



V. Kikas

Põlevkivituuhk-  
ehitus-  
materjalid

Tallinn 1969

TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT  
Ehituskonstruksioonide kateeder

V. K i k a s

PÕLEVKIVITUHK-EHITUSMATERJALID

Tallinn  
1969

TARTU ÜLIKOOL  
RAAMATUKOOL

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
Кафедра строительных конструкций  
Кижас Вернер Хансович

СЛАНЦЕЗОЛЬНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
На эстонском языке

Loengukonspekt "Põlevkivituhk-ehitusmaterjalid" on ette nähtud TPI Ehitusteaduskonna

tööstus- ja tsiviilehituse (eriala nr. 1202), kütte ja ventilatsiooni (1208), veevarustuse ja kanalisatsiooni (1209), autoteede (1211) ning ehitusdetailide ja konstruktsioonide tootmise (1207) eriala üliõpilastele.

Loengukonspekti "Põlevkivituhk-ehitusmaterjalid" see osa, mis on teksti serval märgitud vertikaaljoontega, ei ole kohustuslik erialadele 1202, 1208, 1209 ja 1211.

TARTU ÜLIKOOLI  
RAAMATUKOGU

## S i s s e j u h a t u s

Esti NSV tähtsaim maapõuevara põlevkivi paikneb vabariigi kirdeosas ligikaudu 3500 km<sup>2</sup> territooriumil ning selle geoloogilisi varusid hinnatakse ligi 10 miljardile tonnile.

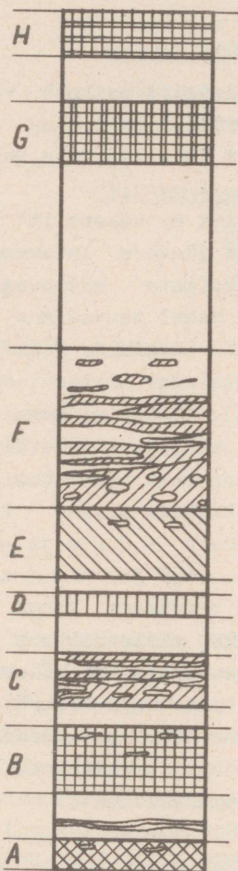
Geoloogiliselt kuulub meie põlevkivi e. kukersiit\* keskordoviitsiumi ladestu uhaku, kukruse ja idavere lademesse. Põlevkivi kui settekivim on maapõues üksikute mitmesuguse paksusega kihtidena. Põlevkivikihtide vahel asuvad kas lubjakivi, merglise või bituumse lubjakivi vahekihid. Põlevkivikihtide üldarv on kuni 8, mida tähistatakse alates lademe põhjast tähtedega A, B...H (vt. joon.1). Põlevkivi kompleksi paksus basseini keskosas on ~5 m, kusjuures põlevkivikihtide kogupaksus on selles ~60%. Olenevalt kaevandamise viisist, võetakse põlevkivi välja kas kihtide A...E või A...F kaupa. Nende kogupaksus on vastavalt ~2,2 m ja ~3,2m, põlevkivikihtide paksus aga vastavalt ~1,5 ja ~2,5 m.

Põlevkivi on kuivalt helepruunika värvusega kerge ja pehme kivim. Tema orgaaniline osa pärineb siniroheliste vetikate jäänukest. Peale orgaanilise osa sisaldab põlevkivi suurel hulgal anorgaanilist materjali, mis koosneb karbonaatsest ja terrigeensest osast. Karbonaatne komponent moodustab veekogudes ning on organogeense päritoluga, terrigeenne materjal koosneb aga mandrikivimite laguproduktidest.

Põlevkivi kasutatakse keemiatööstuse toorainena ja järjest rohkem energeetilise kütusena. Kütusena kasutatavas 3-nda sordi põlevkivis on anorgaanilist osa, sõltuvalt rikastamise astmest, 65...75%. Põletamisel laguneb karbonaatne osa ning CO<sub>2</sub> lendub, mistõttu mineraalset tuhka tekib 46...51% põlevkivi kaalust. Seega on põlevkivi üks tuharikkamaid kütuseid. Seevastu kivisüte tuhasisaldus on tavaliselt vaid

---

\* Kukersiidi, meie põlevkivi nimetus tuleneb kohanimest Kukruse .



Joonis 1. Põlevkivilademe läbilõige.

Uurimised intensiivistusid eriti 1949.a. alates, kui meie vabariigis mindi üle uuele efektiivsele põlevkivitolmu- na põletamisele tolmküttekolletes ja hakkas suurel hulgal

10...20%. See asjaolu paistab suuresti komplitseerivat põlevkivi kasutamist kivisütega võrreldes. Põlevkivi puhul on aga olemas mõistlik lahendus selle kompleksse kasutamise näol: peale orgaanilise osa kasutatakse täielikult ära ka tuhka kas ehitusmaterjalide saamiseks või põllumajanduses põldude lupjamiseks. Põlevkivi kompleksse kasutuse korral töötab põlevkivitööstus kõrge rentaablusega.

Põlevkivituha kui ehitusmaterjali süstemaatilised uurimised algasid Eesti NSV-s 1940.a., mis katkesid Suure Isamaasõja päevil ning jätkusid uuesti 1944.a. Tallinna Polütehnilises Instituudis prof. O.Maddisoni juhtimisel.

Nendesse uurimustesse lülitus 1947.a. asutatud praegune Eesti NSV Ministrite Nõukogu Ehituskomitee Ehituse Teadusliku Uurimise Instituut. Algul oli uurimise objektiks põlevkivi restkolletes kihispõletamisel saadav koldetuhk. Nendele töödele tuginedes ehitati 1948.a. Tallinna esimene põlevkivituhk-sideainete tehas "Kukermiit".

tekkima kvaliteetset lendtuhka, mis on igati sobiv mitaesuguste ehitusmaterjalide saamiseks. Praegu tekib põlevkivi tolmuna põletamisel ~3 milj. tonni lendtuhka. Lähemal aastail see hulk kahekordistub. Lendtuha peenimat fraktsiooni kasutatakse 1960.a. alates tsemenditehases "Punane Kunda" kõrgemargilise portlandtsemendi saamisel lisandina. Samal aastal hakkas Ahtme Ehitusmaterjalide Kombinaat tootma lendtuha jäme fraktsioonist põlevkivituhk-gaasbetoon-ehitusdetalle. Lähemal ajal hakkab seda tegema ka Balti Ehitusmaterjalide Kombinaat. Teaduslik-tehnilised alused põlevkivituhk-ehitusmaterjalide saamiseks ja kasutamiseks on välja töötatud Tallinna Polütehnilise Instituudi ehitusmaterjalide teadusliku uurimise laboratooriumis (edaspidi lühendatult TPI ETUL) ja Eesti NSV Ministrite Nõukogu Riikliku Ehituskomitee Ehituse Teadusliku Uurimise Instituudis (edaspidi lühendatult ETUI).

## I. PÕLEVKIVI KUUMUTUSJÄÄGID

### 1. Põlevkivi anorgaanilise osa koostis

Keemiline ja mineraloogiline koostis. Põlevkivi mineraalse osa põhilisteks komponentideks on kaltsium ja räni. Peale selle sisaldab põlevkivi veel alumiiniumi, rauda, magneesiumi, leelismetalle ja väävlit. Kütusena kasutatava põlevkivi mineraalosa keemiline koostis protsentides on järgmine:

CaO	- 43...57,	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 4...6,5,
SiO <sub>2</sub>	- 23...30,	MgO	- 4...6,
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	- 5... 8,	K <sub>2</sub> O	- 2,5...4,0,
		S'	- 2,5...3,5.

Hüdrauliliste sideainete koostise iseloomustamiseks kasutatakse hüdro moodul  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$  on põlevkivi mineraalosal

\* Arvestatult kuumutatud aine kohta.

1,0...1,7, mis on keskmiselt suuresti madalam kui portlandtsemendil (1,9...2,4), kuid tunduvalt kõrgem kui Nõukogude Liidu teiste leiukohtade põlevkividel (0,4...1,2). Põlevkivi anorgaanilise osa tähtsamateks mineraalideks on kaltsiit, dolomiit, kvarts, ortoklass, hüdrovilgud ja püriit.

Mineraalide jaotus. Hüdrauliliste sideainete saamisel on peale tooraine keemilis-mineraloogilise koostise veel suur tähtsus üksikute mineraalide dispersusel ja jaotuse ühtlusel, s.t. mineraalosa homogeensusel. Paremini homogeniseeritud toorainest saab kõrgemargilise sideaine. Põlevkivi anorgaanilise osa komponendid, lubjakivi ja terrigeenne materjal on aga jaotunud ebaühtlaselt ning see on isegi palja silmaga selgesti nähtav (vt. joon.2). Põlevkivis esinevad lubjakivi osakesed võib suuruse järgi liigitada kahte rühma:



Joonis 2. Põlevkivi karbonaatse osa jaotuse ühtsus.

rohkem  $\text{CaCO}_3$  kui mujal. Näiteks põlevkivi ühe tüki eri osades, mis on teineteisest kõigest mõne sentimeetri kaugusel, erineb hüdro moodul kuni 10 korda.

a) jäme osa, kus lubjakivi tüki mõõtmed on tavaliselt üle mõne sentimeetri, nagu lubjakivi õhukesed katkendlikud vahelihikesed ning mitmesuguse kuju ja suurusega mügarikud;

b) peen osa, kus lubjakivi tükid on valdavalt alla 0,5...1 cm, nagu mereloomakeste kivistunud kestad ja skeletid (paksus 0,1...0,5 mm, pikkus 2...3 mm kuni 10...15 mm) ning kaltsiidi kristallid (5...50  $\mu\text{m}$  kuni 2...3 mm).

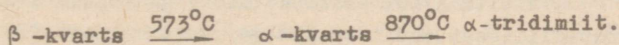
Peale lubjakivi loomakaalsete kuhjatiste esineb veel selle piirkondlikke kuhjatise, s.t. ühes teatavas piirkonnas leidub tunduvalt

## 2. Muutused põlevkivi anorgaanilise osa kuumutamisel

Põlevkivi kuumutamisel toimub selle anorgaanilise osa mineraalides rida füüsikalis-keemilisi muutusi. Kõigepealt aurub füüsikaliselt seotud vesi (vaba vesi, adsorptsiooni-vesi). Pärast seda lahkub mineraalidest keemiliselt seotud vesi. Edasi muunduvad ning lagunevad üksikud mineraalid ja seejärel reageerivad mineraalide laguproduktid osaliselt omavahel, mille tulemusena tekivad uusühendid. Põlevkivi ja selle kuumutamisel tekkivate mineraalsete uusühendite koostist ning kivinemise protsesse on uurinud H. Mändmets, N. Dilaktorski, E. Piksarv, autor jt.

