidroksida. Nastali amonijev sulfat reagira s barijevim hidroksidom pa nastaje netopljivi i neštetni barijev sulfat:

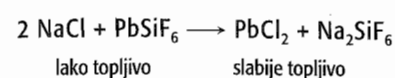


Pri tome amonijak isparava, a eventualni višak amonijevog karbonata iz prve reakcije razgrađuje se u amonijak i CO₂:

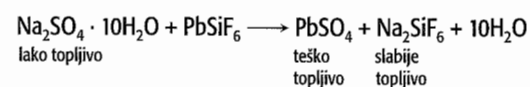


Tako u strukturi zida ostaju samo netopljivi gips i kalcit.

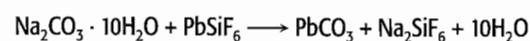
Kloridi iz zida mogu se kemijskim postupkom pretvoriti u teže topljive spojeve djelovanjem olovnog silikofluorida (olovnog heksafluorosilikata), PbSiF₆ (Stambolov i van Asperen de Boer, 1976; Whir, 1986):



Ovim se sredstvom također mogu uspješno pretvoriti topljivi alkalijski sulfati (ne samo gips!) u slabije topljive spojeve. Pri radu treba nositi zaštitnu opremu za oči i ruke.



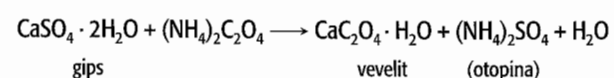
Na isti se način vrlo topljivi alkalijski karbonati mogu pretvoriti u teško topljive i slabije topljive produkte:



Iako Na₂SiF₆ nije netopljiv, njegova je topljivost manja od topljivosti natrijeva klorida, sulfata ili karbonata, pa je time manje štetan. Prema literaturi (Meir, 1983), natrijev silikofluorid stvara teže topljive nusprodukte. Druga je pogodnost to što ne sadrži kristalnu vodu koju imaju alkalijski sulfati i karbonati.

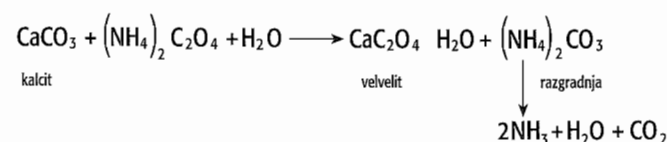
Nitrati se, nažalost, ovim postupkom ne mogu pretvoriti u teže topljive spojeve, pa njih treba ekstrahirati jednim od postupaka desalinizacije.

Obojene ili oslikane površine žbuke ili kamena, koje su kontaminirane gipsom, nije uputno tretirati lužnatim ili kiselim sredstvima, jer na njima može nastati promjena nijanse pigmenta ili razgradnja veziva slikanoga sloja. Takve plohe treba obraditi otopinom amonijeva oksalata (Matteini, Moles i Giovannoni, 1996). Otopina amonijeva oksalata, (NH₄)₂C₂O₄, nanosi se na oslikanu površinu s pomoću kompresa. Pritom se štetni gips, CaSO₄ · 2H₂O pretvara u stabilni mineral vevelit, CaC₂O₄ · H₂O, prema kemijskoj reakciji:



Nusprodukt ove kemijske reakcije jest (NH₄)₂SO₄ koji sušenjem obrađivane površine odlazi prema kompresama i na taj se način, kao moguća štetna tvar, odstranjuje iz zida.

Višak amonijeva oksalata reagira s kalcitom i pretvara ga u otporniji kalcijev oksalat monohidrat, odnosno mineral vevelit:



Budući da je topljivost vevelita u vodi oko 63 puta manja od kalcita, a čak oko 227 puta manja od

gipsa, tako obrađena površina postaje znatno otpornija na buduća izlaganja štetnim agensima.

3.2.7. SANIRANJE HIGROSKOPNE VLAGE SANIRNIM ŽBUKAMA

Uklanjanjem primarnog izvora vlaženja zida i saniranjem higroskopne vlage još nije sve u potpunosti riješeno u ukupnoj sanaciji vlage. Ekstrakcija topljivih soli kao uzročnika higroskopne vlage, ili njihova kemijska pretvorba u netopljive spojeve, u praksi se teško može u razumnom vremenu postići sa stopostotnim učinkom. U velikoj masi zidova uvijek će biti zaostalih, rezidualnih soli, koje s vremenom mogu nanijeti određene štete. Iako te štete više ne mogu biti toliko drastične kao prije desalinizacije, treba i njih svesti na najmanju moguću mjeru. To se postiže žbukanjem zida *sanirnim žbukama*. To su žbuke čija su svojstva: vlagonepropusnost, paropropusnost i veliki porni prostor. Prve su dvije značajke vjerojatno svakom jasne. Svojstvo vlagonepropusnosti neće propuštati likvidnu vlagu izvana u unutrašnjost žbuke. Paropropusnost žbuke je poželjna jer omogućuje da se vlaga sadržana u zidu otpušta u obliku vodene pare. Treća značajka, relativno veliki porni prostor, važna je upravo zbog rezidualnih soli. U dugotrajnom procesu prirodnog sušenja zida nakon eliminacije primarnog izvora vlaženja i odsoljavanja zaostale će soli polako migrirati iz dubljih dijelova zida prema površini. Ako žbuka ima veliki porni prostor (a sanirna ga žbuka treba imati) te će se soli zadržavati u pornom prostoru koji je dovoljno velik da se kristalizacijski i hidratacijski tlakovi neće prenositi na stijenske pora. Ako je sanacija higroskopne vlage bila dobro izvedena, proces će se sam po sebi zaustaviti jer zid nema neiscrpano mnogo soli. Ovako obrađeni zid ne smije se ličiti disperzivnim, nego mineralnim bojama.

Ako nije bilo moguće dovoljno dobro provesti sanaciju higroskopne vlage, sanirna će žbuka ipak mnogo dulje izdržati od obične žbuke bez navedenih svojstava. U krajnjem slučaju, i kada nije izveden nikakav sanacijski zahvat na uklanjanju primarne i higroskopne vlage, sanacijska će žbuka trajati dulje od običnih žbuka. Svakako je najlošija mogućnost da se zid ožbuka jakim cementnom ili produženom žbukom. Takve će žbuke, sigurno, mnogo brže propasti nego klasična vapnena žbuka. Treba ipak imati na umu da sanirne žbuke nisu svemu moguće kako bi to često htjeli prikazati njihovi proizvođači. One ne otklanjaju uzrok vlaženja niti isušu-

ju zid, ali su preporučljive zbog navedenih razloga. Postoji određena manjkavost kod nekih sanirnih žbuka. U sastavu je njihovih veziva osim vapna i portland-cement koji sadrži štetne alkalijske karbonate. Proizvođači bi trebali za vezivo rabiti vrste cementa s minimalnim količinama kontraindicirajućih tvari, pa to korisnici od njih trebaju zahtijevati.

3.2.8. SANACIJA HIGROSKOPNE VLAGE KLIMATIZACIJOM

Za higroskopnu vlagu najvažniji je čimbenik svojstvo higroskopnosti nekog materijala. Dakle, koliko će neki materijal sadržavati vlage, ovisi o njegovu svojstvu higroskopnosti, ali i o trenutačnoj relativnoj vlazi zraka.

Kako promjena relativne vlage zraka uzrokuje kod higroskopnih materijala i njihove dimenzionalne promjene, iskustvo nas uči da ekstremne vrijednosti relativne vlage mogu prouzročiti štete na materijalima. Stoga su opet na temelju iskustva utvrđeni *optimalni rasponi relativne vlage* za pojedine materijale od kojih su napravljeni predmeti koji imaju spomeničku važnost, a smješteni u zgradama. Tu se poglavito misli na muzeje, galerije i sakralne objekte, ali i na stambene objekte u kojima se nalaze takvi predmeti. U »Tehničkom priručniku za zaštitu kulturnih dobara od ratnih razaranja, elementarnih nepogoda i krađa«, koji je godine 1980. izdao Republički zavod za zaštitu spomenika kulture u Zagrebu, prikazane su granične vrijednosti relativne vlage zraka za razne materijale kod normalne temperature. Pri tome treba napomenuti da su za dimenzionalne promjene higroskopnih tvari odgovornije oscilacije relativne vlage zraka nego oscilacije temperature. Ovdje ćemo radi ilustracije dati samo neke primjere.