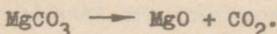
1. Hüdrovilkudest eraldub keemiliselt seotud vesi 450...700°C juures. Edasi 800...1000°C juures hüdrovilkude kristallid lagunevad ning amorfiseeruvad ja 1000...1200°C juures sulavad. Lubjaga reageerides tekivad esmalt hüdrauliliselt aktiivsed mineraalid  $\beta\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ja  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ . Sulanud osa annab klaasifaasi.

2. Kvartsis toimuvad 573° ja 870°C juures järgmised polümorfised muutused:



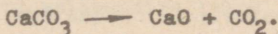
Nimetatud temperatuuride juures suureneb kvartsi maht ning väheneb tihedus. Näiteks kui  $\beta$ -kvartsi erikaal on 2,65 g/cm<sup>3</sup>, siis  $\alpha$ -tridimiidil on see kõigest 2,28 g/cm<sup>3</sup>. Nende järskude muutuste ajal on materjal ergastatud olekus ning reaktiivsioonivõimekam. Lubjaga reageerides tekib primaarselt  $\beta\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ .

3. Dolomiidis  $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$  dissotsieerub kõigepealt  $\text{MgCO}_3$  650...750°C juures:



$\text{CaCO}_3$  osa dissotsieerub 800...900°C juures.

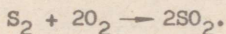
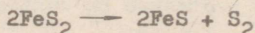
4. Puhas  $\text{CaCO}_3$  hakkab märgatavalt dissotsieeruma 750...800°C alates ning  $\text{CO}_2$  rõhk saavutab atmosfääri rõhu ~900°C juures:



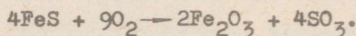
Mitmesuguste lisandite manusel intensiivistub tunduvalt  $\text{CaCO}_3$  dissotsiatsioon. Näiteks savi tõttu algab merglistes lubjakivides juba alates  $700\text{...}750^\circ\text{C}$  küllaltki intensiivne  $\text{CaCO}_3$  lagunemine.

5. Ortoklass ( $\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ ) laguneb  $1170^\circ\text{C}$  juures leitsiidiks ( $\text{K}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$ ) ja vabaks ränihapendiks. Leitsiit sulab ja annab klaasifaasi. Lubjaga reageerivad ortoklassi laguproduktid annavad esmaselt  $\beta 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ .

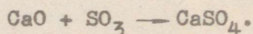
6. Püriidi lagunemine algab  $570^\circ\text{C}$  juures:



FeS oksüdeerub  $800^\circ\text{C}$  juures  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ja  $\text{SO}_3$ -ks:



Edasi  $\text{SO}_3$  reageerib lubjaga ja annab kipsanhüdridi:



Põlevkivituha kui sideaine omadused sõltuvad uusühendite hüdrauilisest aktiivsusest ja nende hulgest.

Uusühendite hüdrauiline aktiivsus sõltub nende ühendite keemilis-mineraloogilisest koostisest ja füüsikalisest seisundist.

Keemilis-mineraloogilise koostise mõju väljendub eriti ilmekalt kaltsiumi ja räni ühendite puhul. Kaltsiumsilikaat on seda suurema hüdrauilise aktiivsusega, mida kõrgem on selle lubjasisaldus.

Nii on  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  suure hüdrauilise aktiivsusega ning kiiresti kivinev,

$\beta 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  aga keskpärase hüdrauilise aktiivsusega ning aeglaselt kivinev,

$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$  ja  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ei ole praktiliselt sideaineliste omadustega ning nad on inertsed.

Kaltsiumi ja alumiiniumi ühenditest on aga suurima hüdraulilise aktiivsusega lubjavaeseim mineraal  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Lubjarikkamad kaltsiumaluminaadid on seevastu vähem väärtuslikud, kuid mitte inertsed.

Uusühendite füüsikaline seisund kui nende aktiivsuse üks määravaid tegureid oleneb tooraine põletustugevusest ja legeerivate ainete manusest.

Uusühendi põletustugevus sõltub omakorda kuumutustemperatuuri suhtelisest kõrgusest selle temperatuuripiirkonna alumise nivoo suhtes, kus tekib uusühend, ja kuumutuse kestusest. Kuna iga uusühend tekib ainult temale vastavas kindlapiirilises temperatuuri intervallis, siis ei saa erinevate uusühendite põletustugevuse hindamisel lähtuda kuumutuse absoluutsest temperatuurist, vaid siin tuleb arvestada kuumutustemperatuuri taset ühendi eelnimetatud tekkeintervalli alumisest piirist. Füüsikalise seisundi poolest on uusühend seda aktiivsem, mida nõrgemal põletusel see saadi ehk mida madalam oli selle kuumutuse suhteline temperatuur ja mida lühem oli kuumutamise kestus.

Legeerivad lisandid muudavad uusühendi kristallstruktuuri, kutsudes esile polarisatsiooninähtusi ning struktuuri deformatsioone, mille tagajärjel tõuseb ühendi aktiivsus. Näiteks  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  puhul mõjub legeerivana  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  või  $\text{BaO}$  väike (0,1...0,5%) manus, mis tunduvalt tõstab selle mineraali hüdraulilist aktiivsust.

Uusühendite füüsikalist seisundit iseloomustavad tema poorsus, pooride suurus ja kuju ning kristallide suurus ja struktuur. Praktikas hinnatakse materjali füüsikalist seisundit tavaliselt poorsuse ja eripinna näitajate kaudu.

Sideainete tooraine sobivaima põletusrežiimi valikul peab silmas pidama uusühendite moodustumise kineetikat kuumutamise vältel. Seejuures tekib paljude mineraalide puhul nendest koostatud segudes komponentidevahelisel ühinemisel mitte üks, vaid mitmeid erisuguse koostisega uusühendeid. See tekkeprotsess kulgeb omapäraselt, astmete kaupa. Nii moodustub lõplik uusühend rea vahepealsete astmete järgi, s.o. alles pärast mitmete eelühendite teket.

Lõpliku uusühendi koostis oleneb segus olevate komponentide vahekorras. Eelnevate ühendite koostis ega tekke järjekord ei olene aga sellest, vaid üksnes komponentide liigist. Nii tekib teatud liiki komponentide vahelisel ühinemisel primaarselt alati ainult üks kindla koostisega uusühend, mis erineb teistest selles süsteemis esineda võivatest uusühenditest selle poolest, et tal on tavaliselt kõrgeim kristallisatsioonitemperatuur.

Näiteks mistahes vahekorras võetud  $\text{CaO}$  ja  $\text{SiO}_2$  segude kuumutamisel tekib alati primaarselt keskpärase aktiivsusega  $\beta\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ . Lõpliku uusühendi koostis oleneb aga juba  $\text{CaO}$  ja  $\text{SiO}_2$  vahekorras lähtesegus. Nii tekib võrdsetes molekulaarsetes hulkades võetud  $\text{CaO}$  ja  $\text{SiO}_2$  segu kuumutamisel pärast primaarset  $\beta\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  veel  $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$  ja pärast seda lõplik uusühend  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ . Kui aga  $\text{CaO}$  ja  $\text{SiO}_2$  molekulaarne suhe on nagu 3:1, siis tekib kuumutamisel  $\beta\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  baasil lõpliku uusühendina suure aktiivsusega  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ .

Paljukomponendiliste segude, nagu portlandtsemendi tooraine ja põlevkivi anorgaaniline osa, kuumutamisel tekivad primaarselt  $\beta\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ja vaba  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  segu, mis on hüdrauliliselt aktiivsed. Lõplike uusühendite koostis ja aktiivsus olenevad segu hüdroomodulist.

Lubjavaese tooraine puhul, nagu põlevkivi anorgaaniline osa, on sekundaarsed faasid kas väikese hüdraulilise aktiivsusega või hoopis inertsed ( $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , geleenit, anortit). Lubjarikka tooraine, nagu portlandtsemendi puhul, mille hüdroomodul  $> 1,9$ , tekib aga lõpliku ühendina suurima aktiivsusega kaltsiumsilikaat  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ .

Lubjavaesest toorainest saab head sideainet siis, kui seda põletada vaid sedavõrd, et tekiks põhiliselt primaarsed uusühendid. Selleks tuleb põlevkivi anorgaanilist osa kuumutada võimalikult madalal temperatuuril, näiteks  $750\ldots 850^\circ\text{C}$  juures 30...60 min. Portlandtsemendi lubjarikast toorsegu tuleb aga põletada hoopis kõrgemal temperatuuril, kuna alles  $1300\ldots 1450^\circ\text{C}$  juures 30...60 min. vältel tekib lõpuks portlandtsemendi kõige hinnalisem mineraal  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ .

Kui põlevkivi anorgaanilist osa kuumutada samadel tingimustel nagu portlandtsemendi segu, saadakse praktiliselt inertne materjal.

Põlevkivi põletamisel suurtes tööstuslikes kolletes, kus maksimaalne temperatuur ulatub kuni 1350...1450°C, saadakse heade sideaineliste omadustega tuhk vaid sel juhul, kui kuumutus kestab äärmiselt lühikest aega, kõigest kuni paar sekundit; ainult sel juhul säilivad hüdrauliliselt aktiivsed primaarsed uusühendid.

Uusühendite hulk. Põlevkivi energeetilisel põletusel kuumeneb materjal vaid sedavõrd, et anorgaaniline osa sulab ainult vähesel määral ning enamik uusühendeid tekib tahkes faasis. Seejuures moodustuvad uusühendid põhiliselt, nagu portlandtsemendigi põletusel, heterogeensetes süsteemides valitsevate seaduspärasuste järgi.

Kui homogeensetes süsteemides, näiteks sulamites ja lahustes, on reageerivad ained omavahel täielikus kontaktis ning keemiline ühinemine võib üheaegselt aset leida süsteemi mistahes punktis, siis heterogeenses süsteemis võivad ained ühineda vaid faaside kokkupuutepindadel piiratud ulatuses.