Za drvene kipove i keramiku, te za metalne predmete kao što su oružje i kovani novci, preporučuje se raspon relativne vlage zraka od 40 do 63 %. Nešto uži raspon, od 45 do 63% preporučeno je za kamene predmete, knjige i tkaninu. Vлага od 50 do 63% preporučuje se za zoološke zbirke, bjelokost i fotomaterijal. Za intarzije se preporučuje relativna vlaga od 55 do 63 %, a za slike na dasci i platnu predviđen je najmanji preporučljivi raspon od 55 do 60 %. U muzejskim i galerijskim prostorima to se može i mora postići dobro projektiranim i jednako dobro izvedenim klimatizacijskim uređajima. Nažalost, ti su uređaji vrlo skupi i glomazni, pa ih nije moguće svagdje instalirati.

Veći je problem u crkvama s vrijednim drvenim oltarima i slikama na drvu i platnu. Za mnoge je materijale visoka relativna vlaga pogubna, bilo zbog bubrenja bilo zbog pojave plijesni. Zbog toga se preporučuje uvođenje zaštitnog grijanja prostora, ali ne i komfornog. Tako neki autori preporučuju zimsko održavanje temperature s pomoću termostata na približno 12°C. Time bi se visoka relativna vlaga zraka većim dijelom vremena snizila na optimalnu razinu.

Previsoka relativna vlaga zraka može se na željenu razinu sniziti i *sušačima zraka* ili *dehumidifikatorima*. Na tržištu postoje relativno mali pokretni sušači zraka koji se sastoje od ventilatora, kondenzatora i higrostata. Ventilator usisava zrak i tjera ga kroz rashladna rebra kondenzatora. Na rashladnim rebrima nastaje kondenzacija i kondenzirana se voda cijedi u podmetnutu posudu. Budući da je iz zraka odstranjivana vodena para, smanjena je apsolutna vlaga. Time je ujedno i snižena relativna vlaga, pa je izlazeći zrak suši. Higrostatom se regulira razina željene relativne vlage u prostoru i kada se to postigne, uređaj se s pomoću higrostata automatski isključuje.

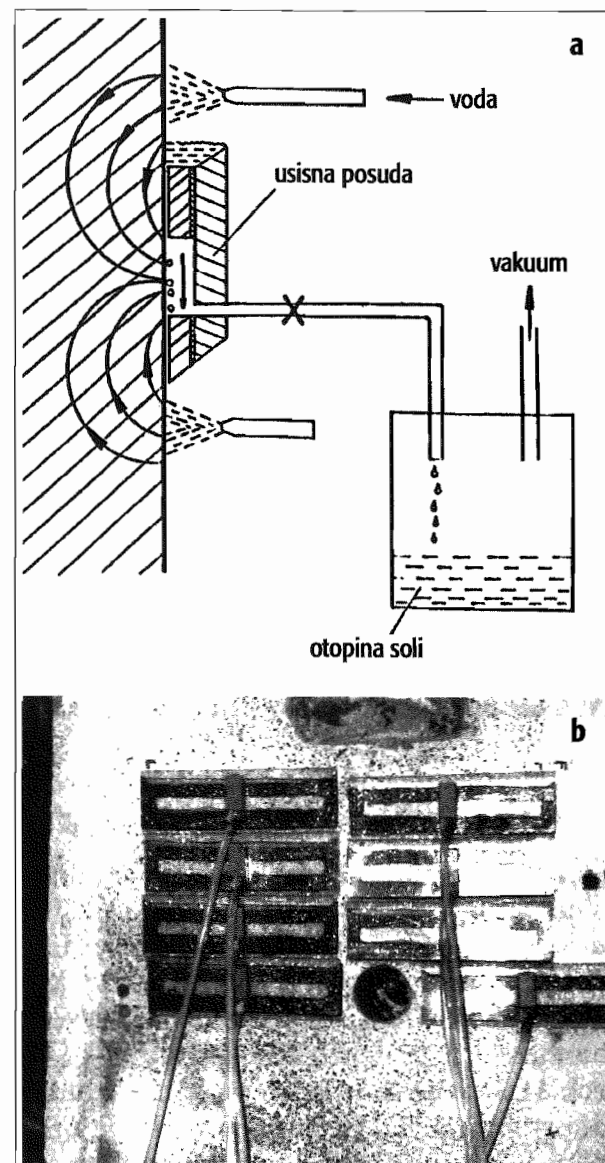
Iz pregleda preporučenih raspona relativne vlage vidi se da ni presuhi zrak nije poželjan za sve navedene materijale. Vrlo suhi zrak može nastati u prostoru s centralnim grijanjem. Zimsko anticiklonalno vrijeme također snižava vlagu zraka. Relativna vlaga zraka može se povisiti s pomoću *ovlaživača zraka* ili *humidifikatora* upuhivanjem vodene pare u prostor ili upuhivanjem snopa vrlo sitnih kapljica u obliku maglice.

Zrak niske relativne vlage izrazito je štetan prigodom arheoloških iskopavanja zidova s freskama ili drvenih predmeta iz vlažne zemlje. Mehanizmi destrukcije tih su dvaju materijala, doduše, različiti, ali su jednako štetni. Pri sušenju staroga vlažnog drva dolazi do drastičnih dimenzionalnih promjena. Gubitkom vode u ćelijama celuloze i lignina, glavnih sastojaka drva, dolazi do kontrakcije pa nastaju radijalne, koncentrične i poprečne pukotine. Ako se ne poduzme odgovarajući konzervatorski zahvat, kod starog drva proces ide do totalnog raspadanja, tj. drvo se pretvara u sitno trunje.

U slučaju vlažnog zida stvar je nešto drukčija. Razmotrimo primjer zida s freskom koji je dugo vremena bio zatrpan u vlažnoj zemlji. U stabilnim uvjetima zid je bio zapravo konzerviran. Iskopavanjem je postao izložen procesu isušivanja. Vлага iz zida

polagano isparava, a topljive soli iz tla ili inicijalne soli počinju se u zoni isparavanja akumulirati i djelovati razorno na njegovu strukturu. Da bi se to spriječilo, treba poduzeti zaštitne mjere. Prije nego što se postignu uvjeti za njegovu desalinizaciju i konsolidaciju, zid nakon rada treba prekriti plastičnim folijama, što će usporiti štetno isušivanje. Nakon završetka iskopavanja treba procijeniti mogućnosti njegove trajne zaštite. Ako postoje mogućnosti za izvedbu prekida zemne vlage, kao i drugih izvora vlaženja, ti se zahvati poduzimaju, a na temelju analiza poduzmu se i zahvati na odstranjivanju štetnih topljivih soli prema prije opisanim postupcima.

Ako je situacija s iskopanim zidovima toliko složena da praktički nije moguće izvesti zahvate na presijecanju kapilarne zemne vlage, a prostor je nat-



81 a) Odsoljavanje vakuumiranjem; b) Shematski prikaz rada uređaja

a) Desalinating with vacuuming; b) Diagrammatic presentation of the work of the device.

kriven, preostaje jedina mogućnost da se u prostoru podržava visoka relativna vlaga zraka, kako ne bi došlo do isušivanja zida i kristalizacije štetnih soli u površinskoj zoni. Drugim riječima, relativna vlaga zraka mora biti viša od ravnotežne vlage onih soli koje su utvrđene kemijskim analizama. Takav složeni slučaj imali smo u praksi pri arheološkom iskopavanju u podzemlju dubrovačke katedrale (Malinar, 1996/97).

Još je veći problem ako su iskopani zidovi samo natkriveni radi zaštite od oborina, a nije moguće uzlaznu kapilarnu vlagu sanirati u potpunosti. Desalinizacija zidova i u tom je slučaju obilgatna, a prema potrebi se izvodi i konsolidacija oslabljenih dijelova. Kao rješenje za trajno očuvanje vrijednog lokaliteta jest izvedba kvalitetne drenaže, periodično praćenje eventualnih novih akumulacija soli i prema potrebi povremeno ponavljanje postupka desaliniziranja i konsolidacije.

3.2.9. SANIRANJE HIGROSKOPNE VLAGE VAKUUMIRANJEM

Jedna od manje poznatih metoda sanacije higroskopne vlage jest desalinizacija s pomoću vakuuma (Jeđrzejewska, 1970; Venzmer et al., 1991). Ploha koju treba desalinizirati navlaži se deioniziranim vodom i na nju se postavi usisni uređaj priključen na jaku vakuumsku sisaljku. Otopljene soli iz zida putuju s vlagom prema površini gdje ih usisni uređaj jednostavno siše iz zida (sl. 81).