Heterogeenses süsteemis kulgeb reaktsioonist osavõtvate komponentide ühinemine difusiooni teel, kus reaktsiooni kiirus ning ulatust ei määra mitte komponentide kontsentratsioon, nagu homogeenses süsteemis, vaid faasidevahelise piirpinna suurus ja ka komponentide füüsikaline seisund. Seepärast sõltuvad põlevkivi energeetilisel põletusel selle anorgaanilises osas moodustuvate uusühendite tekke kiirus ning ulatus põhiliselt põlevkivi mineraalosa komponentide peenuusest ning nende kokkupuutepinna suurusest.

Kuna põlevkivi anorgaaniline osa on suhteliselt madala lubjasisaldusega, siis peavad põletuse tingimused olema sellised, et tekiks põhiliselt esmased uusühendid. Et põlevkivi energeetilisel põletusel valitsevad küllaltki kõrged temperatuurid (kuni 1450°C), siis annab tööstuslikest kolletest suurima hüdraulilise aktiivsusega tuhka vaid tolmküttekolle, kus tuha osiste kuumutus kestab kõigest 2...4 sekundit.

Põlevkivi koostise ebaühtlusest ja põletuse tingimustest sõltuvana koosneb põlevkivituha konglomeraat rohketest ühenditest, mida võib tekkeloo järgi klassifitseerida kolme rühma:

1. Uusühendid, mis on tekkinud mineraalide laguproduktide vahelisel ühinemisel. Peamisteks ühenditeks on siin:  $\beta$ -dikaltsiumsilikaat  $\beta 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , monokaltsiumaluminaat  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , anhüdriit  $\text{CaSO}_4$  ja klaasifaas.

2. Uusühenditeks on mineraalide üksikud laguproduktid, mis pole omavahel reageerinud. Siin on tuntumateks vaba luubi, vaba magneesiumoksiid ja veel leutsiit, kaoliniitanhüdriid ning amorfne  $\text{SiO}_2$  ja  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

3. Termiliselt muundumata osa koosneb peamiselt kaltsiumkarbonaadist, kvartsist ja veel vähesel hulgal ortoklasist.

Põlevkivituha hüdraulilise aktiivsuse tingivad eel- loetletud uusühendid, mille koostis vastab mitmesuguste tuntud sideainete koostisele. Nii sisaldab põlevkivituha tsemendi mineraale, lupja, kipsanhüdriiti, putsolaanset ja šlaki kivinemist tingivaid ühendeid.

Põlevkivituha hüdrauliline aktiivsus oleneb nende uusühendite koostisest ning absoluutsest ja suhtelisest hulgast. Uusühendite hulk on põlevkivituhas 70...90%. Ülejäänud osa 30...10% on tavalise temperatuuri juures kivinemisel põhiliselt inertne (vaata eelnimetatud 3-nda rühma üendid).

### 3. Põlevkivi tööstuslikul kasutamisel tekkivad jäägid ja põlevkivituhad

Põlevkivi kasutamisel keemiatööstuses ja elektrijõujaa- mades tekivad jäägina põlevkivikoksid ja -tuhad.

Põlevkivikoks. Põlevkivist gaasi saamisel kuumutatakse põlevkivi kamberahjus  $800\text{...}900^\circ\text{C}$ . Tekkiv jääk, põlevkivi- koks, sisaldab orgaanilist osa keskmiselt 15%. Ehkki koks on sideaineliste omadustega, ei ole teda orgaanilise osa suure sisalduse tõttu otstarbekas kasutada ehitusmaterjalide valmistamiseks.

Põlevkivi poolkoks. Põlevkivist vedelproduktide saamisel utmise teel tunnelahjus kuumutatakse põlevkivi kuni 500°C. Utmise jääk, poolkoks, sisaldab orgaanilist osa keskmiselt 10%. Töötlemise madala temperatuuri tõttu pole poolkoksil sideainelisi omadusi.

Põlevkivituhk. Põlevkivituha all tuleb mõista põlevkivi termilisel töötlemisel tekkivat mineraalset jääki, mille karbonaatide lagunemise aste on vähemalt 25% ja mis sisaldab orgaanilist osa ülimalt 5%. Nende näitajate alusel võib põlevkivituhkasid orienteeruvalt klassifitseerida veel ka järgmisse kolme kvaliteedirühma (vt. tabel 1).

Esimesse rühma kuuluvail tühkadel on karbonaatide lagunemise aste suurim, >90%, ja orgaanilise osa sisaldus minimaalne, ≤ 0,5%. Põlevkivi põletamisel tekkivad lendtuhad rahuldavad enamuses neid nõudeid. Selle rühma tuhast võib saada kvaliteetseid kesk- ja kõrgemargilisi sideaineid, tsemente ning betoone.

T a b e l 1

Põlevkivituhkade klassifikatsioon karbonaatide lagunemise astme ja orgaanilise aine sisalduse järgi

Põlevkivituha kvaliteedirühm	Põlevkivituha		Kvaliteedirühmadesse kuuluvate põlevkivituhkade loetelu
	karbonaatide lagunemise aste %-des	orgaanilise aine sisaldus %-des	
Esimene	>90	<0,5	Küttekollete lendtuhad
Teine	>70...90	>0,5...2	Küttekollete kolde- tuhad
Kolmas	25...70	>2...5	Gaasigeneraatoris ja tahkes soojakandjas põlevkivi utmisel tek- kiv tuhk ning küttekollete halvasti läbipõlenud koldetuhad

Hiljem näeme, et lendtuha otstarbekama kasutamise huvides tuleks teda detailsemalt klassifitseerida kolmeks fraktsiooniks. See toimub terastiku ja keemilis-mineraloogilise koostise järgi.

Teise rühma tuhmade karbonaatide lagunemise aste on >70...90% ja orgaanilise aine sisaldus >0,5...2%. Neile nõuetele vastavad küttekollete jämedateralised tuhad, nn. koldetuhad. Selle rühma tuhast võib saada madala- ja keskmargilisi sideaineid ning mörte ja betoone.

Kolmanda rühma tuhkaudel on karbonaatide lagunemise aste 25...70% ja orgaanilise aine sisaldus >2...5%. Neile nõuetele vastavad põhiliselt need tuhad, mis tekivad põlevkivist vedelproduktide tootmisel gaasigeneraatori ja tahke sooja- ja külmaenergia tootmisel. Siia rühma kuuluvad osalt ka küttekolletest saadavad halvasti läbipõlenud koldetuhad.

Selle rühma tuhad on kasutatavad vaid kitsapiiriliste kasutusalaadega madala- ja keskmargiliste sideainete ning mörtide ja betoonide saamiseks.

Eeltoodust selgub, et põlevkivituhad tekivad põlevkivi tarbimise jäätina nii keemiatööstuses kui ka elektrijõujaamades. Paremate sideaineliste omadustega on elektrijõujaamadest saadavad tuhad. Need tekivad põlevkivi põletamisel katelseadmete küttekolletes, kus põletustemperatuur on kuni 1350...1450°C. Suurem osa sellest tuhast on hästi ühtlaselt läbi põlenud. Olenevalt põletuseviisist sisaldavad energiatilisel põletusel saadavad tuhad kas suhteliselt vähe või üldse mitte orgaanilist osa. Nende põlevkivituhkade valdava enamuse, nn. lendtuhkade sideainelised omadused on palju paremad nii küttekolletes saadavate jämedate tuhkade kui ka keemiatööstuses tekkivate põlevkivijääkide omadustest.

Tabelis 2 on esitatud andmeid põlevkivi kasutamisel tekkivate tähtsamate jääkide kohta.

T a b e l 2

Põlevkivi tööstuslikul kasutamisel tekkivad  
jäagid

Jäägi nimetus	Tehnoloogilise protsessi nimetus	Kuumutus-temperatuur ulatub kuni °C	Orgaanilise aine keskmine sisaldus jäägis %des	Jäägi hulk aastas milj.t
Põlevkivikoks	Gaasistamine kamberahjus	800...900	15	0,8
Põlevkivipoolkoks	Utmine tunnelahjus	500	10	0,15
Põlevkivituhk	Utmine gaasigeneraatoris	900	5	1
	Põletamine küttekolletes	1350...1450	Kuni 2*	5

Edaspidi vaadeldakse põlevkivi energeetilisel kasutamisel tekkivaid tuhkasid ja nendest eriti üksikasjalikult nn. lendtuhkasid, mis on kõige perspektiivsemad kaasaegsete ehitusmaterjalide saamiseks. Meie vabariigi elektrijõujaamades on põlevkivi senini põletatud kahel viisil: kihispõletuse viisil restkolletes ja tolmana põletuse viisil tolmküttekolletes. Kihispõletus on vanem, tolmana põletus aga on uus efektiivne põlevkivi energeetilise kasutuse viis. Tolmana põletusele hakati meie vabariigis üle minema 1949.aastal. Praegu on see põletusviis meil peaaegu ainuvalitsev.

Restkolletest saadud tuha baasil loodi meie vabariigis põlevkivituhk-ehitusmaterjalide tööstus. Ehituskivide tootmist alustati juba 1930.a., põlevkivituhk-sideainete tootmist aga 1948.a. Veidi hiljem alustati ka mullbetoonide tootmist.