3.3. SANACIJA KONDENZNE VLAGE

3.3.1. SANACIJA KONDENZNE VLAGE U GRIJANOM PROSTORU SA SLABOM TOPLINSKOM IZOLACIJOM

Već je spomenuto da kondenzacija na zidovima nastaje u prostorima s nedovoljnom toplinskom izolacijom zida ili stropa pa se na tim mjestima pojavljuju tamne mrlje od plijesni. Te plijesni mogu se uništiti raznim biocidnim sredstvima. Feilden (1982) preporučuje dezinfekciju s vodenom otopinom cinkova silikofluorida u koncentraciji 25 g/L. Time, međutim, nije uklonjen izvor vlaženja pa će se nakon biocidnoga djelovanja plijesni opet pojaviti. Kondenzacija, a s njome i plijesni, pojavljuje se

i na mjestima izlaza vodovodnih cijevi iz zida, ako te cijevi nisu toplinski izolirane. Pojava je kondenzacije najizraženija zimi, odnosno u hladnim vremenskim uvjetima. Najbolje rješenje sanacije jest nanošenje toplinske izolacije na vanjskoj strani zida. To može biti termo-žbuka ili lijepljenje termoizolacijskih ploča. Kada to zbog nekog razloga nije moguće izvesti s vanjske strane, preostaje da se izolacija postavi s unutarnje strane. Vlažne zidove treba počistiti od plijesni, dezinficirati biocidom, i ovisno o izloženosti tih ploha mehaničkim oštećenjima, izolirati odgovarajućim materijalima. Stropovi su redovito manje izloženi mehaničkim oštećenjima pa se mogu prekriti pločama ekspandiranog polistirena (stiropor). Još je bolji i mehanički otporniji ekstrudirani polistiren. Lijepljenje se izvodi sa sivim građevinskim ljepilom za keramičke pločice izrađenim na bazi cementa, punila i aditiva. Debljina izolatora određuje se prema toplinskom otporu zida i obično se kreće od 2 do 5 centimetara.

Na nalijepljene ploče potom se nanosi tanki sloj istog ljepila u koje se utisne sintetička mrežica. Površina se može završno obraditi finom vapnenom žbukom u vrlo tankom sloju i na kraju obojiti mineralnom bojom. Ako je zid podložan mehaničkim oštećenjima, umjesto ekspandiranog polistirena može se upotrijebiti kombi-ploča od heraklita i stiropora. Površina se ožbuka finom vapnenastom žbukom i oboji mineralnom bojom.

Tijesni prostori koji bi se još više smanjili postavljanjem izolirajućih ploča, mogu se izolirati lijepljenjem plutene ploče na zid odgovarajućim ljepilom za pluto. Preko pluta mogu se naljepiti zidne tapete. Ako se rabi dekorativno pluto, nije ga potrebno naknadno presvlačiti tapetama. To posebno vrijedi za izolaciju kupaonica koje se jako orosuju. Vodovodne cijevi koje se jako orosuju, mogu se izolirati premazima akrilnih disperzija s vrlo usitnjenim izolacijskim punilom.

3.3.2. SANACIJA KONDENZNE VLAGE NASTALE U PROLJEĆE U NEGRIJANOM PROSTORU

Prisjetimo se kako je u poglavlju »Vrste vlage u građevini i njihovo podrijetlo« objašnjena pojava nastanka kondenzacije na zidovima u proljeće u negrijanom prostoru. Ta se pojava u manjem opsegu događa i u kratkim vremenskim intervalima kada nakon hladnijega vremena nastupa zatopljenje. U svim zatvorenim prostorima postoji određena izmje-

na unutarnjeg zračenja vanjskim. Zbog izmjene zraka, kao i zbog gubitaka topline zračenjem u hladnom se periodu ohlade zidovi i pod. Nastupom toplijega vremena izmjenom zraka vanjski, topli zrak dospjeva u unutrašnjost, gdje se hladi na zidovima i podu. Time mu općenito prema psihometrijskim zakonima raste relativna vlaga. Porast relativne vlage zraka najveći je uz sam zid i pod, te na tim mjestima dolazi do zasićenja vlagom i pojave rošenja. Najviše rošenja biti će na podu i u donjim dijelovima zidova jer su vezani uz tlo koje ima veliku toplinsku inertnost. U slučaju relativno visokih starih zgrada postoji još jedan uzrok većoj toplinskoj inertnosti donjih zona zidova. Naime, zbog nosivosti zgrade i statičke stabilnosti donji su zidovi deblji od gornjih pa su toplinski tromiji. Zbog toga su nadolaskom toplijega vremena dulje hladni od gornjih, tanjih zidova.

Kako doskočiti proljetnom rošenju zidova? Gledano očima laika, odmah se nameće rješenje u prozračivanju prostora čim se za to ukaže prilika. Dapače, neki tvrde da prostori trebaju biti prozračivani kroz cijelu godinu. Zbog nemara korisnika, to se često i zbiva, jer razbijeni prozori ostaju godinama nepopravljeni. Stručnjaci ne misle da bi nekontrolirano prozračivanje bilo dobro. Prvo, ako se zgrada neprekidno zrači zimi, to znači da se neprestano ohlađuje više nego da nema prozračivanja. Zbog jako ohlađenih zidova proljetna je kondenzacija još veća. Ugledni britanski stručnjak Bernard M. Feilden (1982) smatra da se pojačanim prozračivanjem samo unosi nova vlaga u prostor. Teško je izbjeći proljetnu kondenzaciju, ali bi prozore trebalo držati zatvorenima dok se zidovi zgrade postupno ne zagriju.

Stambolov i van Asperen de Boer (1976) daju formulu za prozračivanje zatvorenoga prostora gdje se očekuje rošenje. Ventiliranje će sušiti zrak samo ako je zadovoljen uvjet $c_i > c_e$. U suprotnom će se još više vlage unositi izvana u prostor:

$$nV = \frac{G}{c_i - c_e}$$

V = volumen ventiliranoga prostora (m^3)
 n = broj izmjena zraka po satu
 G = ukupna produkcija vlage u prostoru V (kg/sat)
 c_i = koncentracija vlage u prostoru (kg/kg)
 c_e = koncentracija vlage izvan prostora (kg/kg)

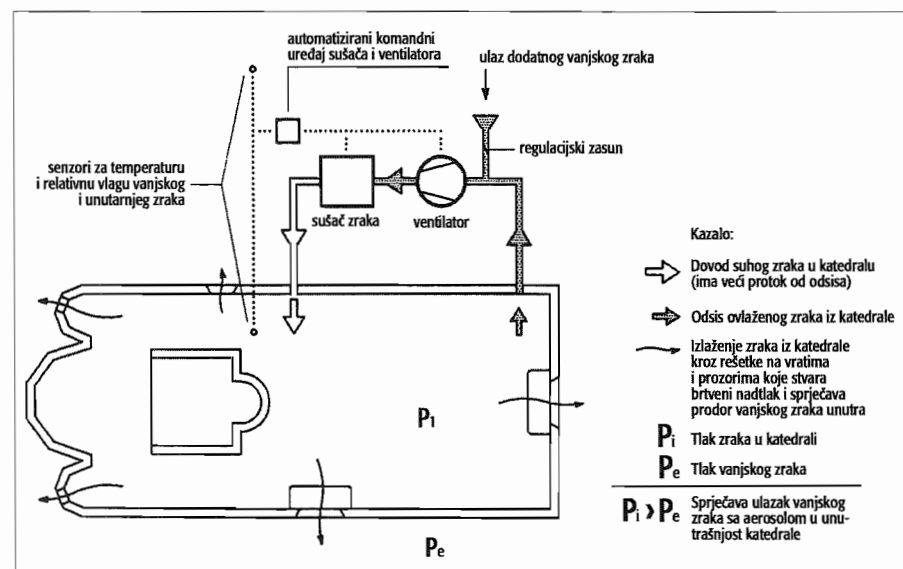
Feilden (1982) preporučuje dvije izmjene zraka u jednom satu.

Zaštitno grijanje prostora najjednostavnije je rješenje protiv kondenzacije. Bolje je ako se provodi niskotemperaturno grijanje kroz dugi period, nego kratkotrajno jako grijanje (v. dijagram u poglavlju o kondicioniranju zraka). Posebno je važno da se grijanje nastavi baš nastupom zatopljenja u proljeće sve dok ne prestanu uvjeti za rošenje. Schlieder (1967) sugerira uporabu sustava kontroliranog i kontinuiranog grijanja s maksimalnom temperaturom od $16^\circ C$. To isto navode i Stambolov i van Asperen de Boer (1972). Feilden (1982) preporučuje *zaštitno grijanje* prigodom kojeg temperatura ne bi trebala prijeći $15^\circ C$ i da je *podno grijanje* najbolje rješenje. Za sprječavanje rošenja poda dovoljno je da temperatura poda bude za $1^\circ C$ viša od rosišta. Podno grijanje preporučuje i Massari (1971).

Podno grijanje može biti izvedeno električnim grijačima ili cijevima kroz koje protječe topla voda.

82 Idejno rješenje zaštitne klimatizacije šibenske katedrale nadtlakom i sniženjem relativne vlage zraka. Sniženje relativne vlage nije opasno jer u crkvi nema drvenog inventara. Prije zahvata zidove je potrebno desalinizirati (iz: Malinar, 1992/93).

Outline approach to the protective air-conditioning of Šibenik Cathedral with superpressure and reduction of the relative humidity. Reduction of the relative humidity is not dangerous since there is no wooden inventory in the church. Before the operation, it was necessary to desalinate the walls (from Malinar, 1992/93).



Kod cijevnog grijanja voda se može zagrijavati loživim uljem, plinom ili strujom. Pri projektiranju i izvedbi treba voditi računa o hidroizolaciji, toplinskoj izolaciji i dilataciji.

Zbog nedostatka financijskih sredstava nije u svakom objektu moguće izvesti podno grijanje. Možda se još i mogu u jednokratnoj kampanji naći sredstva, ali ih je teško osigurati za zaštitno grijanje kroz dugi niz godina. Rošenje poda u crkvi može se u većini slučajeva spriječiti smanjenjem toplinske inertnosti tog poda. Stare podne ploče treba izvaditi, a podnu podlogu (obično je to šuta) produbiti. Umjesto šute praznina se popuni separiranim šljunkom. Zatim na odgovarajućoj koti treba izvesti armiranobetonsku ploču, položiti podnu hidroizolaciju, a potom i dovoljno debelu termoizolaciju. U međuvremenu treba podne ploče desalinizirati. Ploče se polažu u lagani estrih. Ako podne ploče nisu izvorne, to jest ne potječu iz doba kada je crkva građena, moguće ih je zamijeniti novima od odgovarajućeg kamena prema starom, originalnom uzorku.

Kondenzacija se može spriječiti ili barem u dobroj mjeri ublažiti i sušenjem zraka. Pri tome treba voditi računa da se tim postupkom ne postigne preniska relativna vlaga zraka koja bi mogla naškoditi drvenom inventaru. Sušenje zraka može biti provedeno lokalno samo u zoni gdje se pojavljuje vidljivo rošenje, s pomoću pokretnih sušača zraka, ili izvedbom stabilnog uređaja za zaštitnu klimatizaciju s odgovarajućim senzorima (sl. 82).

Mjere sprječavanja kondenzacije na površini zida smanjit će i vjerojatnost za kondenziranje u strukturi zida. Kondenzaciju koju iniciraju higroskopske soli spriječit će saniranje higroskopske vlage.

Proljetna kondenzna vlaga u stambenom objektu koji se ne koristi čitavu godinu može se smanjiti ovisno o tome je li objekt građen s tankim zidovima ili debelim kamenim zidovima s velikom toplinskom tromašću. Kod laganih konstrukcija prozračivanje može biti permanentno. Pri tom treba paziti na to

da se izbjegne prodor kiše, a zaštitnom mrežom treba spriječiti ulazak štetočinja. Ako zidovi imaju veliku toplinsku inerciju, bolje je da prozori budu potpuno zatvoreni, ali na mjestu gdje se najviše pojavljuje rošenje treba postaviti sredstvo za adsorpciju vlage iz zraka. Postoje takva komercijalna sredstva koja imaju deklaraciju o tome koliki se volumen zraka može održavati suhim kroz dulje razdoblje. Ako se predviđa dolazak u vikendicu tek na ljeto, dobro je da se pokušstvo, koliko je to moguće, odmakne od zida i da vrata ormara budu otvorena. Tako će se izbjeći »mrtvi kutovi« u kojima se pojavljuje rošenje i potom plijesan. Smanjenje proljetnog rošenja može se postići i postavljanjem termoizolacijskih ploča na zid iza ormara.

3.3.3. SANACIJA OSTALIH OBLIKA KONDENZNE VLAGE

Kondenzacija u strukturi zida spriječit će se, kao što je rečeno, mjerama za sprječavanje površinske kondenzacije. Tamo gdje je to moguće može se s unutarnje strane zida ugraditi parna brana (razne sintetičke ili bitumenske folije). Problem kondenzne vlage inicirane higroskopskim solima rješava se sanacijom higroskopske vlage, što je obrađeno u poglavlju o sanaciji higroskopske vlage, pa to ovdje nije potrebno ponavljati. Kondenzna vlaga uzrokovana nazočnošću velikoga broja ljudi u zatvorenom prostoru sanira se izvedbom adekvatne ventilacije.

Općenito za smanjenje kondenzne vlage u prostoru Feilden (1982) preporučuje ove zahvate:

1. uklanjanje izvora isparivanja,
2. toplinsko izoliranje zidova,
3. grijanje prostora radijacijom ili ugradnjom konduktorskih grijača koji će povisiti temperaturu površine,
4. ventiliranje koje će pomoći u prevenciji lokalnog koncentriranja vlažnoga zraka,
5. odvlaživanje zraka s pomoću dehumidifikatora (sušača zraka) ili sa silikagelom.

4. ZAKLJUČAK



Paz, crkva sv. Vida, prodor vlage s krova, prozora i tla (foto Vid Barac)

Paz, Church of St Vitus, penetration of damp from the roof, windows and ground (photo by Vid Barac)



Višnjan, crkva sv. Antuna, kondenzna vlaga na podu (foto Goran Bekina)

Višnjan, Church of St Anthony, condensation moisture on the floor (photo by Goran Bekina)

Vlaga u građevinama jedan je od najčešćih uzročnika njihovog propadanja. Ipak, u većini slučajeva, ona ima samo posredničku ulogu u destrukciji građevinskoga materijala. Građevinski materijal izložen stalnoj vlazi u zasićenoj koncentraciji neće propasti sve dok ne nastanu uvjeti za sušenje. Tada nastaje kristalizacija raznih soli koje vlaga na svojem putu prema zoni isparavanja otapa, gdje ih i akumulira u sve većoj količini. Rast kristala tih soli u pornome prostoru građevinskoga materijala izaziva izuzetno visoke kristalizacijske i hidratacijske tlakove, koji višestruko premašuju čvrstoću i najčvršćih materijala. Posljedica kristalizacije soli je pucanje, ljuskanje i mrvljenje opeke, kamena, morta ili žbuke. Zidovi dobivaju ružne mrlje i osipaju se, zidni ukrasi otpadaju, freske se ljušte. Građevina koja bi posjetitelja trebala oduševiti svojom ljepotom ispunjena je zadahom plijesni i propadanja. Vlaga je zagospodarila prostorom. Protiv njezinoga štetnog djelovanja možemo se uspješno boriti, ali to je dugotrajan, opsežan i ozbiljan posao.

Za uspješnu borbu protiv vlage u građevini potrebno je određenim istraživačkim predradnjama postaviti pravilnu dijagnozu vlaženja. Stoga treba utvrditi izvore vlaženja i posljedice, obaviti fizikalna mjerenja i kemijske analize štetnih soli. Poželjno je istražiti dokumentaciju o gradnji objekta i o eventualnim prethodnim sanacijskim zahvatima. Na temelju dobivenih rezultata izrađuje se program sanacije. Tijekom izvođenja radova sve stavke programa treba dosljedno i savjesno obaviti. Neprovođenje samo jedne stavke može poništiti sav uloženi trud i novac.

Mnoge nevolje s vlagom mogu se izbjeći pravilnim održavanjem građevine, redovitim pregledima i preventivnim zahvatima. U građevinama u kojima je vlaga sanirana, nakon završenih radova korisniku građevine treba dati upute za redovito održavanje i prevenciju. Jer i nakon najstručnije izvedenih sanacijskih zahvata ne može se jamčiti da se bez održavanja građevine vlaga neće ponovno pojaviti u nekom obliku.