Restkolletes põletatakse tükilist (suurusega kuni 25 mm) põlevkivi 20...30 cm paksuse kihina, mis viibib põletustsoonis 30...50 min. Sellest koldest saadakse kahesugust tuhka:

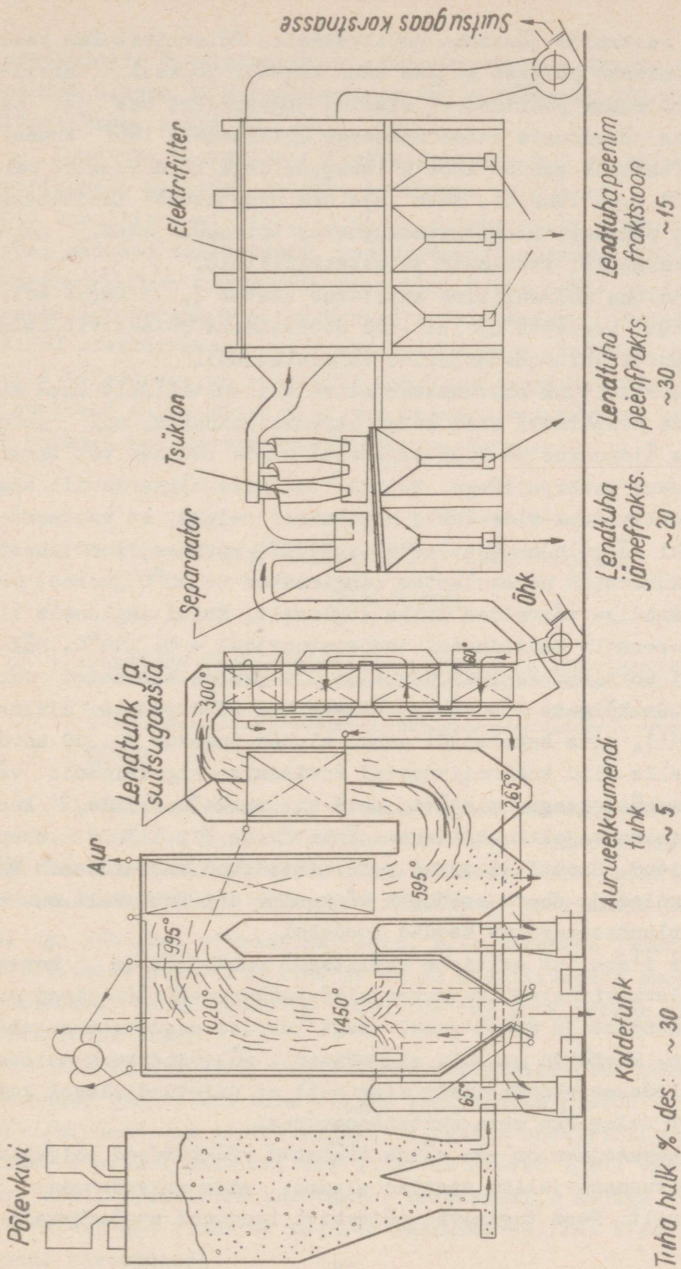
\* Jäme tuhk (tera  $\varnothing > 0,5$  mm) sisaldab orgaanilist ainet kuni 2%, lendtuhk orgaanilist osa praktiliselt ei sisalda.

esiteks, resti pealt jämedatükilist, nn. koldetuhka (~ 97% kogu tuhast), ja, teiseks, kolderuumist koos suitsugaasidega väljunud peeneteralist, nn. lenttuhka (~ 3% kogu tuhast). Restkolde jämetuhk on ebaühtlase koostisega. Ta sisaldab esmaste aktiivsete uusühendite kõrval suhteliselt suurel hulgal sekundaarseid väheaktiivseid uusühendeid. Viimased on tekkinud pikaajalise tugeva põletuse tagajärjel ja moodustavad tuhas paakunud massi. Peale selle on jämetuhas, vaatamata selle pikaajalisele põlemisele, sageli küllaltki suurel hulgal termiliselt lagunemata lubjakivi ja koksi. Seetõttu on restkolde jämetuhk üheks madalama hüdraulilise aktiivsusega põlevkivituha liigiks. Restkolde lenttuhk aga seevastu on üks aktiivsemaid, kuid tal ei ole praktilist tähtsust liialt väikese hulga tõttu.

Restkolde jämetuha jahvatamisel kuulveskites saadud põlevkivituhk-sideainet nimetati kukermiidiks. Kukermiit rahuldab muldniiske mördiga katsetatult põhiliselt margi "50" nõuded. Kukermiidi marki tõsteti sel teel, et tuhale manustati jahvatamisel 20...30% hüdraulilisi lisandeid. Sel viisil saadud "vääristatud kukermiit" rahuldab peamiselt margi "100" nõuded. Neid kukermiite kasutati peamiselt mördi sideaineks, vähemal määral vahtbetooni valmistamiseks, lisandina portlandtsemendile betoonis või raudbetoonis ja peentäitematerjalina asfaltbetoonis. Kukermiidid olid suhteliselt aeglaselt kivinevad ja madalamargilised sideained. Nendest valmistatud tooted olid üldiselt vähese külmutuskindlusega ja kuivamisel kahanesid ülemäära palju. Nimetatud omadused piirasid kukermiittoodete kasutusalasid. Restkolde jämetuhast valmistatud kukermiite toodeti 1948...1961.a. üle 500 000 t.

Tolmküttekolletes (vt. joon.3) põletatakse põlevkivi peene tolmana hõljuvas olekus. Tolmutera suurus on põhiliselt alla 0,2 mm. Põlemisel langevad põlevkivitolmu jämedamad osakesed suhteliselt vähe läbipõlenult alla kolde põhja. Seda tuha osa nimetatakse koldetuhaks (~ 30% kogu tuhast). Koldetuha hüdrauliline aktiivsus on võrdlemisi madal, vastates li-

\* Edaspidised andmed põlevkivituhk-sideainete aktiivsuse kohta on toodud plastse mördi katsetulemuste põhjal, mis on keskmiselt 2 korda vaiksemad kui muldniiske mördi puhul.



Joonis 3. Põlevkivi tolmküttekoldes tekkivad tuhaliigid.

gikaudu restkolde jämetuha aktiivsusele. Põlevkivitolmu peenemad osakesed põlevad koldes mõne sekundi jooksul täielikult. Järelejääv peentuhk ei sisalda orgaanilist osa ja on, võrreldes jämedamate koldetuhkadega, ühtlasemalt läbi kuumutatud. Peentuhk kandub koos suitsugaasidega kolderuumist välja (~70% kogu tuhast). Seda tuha osa nimetatakse lendtuhaks ning see püütakse kinni mitmesugustes tolmpüüdjates, nagu sadestuskambrid, tsüklonid ja elektrifiltrid.

Lendtuha hüdrauliline aktiivsus ületab 2...5 korda koldetuha oma. Seetõttu on lendtuhk sobivaimaks põlevkivituhaks mitmesuguste ehitusmaterjalide valmistamisel.

Põlevkivituhk-ehitusmaterjalide kui suhteliselt uute materjalide kvaliteeti saab kõige paremini hinnata, kui neid võrrelda üldtuntud ja kaua kasutusel olnud lubjast või tsemendist saadud materjalidega. Näiteks tootmise algperioodil saadud põlevkivituhk-sideainete hindamisel selgus, et vaatamata küllaltki kõrgele margile ("75"... "150"), kivines lendtuhast saadud kukermit normaalsetes tingimustes ( $\leq 20^{\circ}\text{C}$  juures) portlandtsemendiga võrreldes liiga aeglaselt. Eriti aeglaselt kivines kukermit madalamatel temperatuuridel -  $0...10^{\circ}\text{C}$ . Näiteks kui portlandtsemendi puhul on  $0^{\circ}\text{C}$  juures kivilinenud mördi tugevus kõigest 25% võrra väiksem kui  $20^{\circ}\text{C}$  juures kivilinenud mördil, siis kukermiidi puhul alanes tugevus 5...10 korda. Peale selle olid kukermittooted kivilinemise algperioodil vähese veespüvisusega, mistõttu neid oli raske hooldada, kuna kivilinemiseks vajaliku niiskuse säilitamine oli liialt komplikseeritud. Samuti ei olnud kukermittooted küllaldaselt kulumuskindlad ja nende omaduste kõikumine oli tunduvalt suurem kui portlandtsemendist saadud toodetel.

Oli ilmne, et selliste kvaliteedi puudujääkide korral pole põlevkivituhk-ehitusmaterjalid konkurentsivõimelised portlandtsemendist ja mõnel juhul isegi lubjast saadavate materjalidega. Seetõttu suhtuti algperioodil põlevkivituhk-ehitusmaterjalidesse skeptiliselt ning neil ei paistnud olevat kuigi suurt tulevikku meie ehitustööstuses.

Praegusajaks on aga välja töötatud efektiivsed põlevkivituhk-ehitusmaterjalide saamise alused, mida rakendatakse laialdaselt. Need tuginevad põlevkivi lendtuha otstarbekale

kasutamisele fraktsioonidena. Põlevkivituha fraktsioonide saamise alused ja tehnoloogia on välja töötanud TPI ETUL-is E.Kogermann, autor jt.

Lendtuha jaotamisega fraktsioonideks on võimalik saada soovikohase koostise ja vähe kõikuvate omadustega erisuguseid tuhaliike, mis sobivad hästi mitmesuguste ehitusmaterjalide, näiteks mullbetooni, raskebetooni, madala-, kesk- ja kõrgemargiliste tsementide saamiseks. Peale selle on lendtuha fraktsioonide puhul mitmesugused valmistamise tehnoloogia võtted efektiivsemad kui fraktsioneerimata lendtuha korral. Selle tulemusena on põlevkivi lendtuha fraktsioonidest valmistatavad ehitusmaterjalid kas peaaegu samaväärsed või isegi paremad kui portlandtsemendist saadavad.

## II. PÕLEVKIVI LENDTUHK EHITUSMATERJALIDE

### TOORAINENA

1. Lendtuha fraktsiooniline koostis ja ehitusmaterjalide saamiseks kasutatavate fraktsioonide klassifikatsioon

Põlevkivi põletamisel katelagregaatides sadestatakse tekiv lendtuhk kas ühe- või mitmeastmelistes tuhapüüdmissaadetes. Kui lendtuhka püütakse üheastmeliselt, siis kasutatakse selleks efektiivseid väiksema läbimõõduga tsükloneid ( $\varnothing$  25 cm), kui aga püütakse mitmeastmeliselt, siis lendtuha jämedam osa sadestatakse separaatorites ja vähem efektiivsetes suurema läbimõõduga tsüklonites ( $\varnothing$  120...300 cm) ning peenem osa elektrifiltrites.

Laialt on levinud lendtuha klassifitseerimine tuha püüdmissaadme järgi. Nii nimetatakse tsüklonites püütud tuhka tsüklonituhaks ja elektrifiltrites püütud elektrifiltrituhaks. Esimesel pilgul näib saarane liigitus olevat igati vastuvõetav, eriti praktilise kasutamise seisukohalt. Asjaga lähemal tutvumisel aga ilmnevad tõsised raskused sellise klassifikatsiooni kasutamisel.

Et nimetatud raskusi mõista, peab eelkõige teadma, et lendtuha üksikute terasuuruse klasside keemilis-mineraloogiline koostis ja sideainelised omadused on suuresti erinevad.