LITERATURA

- Arendt, C. i Wiesen, H. (1990): Verfahren zur Untersuchung von Mauerfeuchtigkeit. Ed. Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung, pp. 84, Aachen.
- Arendt, C. (1996): Die »gesunde« Wand als Voraussetzung einer Freskensenierung. Salzscha den an Wandmalereien, 15-28, München.
- Arnold, A. (1984): Determination of Mineral Salts from Monuments. *Studies in Conservation*, 29, 1984, 129-138.
- Arnold, A. i Zehnder, K. (1989): Salt Weathering on Monuments. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo, 1° Simposio internazionale Bari 7-10 giugno 1989, 31-58, Bari.
- Arnold i Zehnder (1996): Monitoring Wall Paintings Affected by Soluble Salts. Salzscha den an Wandmalereien, 103-135, München.
- Ashurst, J. i Dimes, F. G. (1990 a): Conservation of Building and Decorative Stone. Vol.1, pp. 193, Ed. Butterworth-Heinemann, London.
- Ashurst, J. i Dimes, F. G. (1990 b): Conservation of Building and Decorative Stone. Vol.2, pp. 254, Ed. Butterworth-Heinemann, London.
- van Asperen de Boer, J. R. J. (1967): Humidity in Walls in Relation to the Preservation of Works of Art. London Conference on Museum Climatology, IIC, 109-117, London.
- Auger, F. (1989): World limestone decay under marine spray conditions. La conservazione dei monumenti nel bacino Mediterraneo, 1° Simposio internazionale Bari 7-10 giugno 1989, 65-69, Bari.
- Berry J. i Price, C. A. (1994): The movement of salts in consolidated stone. Atti del 3° Simposio Internazionale Venezia, 22-25 giugno 1994, 845-848, Venezia.
- Božić, B. (1999): Neeksplozivno lomljenje kamena. Klesarstvo i graditeljstvo, 1-2, 57-63, Pučišća.
- Crnković, B. i Babić, V. (1983): Topive soli u karbonatnim stijinama. *Geol. vjesnik*, 36, 117-129, Zagreb.
- Diglas, G. (1994): Wall Sanitation, Ed. Kerasan, Wien.
- Fassina, V. (1976): A Recent Survey on Air Pollution in Venice in Relation to the Determination of Marble and Stone. *Lithoclastia*, 2/76, 33-43, Boulogne (France).
- Feilden, B. M. (1982): Conservation of Historic Buildings. Ed. Butterworth, London.
- Filipović, I. i Lipanović, S. (1982): Opća i anorganska kemija. Zagreb.
- Friese, P. i Hermoneit, B. (1996): Ein modifiziertes Kompressenverfahren zur Entsalzung von Ziegelmauerwerk. Salzscha den an Wandmalereien, 59-63, München.
- van Hees, Rob, P. J. i Koek, Jaap, A. G. (1995): Treatment of Rising Damp - A Laboratory Evaluation. International Colloquium 19 - 21 June 1995 Rome, ICCROM, 403-418, Rome.
- Herak, M. (1973): Geologija; struktura, dinamika i razvoj Zemlje. Ed. Školska knjiga, pp. 465, Zagreb.
- Iñiguez Herrero, J. I. (1967): Altération de calcaires et des gres utilisés dans la construction. Ed. Eyrolles, pp. 128, Paris.
- Jacoby, E. i Krejci, G. (1992): Die Höhle beim Span nagelhaus. Ed. Eigentmer, Herausgeber und Verleger Verbandösterreichischer Höhlenforscher, pp. 150, Wien.
- Jędrzejewska, H. (1970): Removal of soluble salts from stone. Conservation of Stone, 1970 New York Conference on Conservation Stone and Wooden Objects, 1, 19-33, London.
- Jespersen, H. B. (1953): Thermal Conductivity of Moist Materials and its Measurement. *J. Inst. Heat Vent. Eng.*, 21 (1953), 157-174.
- Kostrov, P. I. i Nogid, I. L. (1965): Removal of Salts from Ancient Middle-Asian Paintings by Means of Electrodialysis. *Studies in Conservation*, Vol. 10, No. 3, 83-89.
- Kurdenkov, L. I. (1968): The Effectiveness and Physical Nature of the Electro-osmotic Drying of Foundations and Walls. Conference 13-14 May 1968: Moisture Control in the Masonry of Historic Building, 20-26, Moscow.
- Lewin, S. Z. (1970): A new method for the conservation of limestone and marble objects. Seminar on the Conservation of Stone Monuments 11 December 1970, UNESCO, SHC/MD/14, 11-14, Paris.
- Lewin, S. Z. i Baer, N. S. (1974): Rationale of the Barium Hydroxide-Urea Treatment of Decayed Stone. *Studies in Conservation*, 19, 24-35.
- Malinar, H. (1980/81): Novi prilog proučavanju vlage u arhitektonskim spomenicima kulture. *God. zašt. spom. kult.*, 6/198-7/1981, 127-130, Zagreb.

- Malinar, H. (1986): Metodologija obrade podataka mjerenja vlage u starim građevinama. 2. jugosl. savjetovanje o sanaciji zgrada, Zbornik referata št. 3, 117-125, Maribor.
- Malinar, H. (1992/93): Uzroci propadanja kamena u šibenskoj katedrali. God. zašt. spom. kult. Hrv., 18/19, 63-78, Zagreb.
- Malinar, H. (1996): Negativna iskustva uporabe portland cementa pri restauriranju kamenih spomenika kulture. Klesarstvo i graditeljstvo, 1-2, 37-40, Pučišća.
- Malinar, H. (1996/97): Podzemne vode i kriptoklima arheološkog lokaliteta u podzemlju dubrovačke katedrale i Bunićeve poljane. God. zašt. spom. kulture, 22/1996-23/1997, 189-192, Zagreb.
- Malinar, H. i Penović, D. (1985): Korozija zatega na palači Sponza u Dubrovniku. Građevinar, 5, 211-215, Zagreb.
- Massari, G. (1971): Humidity in Monuments, p.p. 47, Ed. University of Rome, Rome.
- Massari, G. (1977): Batiments humides et insalubres. Pratique de leur assainissement
- Matteini, M. (1987): An Assessment of Florentine Methods of Wall Painting Conservation Based on the Use of Mineral Treatments. Proceedings of a Symposium organized by the Courtauld Institute of Art and Getty Conservation Institute, July 13-16 1987, Ed. Sharon Cather, London.
- Matteini, M. i Moles, A. (1978): Barium Aluminates for the Consolidation of Mural Paintings. ICOM Committee for Conservation, 5th Triennial Meeting Zagreb, 78/15/5, Zagreb.
- Matteini, M., Moles, A. i Giovannoni, S. (1996): Calcium oxalate as a protective mineral system for paintings: methodology and analyses. Salt Schäden am Wandmalereien, 214-222, München.
- Meir, H. G. (1983): Untersuchung der Möglichkeit der Umwandlung leicht löslicher Verbindungen, um die Salzeinwanderung in frisch angebrachte hydrophobe Porenputze (Sanierenputze) zu behindern. Internationales Kolloquium 6-8-September 1983, 397-399, Esslingen.
- Mora, P., Mora, L. i Philippot (1977): La conservation des peintures murales. Editrice compositor, Bologne.
- Moraru, D. (1978): Mural Paintings Desalting. ICOM 5th Triennial Meeting Zagreb, Vol.2, 78/15/6, Zagreb.
- Mortensen, H. (1933): Die Salzsprengung und ihre Bedeutung für die regionalklimatische Gliederung der Wüsten. Dr. A. Petermans Mitteilungen aus Justus Peithes Geographischer Anstalt, Hrsg. von P. Langhans, 79, 130-135.
- Perander, T. i Nieminen, T. (1983): Neue Theorien der Ziegelverwitterung. Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Internationales Kolloquium 6-8. Sept., Esslingen, 367-371, Esslingen.
- Pintar, M. (1965): Kemikalije, droge i kemijski proizvodi kao trgovačka roba. Ed. Tehnička knjiga, pp. 441, Zagreb.
- Reddy, M. M. i Leith, S. D. (1994): Dry deposition of sulfur to limestone and marble: preliminary evaluation of a process based model. Atti del 3^o Simposio Internazionale Venezia, 22-25 giugno 1994, 185-187, Venezia.
- Schliedter, H. (1967): Schäden an historischen Kirchenorgeln und anderen Kunstwerken. Deutsche Kunst und Denkmalpflege, 25, 20-38.
- Stambolov, T. (1976): The corrosive action of salts. Lithoclastia, 1, 3-8, Boulogne.
- Stambolov, T. i van Asperen de Boer, J. R. J. (1976): The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments. Ed. International centre for the study of the preservation and the restoration of cultural property, Rome.
- Šarić, Lj. (1996): Trajno plastično-elastična brtvila u graditeljstvu. Klesarstvo i graditeljstvo, 1-2, 3-22, Pučišća.
- Šarić, Lj. (1999): Utjecaj udara kiše – prodiranje kiše na fasadama od kamenog pročelja. Klesarstvo i graditeljstvo, 1-2, 74-76, Pučišća.
- Tomašić, I. i Ženko, T. (1995): Utjecaj poroznosti na postojanost kamena. Klesarstvo i graditeljstvo, 3-4, 34-40, Pučišća.
- Torraca, G. (1988): Porous Building Materials. Ed. ICCROM, pp. 148, Rome.
- Valentini, M., Sala, G. i Trovati, A. (1994): Investigation on Internal Microclimate of a Confined Historical Building: Evaluation of the Results in Relation to the Conservation of Frescoes. La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo, Atti del 3^o Simposio Internazionale Venezia, 22-25 giugno 1994, 263-268, Venezia.
- Venzmer, H. et al (1991): Sanierung feuchter und versalzener Wände. Ed. Verlag für Bauwesen, pp.180, Berlin.
- Vos, B. H. (1969): Internal Condensation in Structures. Build. Sci., Vol. 3, 191-206, Ed. Pergamon Press, Great Britain.
- Vos, B. H. i Tammes, E. (1968): Flow of Water in Liquid Phase. Ed. IBBC, Rijswijk.
- Whir, R. (1986): Restaurierung von Steindenkmälern. Ed. Verlag Callwey, pp. 236, München.
- Winkler, E. M. (1971): Decay of Stone. Conservation of Stone, New York Conference on Conservation of Stone and Wooden Objects 7-13 June 1970, 1, 1-14, London.
- Winkler, E. M. (1973): Stone; Properties, Durability in Man's Environment, Applied Mineralogy 4, Wien.
- Wittmann, F. H. (1983): Zeta-potencijal und Feuchtigkeitstransport durch poröse Werkstoffe. Internationales Kolloquium 6.-8. Sept. 1983, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Esslingen.

Summary

MOISTURE IN BUILDINGS AND ITS REMOVAL

This manual consists of three chapters: 1 *Kinds of moisture and their origin*, 2. *Diagnostics* and 3. *Repair procedures*.

In the first chapter, which discusses the kinds of moisture that appear in buildings and the origin of them, moisture is systematised into three groups:

- Liquid moisture, which has got into the wall in liquid form, rising moisture from the ground, penetration of rain through improperly built or damaged roofs, through cracks in the wall, via wrongly sloped terraces and balconies, as well as the leaking of faulty installations of water pipes, sewage and central heating.
- Hygroscopic moisture, which is absorbed by soluble hygroscopic salts in the wall from water vapour in the air. These salts can come into the wall via capillary moisture from the soil, can be contained in the wall as initial salts from bricks, stone or sand used in the building. It is common for the salts to derive from sea sand containing sea salt. This sea salt can also get into the wall as aerosol in buildings close to the sea. The winter scattering of salt on the roads against ice can also do damage to buildings. Hygroscopic salts can also get into a wall via the use of Portland cement. Some harmful salts can be of animal origin.
- Condensation moisture, which occurs by the condensation of water vapour in the air on the relatively cold areas of wall, ceiling and floor. It can occur in the winter in a heated area with poor thermal insulation of the wall and ceiling, and during the spring warming in an unheated room. Condensation can be caused by evaporation from many people in a closed and unaired room. A high concentration of hygroscopic salts in the

wall can bring about condensation although the psychrometric conditions have not been attained. In the diagnostics chapter there is first of all a discussion of the visual inspection of possible sources of moisture in a building and of the need to inspect the records for any previous repair operations. Then various instrumental measurements and analyses that help in making a diagnosis are explained. This first of all relates to methods of determining the content of moisture in a wall, then the determination of the maximum possible moisture, balanced moisture, the degree of wetness of a wall, other capacities for the absorption of moisture and the measure of absorption. There is almost mention of the measurement of underground water, the measurement of the relative moisture of the air, the temperature of the air and wall and the determination of the dew point. Special attention is devoted to chemical analysis of soluble salts in the wall, air and rainwater. At the end the importance of data processing and the making of a summary analysis as well as the construction of a treatment programme is discussed.

In the treatment chapter, there is special discussion of the treatment of liquid moisture (drainage, proper drainage of roof water, electro-physical methods and so on), of hygroscopic moisture (paper pulp, removing plaster, electro-kinetic methods, chemical methods, the transformation of soluble into insoluble salts, the use of treated plaster) and condensation moisture (thermal insulation, protective heating, air conditioning).

The annexe gives a list of literature used, a dictionary with short definitions of technical terms and at the end a glossary of concepts in alphabetical order.