Tsüklonites sadestuva lendtuha peenus ning granulomeetiline koostis olenevad eelkõige tsükloni tüübist, läbimõõdust ja tehnilisest seisukorrast. Elektrifiltrites eralduva tuha peenus oleneb aga nende ees olevate tsüklonite püüdmisvõimest, elektrifiltrite töörežiimist ja tehnilisest seisukorrast. Selle tõttu võib esineda juhtumeid, kus tsüklonituha kui ka elektrifiltrituha peenus ja samuti sideainelised omadused kõiguvad ulatuslikult (2...4 korda). Esineb ka juhtumeid, et eri aegadel või eri katelseadmetest võetud tsüklonituha ja elektrifiltrituha proovid on sedavõrd lähedased, et pole võimalik ära tunda, milline neist on tsükloni- või milline elektrifiltrituhk.

Seega lendtuha liigitamine püüdmisseadme järgi tsüklonituhaks, elektrifiltrituhaks jne. on täiesti sobimatu, sest selle põhjal ei saa tööstuslikuks tootmiseks vajaliku täpsusega informatsiooni ei tuha koostise ega selle omaduste kohta. Kõikumised sel viisil klassifitseeritud tuha ühe liigi omadustes on sedavõrd suured, et see pole praktiliselt kasutatav praegusaja nõuetele vastava kvaliteediga ehitusmaterjalide valmistamiseks.

Sellest tulenevalt oli vaja lendtuhka liigitada teiste sobivamate, materjali koostist iseloomustavate tunnuste järgi, mille alusel on võimalik lendtuha eri liike täpsemalt üksteisest eristada.

Põlevkivi lendtuhk koosneb erineva suuruse ja erikaaluga terakeste rühmadest, mis on üksteisest suuresti erineva keemilis-mineraloogilise koostise ja sideaineliste omadustega (vt. tabel 3). Lendtuha osised, mis on ühesuguse suurusega või erikaaluga, on ka lähedase keemilis-mineraloogilise koostise ja sideaineliste omadustega.

Lendtuhka saab tööstuslikult kõige sobivamalt klassifitseerida tera suuruse järgi. Ehitusmaterjalide tööstuses on kõige otstarbekohasem kasutada lendtuhka kolme erineva terastiku koostisega fraktsioonina. Neid fraktsioone nimetatakse kokkuleppeliselt jäme-,peen- ja peenim fraktsioon.

T a b e l 3

Põlevkivi lendtuha fraktsiooniline koostis tera suuruse ja erikaalu järgi ning fraktsioonide keemiline koostis

Ühendi nime- tus	Lend- tuhk	Fraktsiooni							
		tera suurus $\mu\text{m}$			erikaal $\text{g/cm}^3$				
		<30	30-60	>60	<2,4	2,4- -2,6	2,6- -2,8	2,8- -3,05	>3,05
ühendi hulk %-des									
CaO	44,0	38,6	50,3	57,4	18,2	22,0	40,6	54,7	60,7
SiO <sub>2</sub>	29,4	32,3	25,5	21,7	50,5	52,5	31,6	19,0	14,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,6	9,0	6,2	4,0	16,2	10,0	7,5	5,4	4,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,0	4,7	5,8	5,5	4,0	3,7	4,1	4,2	8,5
K <sub>2</sub> O	2,9	3,7	1,9	1,1	5,6	5,0	4,0	2,0	0,3
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1
MgO	3,1	2,8	3,4	3,9	2,4	2,5	2,8	3,0	4,0
CO <sub>2</sub>	1,8	1,8	1,9	2,0	0,4	0,4	1,8	2,9	2,0
SO <sub>3</sub>	5,7	6,6	4,3	3,8	1,8	3,2	7,0	8,3	5,0
CaO <sub>vaba</sub>	17,7	13,0	24,5	28,0	1,2	2,7	12,0	22,4	34,0
CaSO <sub>4</sub>	9,7	11,2	7,3	6,5	3,1	5,4	11,9	14,1	8,5
Hüdro- moodul	1,05	0,84	1,34	1,84	0,26	0,33	0,94	1,91	2,21
Frakt- siooni hulk %-des	100	64	18	18	12	16	19	28	25

1. Jämefraktsiooni tera suurus on põhiliselt 30...150  $\mu\text{m}$  piirides. Sellest fraktsioonist on kõige otstarbekohasem valmistada mullbetoone ja silikaattooteid.

2. Peenfraktsiooni tera suurus on põhiliselt 10...30  $\mu\text{m}$ . Sellest fraktsioonist saab valmistada kvaliteetset kukermiiti ja kukermittsementi.

3. Peenima fraktsiooni tera suurus on põhiliselt alla 15  $\mu\text{m}$ . Seda fraktsiooni kasutatakse lisandina kiiresti kivineva ja kõrgemargilise põlevkivituhk-portlandtsemendi saamiseks.

## 2. Lendtuha tööstuslike fraktsioonide

koostised ja omadused

Keemiline ja mineraloogiline koostis on esitatud tabelis 4.

Neist andmeist selgub, et jämefraktsioon on lubjarikas, kuid räni ja alumiiniumi sisaldab suhteliselt vähe, võrreldes peenemate fraktsioonidega. Nii ületab jämefraktsiooni hüdro-moodul (1,2...1,8) peenemate fraktsioonide hüdro-mooduli keskmiselt 2 korda.

Lendtuha fraktsioonid sisaldavad põhiliselt järgmisi eripalgeliste sideaineliste omadustega ühendite gruppe:

- a) tsemendimineraalid -  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ja  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,
- b) õhus kivinevad sideained - vaba lubi ja anhüdriit ( $\text{CaSO}_4$ ), mis klaasifaasi komponentidega ühinedes annavad kivinemisel vees püsiva sideainekivi,
- c) klaasifaas - sisaldab šlaki ja putsolaanset kivinemist tingivaid ühendeid. Klaasifaasi all mõistetakse tuha seda osa, mis ei lahustu 5-protsendilises boorhappes, kuid lahustub 3-protsendilises soolhappes,
- d) lahustamata mineraalid ja suure  $\text{SiO}_2$ -sisaldusega klaas ehk nn. lahustumata jääk, mis ei lahustu 3-protsendilises soolhappes.

Tsemendimineraale sisaldavad lendtuha fraktsioonid 10...15%. Nende sisaldus on suurem lubjarikkas jämefraktsioonis.

Vaba lubja ja  $\text{CaSO}_4$  sisaldustes on suured erinevused. Mida jämedam on tuha fraktsioon, seda suurem on selle vaba lubja sisaldus (keskmiselt 9...26%) ja seda väiksem  $\text{CaSO}_4$  hulk (keskmiselt 15...6%).

Tabel 4

Lendtuha tööstuslike fraktsioonide keemiline  
ja mineraloogiline koostis

Oksiidi või mineraali nimetus	Lendtuha fraktsiooni nimetus		
	jäme	peen	peenim
	ühendi hulk %-des		
Keemiline koostis			
CaO	48 - 58	34 - 42	30 - 36
SiO <sub>2</sub>	20 - 28	30 - 36	30 - 34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 - 7	7 - 10	10 - 12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4 - 6	4 - 6	4 - 5
MgO	3 - 4	2,5 - 3	2,5 - 3
K <sub>2</sub> O	1,5 - 2,5	2,5 - 4	4,5 - 6,5
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,2	0,2
Mineraloogiline koostis			
CaO <sub>vaba</sub>	20 - 32	11 - 15	7 - 11
CaSO <sub>4</sub>	5 - 8	9 - 12	14 - 17
CaCO <sub>3</sub>	4 - 7	3 - 5	2 - 5
β2CaO·SiO <sub>2</sub>	9 - 14	9 - 11	8 - 10
CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8 - 2	0,8 - 1,5	0,8 - 1,5
Klaasifaas	32 - 36	28 - 33	27 - 32
Lahustumata jäak	12 - 18	24 - 33	25 - 35
Hüdro moodul	1,2 - 1,8	0,70 - 0,90	0,60 - 0,80

Klaasifaasi sisaldab jämedam ja lahustumata jääki peenim lendtuha fraktsioon.

Nimetatud ühendite gruppide koostis ja omavaheline suhe määravad põlevkivi lendtuha fraktsioonide hüdraulilise aktiivsuse.

Tsemendimineraalidel pole selgesti nähtavat määravat mõju põlevkivi lendtuhkade hüdraulilisele aktiivsusele, kuna tsemendimineraalide hulga suurenemisega kaasneb ka vaba lupja sisalduse suurenemine. Nii on tsemendimineraalide poolst rikkamad jämedamad fraktsioonid isegi madalama hüdraulilise aktiivsusega kui tsemendimineraale vähem sisaldavad peenemad fraktsioonid.

Põlevkivituhkade hüdrauliline aktiivsus oleneb põhiliselt ühendite ülejäänud kolme grupi koostisest ja nende omavahelisest hulgalisest suhtest. Näiteks on suurima hüdraulilise aktiivsusega põlevkivituhk-sideaine, mis sisaldab

vaba lupja 8...12%,  
anhüdriiti 3... 5%.

Peab aga ütleva, et tegelikkuses ei esine sellist põlevkivituhk-sideaine nn. ideaalkoostist. Sellele on kõige lähemal lendtuha peenimad fraktsioonid, mis sisaldavad 7... ..11% vaba lupja ja 14...17% anhüdriiti. Seega on peenimas fraktsioonis vaba lupja optimaalsel hulgal, kuid anhüdriiti ülemääraselt palju. Jäme fraktsioonis on aga vaba lupja suu- resti, keskmiselt 2,5 korda üle optimaalse hulga ja samuti on ka kipsanhüdriidi ülemääraselt palju. Nagu näeme hiljem (lk. 26) ületab peenima fraktsiooni hüdrauliline aktiivsus keskmiselt 2 korda jäme fraktsiooni aktiivsuse.

Terastiku koostis ja peenus. Tabelis 5 on esitatud lendtuha ja selle fraktsioonide terastiku koostised.

Nagu juba eespool nimetatud, on jäme fraktsiooni terasuurus põhiliselt vahemikus 30...150  $\mu\text{m}$ . Peenfraktsioonil on terasuurus põhiliselt 10...30  $\mu\text{m}$  ja peenimal fraktsioonil alla 15  $\mu\text{m}$ .

Eripinna suurused on fraktsioonidel alljärgnevad:

jämefraktsioon	500...1200 cm <sup>2</sup> /g,
peenfraktsioon	1800...2500 " ,
peenim fraktsioon	3200...5000 " .

Erikaal ja mahukaal

	erikaal g/cm <sup>3</sup>	mahukaal, puiste kg/m <sup>3</sup>
jämefraktsioon	2,82 - 2,93	1150 - 1250
peenfraktsioon	2,70 - 2,76	900 - 1050
peenim fraktsioon	2,65 - 2,71	650 - 850

T a b e l 5

Lendtuha ja selle fraktsioonide terastiku koostis

Tuha liik	Osiste suurus $\mu\text{m}$						
	>150	90...150	60...90	30...60	20...30	10...20	<10
Osiste hulk %-des							
Lendtuhk	0...7	5...7	6...8	15...20	18...25	22...28	14...20
Lendtuha jäme-fraktsioon	0...30	5...40	30...65		0...30	-	-
Lendtuha peen-fraktsioon		-	-	0...20	5...45	35...70	0...25
Lendtuha peenim fraktsioon		-	-	-	0...15	10...35	50...90

Tuha fraktsioonide hüdraulilist aktiivsust hinnati nendest jahvatuse teel saadud kukermiidi teimimise tulemuste põhjal. Kukermiidist valmistati plastne mört 1:3 (kukermit: volski liiv), mida kivistati 20°C juures 28 päeva ja katsetati seejärel survetugevusele.

Lendtuha fraktsiooni nimetus, millest valmistati kukermit	Vesisideainetegur	Mördi survetugevus kg/cm <sup>2</sup>
Jämefraktsioon	0,55	105
Peenfraktsioon	0,42	160
Peenim fraktsioon	0,34	210

Peenimast fraktsioonist valmistatud kukermit rahuldab margi "200" nõudeid, mis ületab kaks korda jämefraktsiooni aktiivsuse.

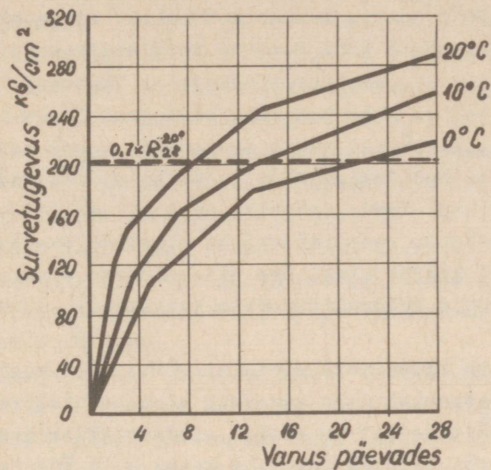
Lendtuha fraktsioonide suuresti erinev hüdrauliline aktiivsus on tingitud nende keemilis-mineraloogilise koostise ja füüsikalise seisundi erinevustest. Mida peenem on tuha fraktsioon, seda vähem sisaldab ta vaba lupja ja enam pinnalt tihedaks sulanud teri, mille tõttu on kukermiidi veevajadus väiksem ja mördi tugevus suurem.

Joonisel 4 on toodud jäme- ja peenfraktsiooni segust valmistatud kukermiidi ja portlandtsemendi kivinemise kineetika 0°, 10° ja 20°C juures.

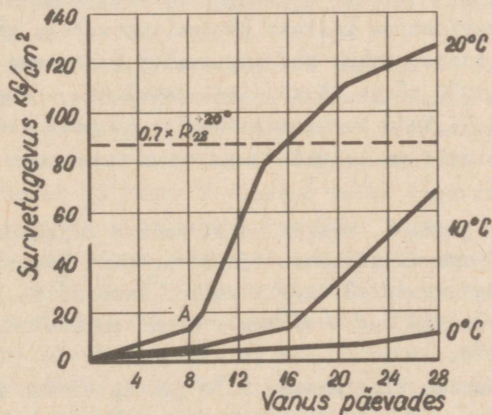
Siit selgub, et temperatuuri muutus mõjustab kukermiidi kivinemise käiku palju rohkem kui portlandtsemendi puhul. Kui kivinemise temperatuur langeb 20°C võrra, väheneb kukermiidi hüdrauliline aktiivsus ligi 4 korda rohkem kui portlandtsemendil. Kukermiidi selline suur hüdraulilise aktiivsuse langus põhineb kahel asjaolul:

esiteks on kukermiidi kivinemisel see periood, mis on ettevalmistavaks etapiks sideainekivi tugeva monoliidi moodustumisel ehk nn. induktsiooniperiood, äärmiselt pikk ja teiseks sõltub kukermiidi kivinemise kiirus keskkonna temperatuurist märksa rohkem kui tsemendi puhul.

## Portlandtsement



## Kukermiit



Joonis 4. Kukermiidi ja portlandtsemendi kiveenemise kineetika eri temperatuuridel.

Jälgides kukermiidi kivinemise kõverate kulgu, selgub, esiteks, et  $20^{\circ}\text{C}$  juures kestab kukermiidi kivinemise induktsiooniperiood 0A kuni 8 päeva. Portlandtsemendil on selle perioodi pikkus tavaliselt kõigest  $\sim 12$  tundi. Induktsiooniperioodi vältel pole kukermiitmört vees püsiv ning laguneb peaaegu kohe pärast vette asetamist. Seepärast on kukermiittoodete hooldamine ning vajaliku niiskuse režiimi säilitamine tülikas. Toode on selle perioodi vältel väga tundlik väliskeskonna temperatuuri ja niiskuse muutuste suhtes ning kergesti kahjustatav. See oli ka üheks peamiseks teguriks, mis tingis kukermiittoodete kvaliteedi suure kõikumise varem.

Erinevate sideainete kivinemisvõime sõltuvust keskkonna temperatuurist saab mugavalt hinnata vastava arvnaõtaja abil. Näiteks kui on teada mingist sideainest valmistatud mördi või betooni tugevuse kasvu kulgu ühe temperatuuri juures kivinemisel, siis on võimalik selle sama toote tugevuse kasvu kulgu arvutada ka teiste erinevate temperatuuride juures. Seda on võimalik teha nn. kivinemise kestuse temperatuuri koefitsiendi  $K_T$  abil.  $K_T$  näitab mitu korda on vaja muuta kivinemise kestust võrdse tugevusega mördi või betooni saamiseks, juhul kui kivinemise keskkonna temperatuur muutub  $10^{\circ}\text{C}$  võrra. Kukermiidi puhul on koefitsient  $K_T = 1,9 \dots 2,1$ , kuid portlandtsemendil kõigest  $1,4 \dots 1,6$ . Esitatud suurused on leitud temperatuurivahemiku  $0 \dots 100^{\circ}\text{C}$  kohta.

Vaatame joon. 4, kuidas neist kahest asjaolust, s.o. induktsiooniperioodi pikkusest ja kivinemise keskkonna temperatuuri muutusest, sõltuvalt muutub kukermiit- ja portlandtsementmörtide tugevuse kasvu kulgu temperatuurivahemikus  $20^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ .

Normaalsetes tingimustes  $20^{\circ}\text{C}$  juures kestab kukermiidi kivinemise induktsiooniperiood 8 päeva. Mördi survetugevus on 8 päeva vanuselt  $12,5 \text{ kg/cm}^2$ , mis on 28-päevasest tugevusest  $\sim 10\%$ . Sama tugevuse saavutab kukermiitmört  $10^{\circ}\text{C}$  juures 16 päeva vanuselt, s.o. 2 korda pikema aja jooksul kui  $20^{\circ}\text{C}$  juures. Kui aga temperatuur on  $0^{\circ}\text{C}$ , siis peab kukermiitmört

eelnimetatud tugevuse saamiseks kivinema ~ 30 päeva, see on ~ 1,9 korda kauem kui 10°C juures ja 3,8 korda kauem kui 20°C juures.

Portlandtsementmördi survetugevus 7 päeva vanuselt on 190 kG/cm<sup>2</sup> ehk 66% 28-päevasest tugevusest. Isegi 1 päeva vanuse tsementmördi survetugevus 60 kG/cm<sup>2</sup>, mis on 21% 28-päevasest tugevusest, ületab suuresti 7 päeva vanuse kukermiitmördi survetugevuse nii absoluutselt kui ka suhteliselt. Temperatuuri alanemisel 10°C-ni ja 0°C-ni peab tsementmört, tänu väiksemale temperatuuri koefitsiendile ( $K_T \approx 1,6$ ), kivinema vastavalt ~ 11,5 ja 18 päeva, et saavutada 190 kG/cm<sup>2</sup>, s.o. survetugevus, mille tsementmört saavutas 20°C juures 7 päevaga.

Lendtuha peen- ja peenimast fraktsioonist valmistatud kukermiitide kivinemise induktsiooniperiood on vastavalt 3...5 ja 2...3 päeva ja temperatuuri koefitsient  $K_T$  on vastavalt 1,9 ja 1,8. Vaatamata peenemate fraktsioonide puhul valitsevale soodsamale olukorrale nii induktsiooniperioodi kui ka temperatuuri koefitsiendi  $K_T$  osas, on siiski ka siin 0°C juures induktsiooniperiood vägagi pikk - peenfraktsiooni korral keskmiselt ~ 14 päeva ja peenima fraktsiooni puhul 8 päeva.

Sideainete baasil valmistatud tooteid hooldatakse (keskkonna küllaldane temperatuur ja niiskus) seni, kuni nad saavutavad 70% oma margilisest tugevusest. Normaalsetes tingimustes kivinevate toodete puhul loetakse tavaliselt margiliseks tugevuseks 28 päeva kivinenud toote tugevus.

Portlandtsementbetoone tuleb 20°C juures kivinemisel hooldada 7...10 päeva. Joonisel 4 esitatud näite puhul tuleb 20°C, 10°C ja 0°C juures kivinevaid tooteid hooldada vastavalt keskkonna temperatuurile 8,5, 13,5 ja 22 päeva.

Kukermiititoodete puhul on aga hoolduse kestus 20°C juures 14...17 päeva. Joonisel 4 toodud näite puhul tuleb 20°C juures kivinevat kukermiitmörti hooldada 16 päeva, 10°C juures kivinevat 30 päeva ja 0°C juures ~ 2 kuud.

Kukermiidi liiga aeglane kivinemine ning toodete tülikas ja pikk hooldusperiood tingiks selle sideaine kasu-

tusalade tunduva kitsenemise, kui ei oleks leitud efektiivseid vahendeid nende puuduste vastu.

Laialdaselt kasutatakse kaht kivinemise forsseerimise võtet:

- 1) tooted kivistatakse kõrgemal temperatuuril või
- 2) kukermiidile manustatakse portlandtsemendi klinkrit.