RJEČNIK

- adhezija** privlačna sila između molekula različitih tijela koja se tijesno dodiruju. Trenjem na graničnim površinama adhezija omogućuje čvrsto prijanjanje molekula različitih tvari među sobom.
- aditiv** dodatak, mala količina tvari koja se dodaje glavnim sastojcima radi poboljšanja svojstava.
- adsorbenti** tvari koje imaju veliku sposobnost adsorpcije ili upijanja, kao minerali glina i zeoliti.
- adsorpcija** vezanje plinova (vodene pare), tekućina ili otopljenih tvari na površini druge tvari. Adsorpciju treba razlikovati od *apsorpcije*, kod koje se jedna od tvari homogeno raspoređuje po čitavom volumenu druge.
- aerosol** krute čestice, kapljice tekućine ili plina dispergirane ili raspršene u atmosferi. Mogu biti u obliku prašine, dima ili magle ili su nevidljive. U morskom priobalju čest je sastojak aerosola morska sol.
- agresivna voda** voda koja sadrži otopljeni ugljikov dioksid (CO_2) iz atmosfere, pa tvori karbonatnu kiselinu H_2CO_3 . Agresivna voda otapa materijale karbonatnog sastava i pretvara ih u topljive hidrokarbonate. To mogu biti vapnenci, dolomiti i vapnene žbuke. Najagresivnija je voda temperature malo iznad ništice, kada ima pH vrijednost 5,2.
- alkalije** oksidi i hidroksidi alkalijskih elemenata. Otopljeni u vodi daju vrlo lužnatu reakciju.
- alkalijski elementi** jednovalentni elementi (kovine) iz prve skupine periodnog sustava elemenata. To su: litij, natrij, kalij, rubidij i cezij. Za razliku od njih *zemnoalkalije* su dvovalentni elementi iz druge grupe periodnog sustava elemenata: magnezij, kalcij, stroncij, barij i drugi. Od alkalijskih elemenata najčešći su sastojci topljivih soli natrij i kalij, a od zemnoalkalijskih kalcij i magnezij.
- analiza, kemijska** rastavljanje spojeva u njihove sastojke kemijskim metodama, da bi se odredio njihov sastav. Kvalitativna analiza ispituje od čega se sastoji neka tvar, a kvantitativna analiza ispituje koliko ima kojeg sastojka u određenoj količini tvari.
- anemometar** instrument za mjerenje brzine vjetra.
- anhidridi** kemijski spojevi koji s vodom tvore kiseline. Tako je sumporov dioksid (SO_2) anhidrid sumporne kiseline (H_2SO_3), a sumporni trioksid (SO_3) anhidrid sumporne kiseline (H_2SO_4).
- anioni** negativno nabijeni ioni. U električnom polju putuju prema pozitivnoj elektrodi, anodi. Najčešći anioni u topljivim solima jesu: SO_4^{2-} (sulfati), Cl^- (kloridi), NO_3^- (nitrati), CO_3^{2-} (karbonati) i HCO_3^- (hidrokarbonati).
- apsolutna vlaga zraka** koncentracija vodene pare u zraku. Najčešće se izražava u gramima pare po kubnom metru suhog zraka (g/kg). Katkad se izražava i u gramima vodene pare u kilogramu suhog zraka (g/kg). Ovaj se oblik još naziva i *specifičnom vlagom zraka*.
- biocidi** sredstva za uništavanje biogenih štetoinja. Tako su fungicidi sredstva protiv gljivica, baktericidi protiv bakterija i sl.
- dehumidifikator** uređaj za sušenje zraka u zatvorenom prostoru. Manji, pokretni sušaći zraka su kondenzacijski, a veći adsorpcijski. Kondenzacijski dehumidifikatori funkcioniraju tako da ventilator tjera zrak preko rashladne rešetke na kojoj se vodena para kondenzira, pa iz sušaća dalje struji suh, ali hladniji zrak. Kod adsorpcijskih sušaća zrak struji preko lagano rotirajućih polica s adsorbensom koji oduzima vlagu iz zraka. Najčešće su konstruirani tako da se adsorbens automatski regenerira.
- desalinizacija** odsoljavanje, odstranjivanje topljivih soli iz zida.
- desorpcija** je otpuštanje higroskopske vlage prigodom snižavanja relativne vlage zraka. Događa se kod niže relativne vlage od one prigodom koje je nastala adsorpcija, pa se taj fenomen očituje kao histerza. Uzmimo kao primjer NaCl koji adsorbira vodu kod 75% relativne vlage, ali je otpušta tek kod 70%.
- difuzija vodene pare** u djelomice suhoj poroznoj krutini voda može prijeći iz područja s mnogo molekula vode u zraku (visoki parcijalni tlak vodene pare) prema području s malim parcijalnim tlakom vodene pare. To rezultira isparivanjem s jedne strane i kondenzacijom na drugoj. Takav prijelaz vode nastaje kada prelazak vode u tekućem stanju nije moguć ili je slab.
- dijagnostika** umijeće prepoznavanja bolesnoga stanja i utvrđivanje vrste bolesti prema njezinim bitnim oznakama i pojavama (simptomima).
- disperzija** je sustav sićušnih, međusobno odvojenih koloidnih čestica (krutih, tekućih, plinovitih) koje lebde u tekućem, plinovitom ili krutom mediju. Medij se označuje kao disperzivno sredstvo, a čestice kao disperzna faza. Kada je disperzivno sredstvo plinovito, govorimo o aerosolima, pri čemu disperzna faza može biti tekuća (magla) ili kruta (dim). Ako je disperzivno sredstvo tekuće, govorimo o solu, a ako je disperzna faza plinovita, tekuća ili kruta, onda takav sol označujemo kao pjenu, emulziju ili suspenziju. Ako su koloidne čestice raspršene u krutom disperzivnom sredstvu, govorimo o krutom solu.
- drenaža** organizirana odvodnja podzemnih voda od zgrade radi sprječavanja ovlaživanja temelja i zidova.
- eflorescencija** iscjetavanje soli u zoni isparavanja vlage iz zida.
- ekstrakcija soli** vađenje topljivih soli iz zida, desalinizacija ili odsoljavanje.
- elektrokineza** proces međudjelovanja između nabijenih dispergiranih čestica i vanjskoga električnog polja.
- elektroosmoza** jedan je od oblika elektrokinetike. Podrazumijeva protjecanje tekućine kroz poroznu dijafragmu pod utjecajem električnog polja zbog razlika u električnom potencijalu. Ovaj se efekt, među ostalim, iskorištava za sprječavanje kapilarnog uzlaza vlage u zidu.
- emulzija** je smjesa dviju ili više tekućina koje se normalno ne otapaju jedna u drugoj, nego je jedna od njih raspršena (dispergirana) u obliku sićušnih kapljica u drugoj. Da bi raspršene kapljice ostale u lebdećem stanju, tj. da se tekućine ne razdvoje, potrebna je prisutnost malih količina treće tvari – emulgatora, odnosno stabilizatora (v. *disperzija*).
- erozija** mehaničko trošenje materijala djelovanjem vode.
- gel** je polukruti, želatinozni materijal koji nastaje iz neke koloidne otopine. Neki gelovi sadrže i do 90% vode, ali su po svojstvima sličniji krutinama nego tekućinama. Gelirati znači prijeći u stanje gela.
- hidracija** je proces adsorpcije ili povezivanja vode s drugim bezvodnim tvarima.
- hidrationski tlak** je tlak u poroznom prostoru zida što ga tvore hidratne soli kada u stanju bez vode vezuju kristalnu vodu. Hidrationski tlakovi pojedinih soli izuzetno su visoki i razaraju strukturu zidnog materijala.
- hidrati** su spojevi koji sadrže kemijski vezanu, tzv. kristalnu vodu.
- hidrofilnost** je svojstvo upijanja vode.
- hidrofobnost** je svojstvo odbijanja vode.
- hidroizolacija** zapreka prodoru vlage kroz zid.
- higrometar** instrument za mjerenje relativne vlage zraka.
- higroskopna vlaga** vlaga koju upija kruta tvar iz vlažnog zraka.
- higroskopni (ravnotežni) sadržaj vlage** vlaga koju sadrži porozna higroskopna tvar nakon duljega stajanja pri određenoj temperaturi i relativnoj vlazi zraka (npr. 20°C i $\phi = 85\%$), nakon čega više ne prima niti gubi vodu. Označuje se s grčkim slovom *psi*, a izražava u postocima ($\Psi_H\%$). Taj podatak govori o stupnju higroskopnosti neke tvari.
- higroskopnost** Hidrofilne površine pora mogu privući molekule vodene pare iz zraka koje se upiju na površini čak i kad je temperatura zraka viša od rosišta. Higroskopno se upijanje događa kada je relativna vlaga zraka viša od granične vrijednosti za određenu tvar, a zavisi o prirodni tvari ali i o promjeru pora. Pritom manje pore bolje upijaju. Ako se u zidu nalazi neka topljiva i higroskopna sol, povećat će se higroskopnost zida ovisno o vrijednosti ravnotežne relativne vlage za tu sol. Tako će npr. NaCl adsorbirati vodu pri relativnoj vlazi zraka iznad 75,5% i temperaturi 20°C .
- humidifikator** ovlaživač zraka.
- injiciranje** unošenje tekućine u porni prostor krute tvari pod povišenim tlakom (stvorenim kompresorom). Isto i: *injektiranje*.
- injektiranje** v. *injiciranje*.
- infuzija** unošenje tekućine u porni prostor krute tvari pod normalnim hidrostatskim tlakom.
- intersticijalna kondenzacija** nastaje u strukturi zida kada je unutrašnjost zida hladnija od rosišta zraka blizu površine, pa molekule vodene pare prodiru u porni prostor i tamo prelaze u tekuću fazu.
- ioni** električno nabijeni atomi ili skupine atoma. Ako atom (ili grupa atoma) primi elektron, nastaje negativni ion ili anion, a, ako odbaci elektron, nastaje pozitivni ion ili kation. Kemijski spojevi s ionskom vezom u vodenoj se otopini razlažu (disociiraju) na anione i katione. Takve su otopine elektroliti i one vode električnu struju. Soli su spojevi s ionskom vezom.
- isparni ostatak** zaostala kruta tvar nakon isparivanja vodnog ekstrakata topljivih komponenata u zidu. To su pretežito topljive soli, ali može biti i nezvezani kalcijev hidroksid iz vapna kao sastojka žbuke.
- izluživanje** je postupak ekstrahiranja topljivog sastojka iz krutine s pomoću nekog otapala.
- kapilara** poput vlasitanka cjevčica. U građevnom materijalu to je sustav vrlo malih međusobno spojenih šupljina, koje djeluju poput kapilare.
- kapilarni uzlaz vode ili kapilarna elevacija** uzlaz vode iz vodom zasićenoga tla u porozni zid građevine. Kapilare manjeg radijusa podizati će vodu na veću visinu nego kapilare većeg radijusa.