#### Kukermiittoodete kivistamine kõrgemal temperatuuril.

Kuna kukermiidil on kivinemise kestuse temperatuurikoefitsient  $K_T$  suhteliselt kõrge, siis on eriti efektiivne kukermiittooteid kivistada kõrgematel temperatuuridel. Seda võib teha kas tavalise rõhu juures aurutuskambrites ( $80\dots100^\circ\text{C}$ ) või ülerõhul  $8\dots15$  atü juures autoklaavides ( $175\dots200^\circ\text{C}$ ). Tabelis 6 on toodud kolme erineva temperatuuri ( $20$ ,  $80$  ja  $180^\circ\text{C}$ ) juures kivistatud kukermiit- ja portlandtsementmörtide survetugevused.

Esitatud tulemustest nähtub, et kukermiidi aktiivsus on seda lähedasem portlandtsemendi aktiivsusele, mida kõrgem on kivinemise temperatuur. Näiteks kui  $20^\circ\text{C}$  juures kivinemisel on kukermiitmördi survetugevus kõigest 44% portlandtsementmördi tugevusest, siis  $80^\circ\text{C}$  juures kivinemisel on see juba 73% ja  $180^\circ\text{C}$  juures isegi 89%.

Temperatuurikoefitsiendi  $K_T$  abil on võimalik arvutada aurutusmenetluse kasutamise teel saadavat aja säästu kivinemise kestuses.

Nii leiame, et aurutamisel  $80^\circ\text{C}$  juures kivineb kukermiit  $2^{(80-20):10} = 2^6 = 64$  korda kiiremini kui tavalistes tingimustes  $20^\circ\text{C}$  juures. Näiteks kui kukermiittoode peab  $20^\circ\text{C}$  juures kivinema 28 päeva, siis  $80^\circ\text{C}$  juures saadakse sama tugevusega toode juba  $\sim 11$  t. jooksul.

Portlandtsemendil forsseerub kivinemine  $60^\circ\text{C}$  temperatuuri tõusu tagajärjel tunduvalt vähem kui kukermiidil,  $1,6^{(80-20):10} = 1,6^6 \approx 17$  korda. Seega peab portlandtsementtoode  $80^\circ\text{C}$  juures kivinema ligi 4 korda kauem kui kukermiittoode ( $\sim 40$  tundi), enne kui ta saavutab sama tugevuse mis  $20^\circ\text{C}$  juures 28 päeva jooksul.

Tabelis 6 esitatud andmetest nähtub, et aurutusmenetlusel  $80^\circ\text{C}$  juures ekvivalentsel vanusel kivistatud proovide tugevused ühtivad hästi tavalise temperatuuri juures 28 päeva kivistatud proovide tugevustega:

kukermiidi puhul on vastavad mördi survetugevused  
 130 ja 125 kg/cm<sup>2</sup>,  
 portlandtsemendi puhul aga 280 ja 285 kg/cm<sup>2</sup>.

Et eespool vaadeldud kivinemise kestuse temperatuuri koefitsientide kehtivuspiirkond oli 0...100°C, siis autoklaavis 180°C juures kivistatud proovide kivinemise kiirenemist ei saa enam arvutada nimetatud koefitsiendi abil. See on tingitud asjaolust, et autoklaavis kivistamisel ei muutu sideainekivi mitte üksnes kvantitatiivselt, vaid siin leiavad aset ka kvalitatiivsed muutused. Autoklaavis moodustunud sideainekivi koosneb teistsuguse koostise ja struktuuriga ühenditest kui madalama temperatuuri (< 100°C) tingimustes tekkinud sideainekivi.

Kuna puuduvad usaldusväärsed arvutusallused autoklaavis kivistamisel saadava aja säästu kohta, siis tugineme antud juhul konkreetsetele katseandmetele, mis on toodud tabelis 6. Neist andmetest selgub, et autoklaavis 180°C juures 8 tunni vältel kivistatud kukermiitmört on niisama tugev kui normaaltingimustes 20°C juures üle 6 aasta kivinenud mört. Seega lüheneb autoklaavis eelnimetatud tingimustel kukermiitmördi kivinemine üle 6,5 tuhande korra. Portlandtsemendi puhul on see muutus ~6,5 korda väiksem kui kukermiidi korral.

Autoklaavis kivistamiseks sobib lendtuha fraktsioonidest kõige paremini lubjarikas jämefraktsioon.

T a b e l 6

Kivinemise keskkonna temperatuuri mõju kukermiit- ja portlandtsementmörtide tugevusele

Sideaine	Kivinemise temperatuur ja kestus						
	20°C juures			80°C juures			180°C juures
	28pv.	11k.	6a.	11t.	16t.	40t.	8t.
M ö r d i s u r v e t u g e v u s kg/cm <sup>2</sup>							
Kukermiit	125	-	350	130	175	-	365
Portlandtsement	285	415	-	-	240	280	410

Tsemendiklinkri manuse mõjust kukermiidi hüdraulilisele aktiivsusele. Põlevkivituhk-sideainete kivinemist on püütud forsseerida mitmesuguste lisandite abil. Leiti, et efektiivsem on portlandtsemendi klinkri manus, kuna ta kiirendab kukermiitide kivinemist mitte ainult tavalise temperatuuri juures, vaid ka madalamatel temperatuuridel.

Seejuures ilmnes aga sageli, et klinkri manusega kukermiidist valmistatud mördil polnud pärast 28 päeva kestnud kivinemist nii kõrge tugevus, kui seda võis eeldada manustatava klinkri kvaliteedi ja hulga järgi, või oli see isegi madalam klinkri lisandita kukermiidist valmistatud mördi omast.

Klinkri manuse efektiivsus oleneb suuresti lendtuha fraktsiooni koostisest, millest kukermiit valmistatakse. Klinkri manuse efektiivsus väljendatakse nn. efektiivsuse koefitsiendi  $K_{ef}$  kaudu. Klinkri manuse efektiivsuse koefitsient on segasideaine (kukermiidi ja klinkri jahvatatud segu) tegeliku ja arvutusliku hüdraulilise aktiivsuse suhtarv. Näiteks valmistame segasideaine, mis koosneb 70% kukermiidist ja 30% portlandtsemendi klinkrist. Hüdrauliline aktiivsus väljendatakse käesoleval juhul 28 päeva kivinenud plastse mördi survetugevuse kaudu, mis on kukermiidil  $140 \text{ kg/cm}^2$  ja klinkerportlandtsemendil (kliner+kips)  $320 \text{ kg/cm}^2$ . Segasideaine arvutuslik hüdrauliline aktiivsus on siis

$$R_{28 \text{ arv}}^{\text{segasideaine}} = 0,70 \cdot 140 + 0,30 \cdot 320 = 98 + 96 = 194 \text{ kg/cm}^2.$$

Segasideaine tegelik hüdrauliline aktiivsus oli aga  $233 \text{ kg/cm}^2$ .

Seega on klinkri manuse efektiivsuse koefitsient

$$K_{ef} = \frac{R_{28 \text{ teg}}^{\text{segasideaine}}}{R_{28 \text{ arv}}^{\text{segasideaine}}} = \frac{233}{194} = 1,20.$$

Klinkri manuse efektiivsus oleneb lendtuha fraktsiooni peenusest, klinkri manuse hulgast ja kivinemise temperatuurist. Üldiselt on klinkri manus seda efektiivsem, mida peenem on fraktsioon. Kui näiteks jääfraktsiooni korral on klinkri manuse efektiivsuse koefitsient keskmiselt kõigest

0,7, siis peenfraktsioonil on see juba 1,3 ja peenimal 1,5. Klinkri manuse madala efektiivsuse koefitsiendi tõttu võib segasideaine hüdrauliline aktiivsus olla isegi väiksem kui kukermiidil. Kui see koefitsient on 0,6, siis ülaltoodud näite puhul saame

$$R_{28}^{\text{segasideaine}} = 0,6 \cdot 194 = 116 \text{ kg/cm}^2 < R_{28}^{\text{kuk}} = 140 \text{ kg/cm}^2.$$

Seega, tänu klinkri ja tuha halvale sobivusele, on segasideaine aktiivsus kõigest 83% kukermiidi aktiivsusest. Seepärast manustatakse tsemendiklinkrit ainult lendtuha peen- ja peenimale fraktsioonile, kuna siis saadakse kahe sideaine segamisel täiendav 1,3...1,5 kordne hüdraulilise aktiivsuse tõus.

Klinkri manuse efektiivsuse koefitsiendid, olenevalt lendtuha peen- või peenima fraktsiooni vahekorradest klinkriga ja kivinemise temperatuurist, on toodud tabelis 7.

T a b e l 7

Klinkri manuse efektiivsuse koefitsiendid

Fraktsiooni nimetus	Kivinemistemperatuur °C	Klinkri manus %-des		
		30	50	70
		Lisandi efektiivsuse koefitsient		
Peenfraktsioon	5	1,40	1,30	1,25
	20	1,20	1,20	1,20
Peenim fraktsioon	5	1,0	1,45	1,60
	20	1,35	1,40	1,40

Nendest andmetest nähtub, et peenfraktsiooni korral on sobivaim klinkri lisandi väikene hulk (30%), peenima puhul aga suur hulk (70%).

### III. PÕLEVKIVI LENDTUHA FRAKTSIOONIDEST SAADAVATE MATERJALIDE VALMISTAMISE TEHNOLOOGIA JA OMADUSED

#### 1. Lendtuha jämefraktsioonist saadavad materjalid =====

Jämefraktsioonist saab valmistada kergeid tooteid - mullbetoone (gaas- ja vahtbetoon) ja raskeid betoone, mis kivistatakse hüdrotermiliselt. Nende põlevkivituhk-ehitusmaterjalide tehnoloogias on üheks oluliseks etapiks tuha kustutamine (õieti tuhas oleva vaba lubja kustutamine) enne toote kivinemist. Tuhas sisalduv vaba lubi on tunduvalt väiksema aktiivsusega kui tavaline ehituslub, ning reageerib veega sedavõrd aeglaselt, et suur osa lubjast kustub alles toote kivinemise kestel. Selline nähtus võib aga olla ohtlik ning halvemal juhul kahjustada toodet isegi niivõrd, et see puruneb.