- kationi** pozitivno nabijeni ioni. Najčešći kationi u topljivim solima u zidu su: K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . U električnom polju gibaju se prema negativno nabijenoj elektrodi, katodi.
- kohezija** privlačnost među istovrsnim molekulama
- koloidi** su tvari koje ne kristaliziraju i brzo prelaze u koloidno stanje u kojemu promjer dispergiranih čestica varira između 0,001 i 0,1 mikrona, pa se nalaze između molekularne otopine i suspenzije.
- kondenzacija** prilazak vodene pare u tekuću fazu koji se očituje kao vodeni film na nekoj površini. Nastaje kada je temperatura površine niža od rosišta okolnoga zraka.
- kondenzna vlaga** vlaga izlučena iz zraka na hladnoj površini u obliku sitnih kapljica.
- kondukcija** način prijenosa topline dodirnim
- konduktometar** aparat za mjerenje električne vodljivosti otopine
- konsolidacija** učvršćivanje zida nekom učvršćujućom tekućinom koja se skrutnjava isparivanjem otapala ili polimerizacijom.
- kontaminacija solima** onečišćenje zida štetnim topljivim solima.
- konvekcija** način prijenosa topline strujanjem i miješanjem plina ili tekućine.
- konzerviranje** postupak za sprječavanje daljnega propadanja neke tvari (ili stvari, spomenika).
- korozija** je kemijsko nagrizanje krute tvari djelovanjem plinova ili tekućina.
- kriptoklima** mikroklima zatvorenoga prostora
- kristal** kruto tijelo karakteristična oblika, simetrije, klanja, čiji su atomi i molekule raspoređeni po određenoj šablonoj ili rešetki. Kristali imaju glatke plohe i oštre bridove, te točno određene kutove među plohama. Postupak dobivanja kristala iz otopine zove se kristalizacija, a ponovljeni postupak rekristalizacija.
- kristalizacijski tlak** tlak što ga u pornom prostoru u zidu stvara rast kristala topljivih soli.
- kristalna voda** je kemijski vezana voda u kristaliziranim tvarima (mineralima). Te tvari gube kristalnu vodu grijanjem na oko 100°C.
- kritični sadržaj vlage** je granični sadržaj iznad kojeg su kapilare ispunjene toliko da se u njima voda može gibati u tekućem stanju, a ispod te granice samo u obliku vodene pare. Brzina sušenja naglo se usporava kada se spusti na razinu kritičnog sadržaja. Zbog toga je vrlo teško isušiti zidove s visokim kritičnim sadržajem vlage, a to ovisi o poroznosti i tipu materijala.
- likvidna vlaga** vlaga u zidu nastala od tekuće vode (za razliku od kondenzne i higroskopne vlage koja se izlučuje iz zraka). U zid može dospjeti kapilarnim uzlazom iz tla, prodorom oborina ili puknućem vodnih instalacija.
- limnograf** sprava za registriranje vodostaja vode stajačice ili tekućice kroz dulje razdoblje.
- maksimalna moguća vlaga zida** najveći mogući maseni udio vlage u zidu izražen u postocima, a ovisi o pornom prostoru i svojstvu upojnosti nekog materijala.
- minerali** sastavni dijelovi stijena Zemljine kore koji se međusobno razlikuju po određenom kemijskom sastavu, kristalnom sastavu, te optičkim, mehaničkim, toplinskim i električnim svojstvima.
- mort** vezivni materijal za zidanje zida od opeke ili kamena. Sastoji se od veziva (vapno, cement) i agregata ili punila (riječni pijesak ili mljeveni kamen). v. *žbuka*.
- ombrometar** kišomjer, instrument za mjerenje količine kiše.
- otapalo** tekućina u kojoj se otapaju druge tvari. To je najčešće voda, ali to mogu biti organska aromatska ili alifatska otapala.
- otopina** homogena tekuća smjesa dviju ili više tvari u kojoj se sve sadržane tvari mogu razložiti do veličine molekule. Ne talože se i nemaju određene koncentracije. Postoje otopine krutih tvari u tekućem otapalu, otopine plinova u tekućini i otopine tekućine u tekućini. Kada su tvari razložene u molekule, riječ je o molekularnoj otopini, a kada se razlože u ione, to nazivamo ionskom otopinom. Ionska otopina vodi električnu struju pa je nazivamo elektrolitom.
- pehametar** (ili **pH-metar**), sprava za mjerenje koncentracije vodikovih iona u otopini. Njom se utvrđuje stupanj kiselosti, odnosno lužnatosti otopine, a mjerenje se vrijednosti kreću od 1 do 14.
- peptizacija** prelazak iz gel-stanja u stanje koloidne otopine.
- permeabilnost** sposobnost propuštanja vode kroz šupljikavu krutu tvar.
- piezometar** sprava za mjerenje razine podzemne vode u bušotini.
- polimer** sintetska tvar koja se sastoji od velikih molekula dobivenih spajanjem velikoga broja jednostavnih molekula (monomera). Proces se zove polimerizacija.
- poroznost** pojava pora u nekom materijalu. Ujedno označuje i postotak pora u tvari.
- preostala sposobnost upijanja vode** količina vode koju još može neki vlažan materijal upiti do zasićenja. Izračunava se kao razlika između maksimalne moguće vlage i trenutačne vlage materijala.
- psihrometar** instrument za određivanje relativne vlage zraka.
- pucolan** izvorno znači vulkanski pepeo prema lokalitetu Pozzuoli kod Napulja. Dodaje se vapnu za pripremu hidrauličnih žbuka. Može se dodati i portland-cementu radi vezanja slobodnog vapna u netopljiv kalcijev silikat. U širem smislu pucolani su silikatni dodaci žbukama i mortovima

- kao npr. mljeveni opal, dijatomejska zemlja, elektrofiltarski pepeo i dr.
- radijacija** zračenje. U toplinskom smislu to je prijenos topline zračenjem.
- ravnotežna relativna vlaga zraka** je ona relativna vlaga zraka kod koje sol pri danoj temperaturi počinje primati vodu iz zraka, pa se sol otapa. Kada se ambijentalna relativna vlaga zraka (ϕ) počinje smanjivati ispod vrijednosti ravnotežne relativne vlage zraka (ϕ_R), dolazi do prezasićenja otopine soli, pa nastaje kristalizacija.
- ravnotežni sadržaj vlage v. higroskopni (ravnotežni) sadržaj vlage** ($\Psi_H\%$).
- relativna vlaga zraka** stupanj zasićenosti zraka vodenom parom pri danoj temperaturi. Označuje se grčkim slovom ϕ (ϕ), a definira kao odnos između stvarnog sadržaja vodene pare i maksimalnoga mogućeg sadržaja pri danoj temperaturi, te se izražava u postocima zasićenja.
- restauriranje** postupak obnove nekog spomenika kulture do mjere za koju postoje podaci koji opravdavaju taj postupak.
- rentgenska difraktometrija** svojstvo karakterističnog ogiba rentgenskih zraka koje nailaze na pojedine vrste kristala, a iskorištava se za strukturalne analize kristala. Pri analizama štetnih topljivih soli u zidu rentgenska se difraktometrija (skraćeno *x-difrakcija*) primjenjuje kao komplementarna metoda za kemijske analize. Njome se može kod hidratnih soli utvrditi i količina kristalne vode u molekuli kristala.
- rosište** temperatura zraka kod koje nastaje maksimalno zasićenje vodene pare, pa se ona pretvara u tekuću fazu u obliku rose. Ako je zrak u prostoru topliji od zida i pri tome se temperatura zida spustila do rosišta, nastat će kondenzacija na površini zida.
- sadržaj vlage** količina vode u zidu najčešće izražena u masenim postocima. Označuje se grčkim slovom ψ (Ψ). Rjeđe se rabi u obliku volumnih postotaka.
- salitra** (lat. *sal nitrum*), staro ime za soli nitratre kiseline (*nitrate*). Često se neispravno rabi kao naziv za soli koje kao posljedica vlage iscvjetavaju na zidu bez obzira na njihov kemijski sastav.
- sanacija** liječenje, ozdravljanje; postupak za vraćanje zgrade u zdravo, funkcionalno stanje bez znakovna štetnih za zgradu i njezine korisnike.
- saturacija** zasićenost.
- sedimentacija** taloženje fino raspršenih čestica iz neke tekućine djelovanjem gravitacije.
- soli** spojevi nastali reakcijom kiseline i lužine. Otapanjem u vodi tvore ione: anione i katione.
- spoj** tvar koja se sastoji od atoma ili iona dvaju ili više različitih elemenata u određenim omjerima i stoga se može prikazati kemijskom formulom. Spojevi imaju različita svojstva od elemenata od kojih su sastavljeni.
- stupanj provlaženosti zida** udio pornoga prostora koji je ispunjen vodom, a izražava se u postocima kao odnos trenutačnog sadržaja vlage i maksimalne moguće vlage.
- subfluorescencija** pojava kristalizacije, odnosno iscvjetavanja topljivih soli u strukturi građevnog materijala, za razliku od fluorescencije gdje soli kristaliziraju na površini zida.
- suspenzija** sustav u kojemu su gušće čestice tvari manjeviše jednolično raspoređene po tekućini ili plinu manje gustoće, a stajanjem se ne talože.
- temperaturni gradijen** razlika temperature između dviju točaka podijeljena s razmakom tih točaka.
- termohigrograf** sprava za registriranje temperature i relativne vlage zraka kroz neko duže razdoblje. Postoje tjedni i mjesečni termohigrografi.
- trasiranje vode** bojenje vode radi utvrđivanja njezina toka. Najčešće se provodi *uraninom* (natrij fluorescein), koji otopljen u vodi čak i u velikim razrjeđenjima daje fluorescirajuće zeleno obojenje. Neškodljiv je za žive organizme.
- vlaga** voda sadržana u krutoj tvari ili zraku.
- žbuka** materijal za prekrivanje i izravnavanje gole površine zidova i stropova, koje se izvodi radi higijenskih, estetskih i termičkih razloga. Prema sastavu može biti: vapnena, cementna, produžena, sadrena, plastična, šamotna. Danas se najčešće nanosi u tri sloja: špric, gruba žbuka i fina (završna) žbuka.
- žrtvovana žbuka** (njem. *Opferputz*; engl. *sacrificial render*), žbuka koja se privremeno nanese na zid kontaminiran topljivim solima radi izvlačenja soli. Postupak nanošenja i uklanjanja žbuke ponavlja se do zadovoljavajućeg rezultata desalinizacije.
- x-difrakcija v. rentgenska difraktometrija.**

Popis autora fotografija abecednim redom. U zagradi su brojevi fotografija:

V. Barac (24, 36), N. Belčić (73), R. Čepelak (31), D. Dokić (3), B. Floriani (49a, 54), T. Klobučar (24, 25), H. Malinar (16, 19, 27, 46c, 48a, 67, 77), dr. I. Maroević (7), D. Mu-

dronja (20, 43a, 43d, 43e), N. Orčić (28), D. Penović (4, 17, 18), I. Srša (11), J. Škudar (23), M. Tomičić (2, 12).

Crteže izradio: Davor Malinar