Vabast lubjast tingitud põlevkivituhktoote paisumise suurus ning ohtlikkus oleneb tuha vaba lubja sisaldusest, selle peenusest ja toote kivistamise režiimist. Kustutus on seda olulisem, mida enam tuhk sisaldab vaba lubja, mida jämedamateralisem see on ja mida forsseeritum on kivistumine. Kivineb toode tavalise temperatuuri juures ja vaba lubja terakesed on peenemad kui  $30 \mu\text{m}$  ning vaba lubja sisaldus on  $< 15\%$ , pole vaja tuhka enne kustutada. Kui aga samast tuhast valmistatud toode kivistatakse kiirendatult, aurutus-kambrites ( $80^{\circ}\text{C} \dots 100^{\circ}\text{C}$ ), on vajalik osaline kustutus. Kivistatakse tooted veelgi forsseeritumalt, autoklaavides ( $175^{\circ}\text{C} \dots 200^{\circ}\text{C}$ ), tuleb tuhk põhjalikult kustutada.

Põlevkivituhk-gaasbetooni tootmisel pole spetsiaalset tuha kustutamist ette nähtud, nagu raskete betoonide puhul. Gaasbetooni tootmisel kustub tuhas olev vaba lubi küllaldaselt juba niiske kvartsliliva ja tuha koos jahvatamisel ja sellele järgneval tuhaliivasegu seismisel silodes. Peale selle kustub lubi veel betoonisegu segamisel ja vormides hoidmisel, kus temperatuur on  $80^{\circ}\text{C} \dots 85^{\circ}\text{C}$ .

Tavalisel temperatuuril kivinevais betoonides on sideaine aktiivseks, monoliiti moodustuvaks komponendiks ja täitematerjal (kvartslüiv, killustik) passiivseks komponendiks, mis ei võta osa kivinemisel kulgevaist keemilistest reaktsioonidest. Autoklaavis kivistatavates betoonides on peale sideaine aktiivseks komponendiks veel ka kvartslüiv, mis tänu kõrgele temperatuurile reageerib vaba lubjaga. Seejuures tekkivad uusmoodustised on suure tugevuse ja püsivusega. Need uusmoodustised on sedavõrd olulised, et nende hulga suurendamiseks spetsiaalselt peenendatakse kvartslüiva. Sel teel saadav vaba lubja ja kvartslüiva peendisperse segu, nn. autoklaavne sideaine, on oluliseks komponendiks ka autoklaavis kivistatavais põlevkivituhkbetoonides. Põlevkivituhk-gaasbetooni tootmise tehnoloogia ja kasutamise alused on välja töötanud Ehituskomitee ETUI-s F.Kiviselg, E.Ojamaa, T.Laur, U.Kreis, U.Valdre jt. Põlevkivituhk-raskebetooni tootmise tehnoloogia rajaneb R.Otsmani, V.Reimani, U.Kreisi jt. uurimustel.

#### Autoklaavis kivistatud põlevkivituhkbetoonides tekkivad uusmoodustised

Põlevkivituhk-gaasbetooni ja raskebetooni kivistamisel autoklaavis  $175...200^{\circ}\text{C}$  ning  $\sim 8...15$  atü juures küllastatud veeauru keskkonnas tekivad põhiliselt rühma CSH(B) kuuluvad kaltsiumsilikaadid. Kui tavalise temperatuuri juures tekkivad CSH(B) rühma kaltsiumsilikaadid on submikroskoopilise struktuuriga geelid, siis autoklaavis kivistamisel saadakse uusmoodustised, mis on suhteliselt hästi väljaarenenud kristallilise struktuuriga. Pikemaajalisel kivinemisel autoklaavis võib saada hästi väljaarenenud kristallidega CSH(B) faasi, mis on sarnane loodusliku kaltsiumhüdrosilikaadiga - tobermoriidiga (koostis  $5\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). Seepärast nimetatakse ka CSH(B) rühma uusmoodustisi tobermoriidi taolisteks kaltsiumsilikaatideks.

Põhjalikuma kivinemise ning struktuuri jämenemise tõttu autoklaavimisel sisaldavad nii saadud põlevkivituhkbetoonid suhteliselt rohkem keemiliselt seotud vett ning suhteliselt

vähem kergesti eraldatavat adsorptsioonivett. Seepärast kahanevad ja paisuvad autoklaavis kivistatud põlevkivituhk-betoonid vahelduval kuivamisel ja niiskumisel vähem kui normaalse temperatuuri juures või aurutamisel (80...100°C) kivistatud betoonid.

Peale tobermoriiditaoliste kaltsiumhüdrosilikaatide tekib autoklaavis kivistamisel põlevkivituhkbetoonides vähesel hulgal veel hüdrogranaate, üldise koostisega  $3CaO \cdot zAl_2O_3 \cdot (1-z)Fe_2O_3 \cdot xSiO_2(6-2x)H_2O$ , kõige tõenäolisemalt aga  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot (1-1,5)SiO_2 \cdot (3-4)H_2O$ .

Autoklaavis kivistatud põlevkivituhkbetoon tavaliselt vaba lupja ei sisalda, kuid sisaldab anhüdriiti.

Põlevkivituhkbetooni kivistamisel madalamatel temperatuuridel (kuni 80°C) tekivad kaltsiumhüdrosulfoaluminaadid. Madalama temperatuuri juures tekib kõrgsulfaatne vorm  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ , mis kõrgemal temperatuuril võib üle minna madalasulfaatsesse vormi  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ , kusjuures vabaneb kips. Autoklaavis kivistamisel aga lagunevad mõlemad kaltsiumhüdrosulfoaluminaadid. Seejuures vabaneb anhüdriit. Anhüdriidi manus 2,5...3,5% autoklaavis kivistatavais põlevkivituhkbetoonides on vajalik kivinemisprotsessi-de forsseerimiseks. Seejuures tekib rohkem tobermoriiditaolist faasi, paraneb uusmoodustiste koostis ning tõuseb põlevkivituhkbetoonide tugevus. Ülemäärane anhüdriidi hulk võib alandada põlevkivituhkbetoonide tugevust ja püsivust.

### Põlevkivituhk-gaasbetoon

Koostis ja komponentide peenendus. Põlevkivituhk-gaasbetooni komponentideks on:

- sideaine - lendtuha jäme fraktsioon ja osalt ka kvartssliiv,
- täiteaine - kvartssliiv,
- gaasitekitaja - alumiiniumipulber,
- sulfonool või kampselseep - kasutatakse parafiniseeritud alumiiniumipulbri veega määrgumise parandamiseks, et saada alumiiniumipulbri ja vee suspensiooni (vesi-alumiiniumsuspensioon).

Gaasbetoonisegu vahakord ja peenus valitakse sõltuvalt detajli vajalikust mahukaalust, tugevusest ja mõõtetest. Näiteks sideainerikkam ja peenem segu annab tugevama, kuid rohkem kahaneva toote. Kui väikeste soojaisolatsiooniplaatide puhul pole kuigi oluline kahanemise määr, siis suurpaneelide juures tuleb peale tugevuse rahuldada veel kahanemise (lineaarselt  $\leq 0,5$  mm/m) nõue.

Tuha ja niiske liiva segu jahvatatakse koos kuulveskis. Koos liivaga jahvatamisel peeneneb tuhk paremini kui eraldi jahvatamisel ja seejuures kustub osaliselt ka tuhas olev vaba lubi. Peale selle on koosjahvatatud segus komponendid põhjalikult homogeniseeritud ning hästi ette valmistatud järgnevateks reaktsioonideks, kus moodustub tehiskivi - gaasbetoon.

#### Toodete valmistamise tehnoloogia ja omadused

Soojaisolatsiooniplaadid. Nende plaatide puhul, mille mahukaal on  $400 \dots 500$  kg/m<sup>3</sup> ja mõõtmised  $57 \times 39 \times 9,5$  cm, peab tuhalliivasegu peenus olema  $2800 \dots 3200$  cm<sup>2</sup>/g ja segu aktiivsus, s.t. vaba lubja sisaldus, keskmiselt 14%. See rahuldatakse, kui segu vahakord on  $1:0,5 \dots 0,8$  (jäme fraktsioon:liiv). Tuhalliivasegu doseeritakse koos veega segistisse. Vesikuivainetegur ( $\frac{\text{vesi}}{\text{tuhalliivasegu}}$ ) on seejuures  $0,50 \dots 0,52$ . Pärast segu esialgset segamist ( $\sim 3$  min.) manustatakse segistisse gaasitekitaja - alumiiniumipulber vesi-alumiiniumsuspensioonina. Peale selle segatakse segu veel 1 min. vältel. Manustatava vee temperatuur tuleb valida selline, et saadava segu temperatuur oleks pärast segamist keskmiselt  $50^{\circ}\text{C}$ . Gaasbetoonisegu lastakse segistist dosaatorisse, kust see valatakse  $\sim 2\text{m}^3$  suurustesse metallvormidesse. Põlevkivituhk-gaasbetoonisegu hoitakse enne autoklaavi viimist  $2,5 \dots 4$  tundi soojalt kaetud vormides. Selle aja vältel kustub tuhas seni veel kustumata vaba lubi ning segu tardub niivõrd, et seda võib spetsiaalse lõikemasina abil plaatideks lõigata. Alumiiniumipulbrit kulub  $500 \dots 550$  g ühe kuupmeetri isolatsiooniplaatide kohta. Sulfoonooli võetakse 3% alumiiniumi-

pulbri hulgast. Isolatsiooniplaadid kivistatakse autoklaavis 8 atü juures järgmise režiimi järgi:

2,5 + 6 + 2,5 tundi (rõhu tõstmine + isothermiline kuumutamine + rõhu allalaskmine).

Kuivatatud isolatsiooniplaatide survetugevus on 20...  
...30 kG/cm<sup>2</sup>.

Suurpaneelide puhul, mille mõõtmed on kuni 600x120x25...  
...35 cm, nõutakse, et materjali survetugevus peab olema vähemalt 50 kG/cm<sup>2</sup> ja mahukaal ülimalt 800 kg/m<sup>3</sup>. Silmas pidades suurpaneelide mõõtmeid ja füüsikalisi-mehaanilisi omadusi, tuleb nende tootmisel rahuldada järgmisi tehnoloogilisi nõudeid. Isolatsiooniplaatidega võrreldes peab segu olema liivarikkam ja jämedam. Tuhaliivasegu aktiivsus olgu keskmiselt 11,5%. Selle saamiseks tuleb komponendid võtta vahekorras 1:1,0...1,2 (jämefraktsioon:liiv). Segu peenus peab olema 1800...2200 cm<sup>2</sup>/g. Vesikuivainetegur on 0,44...0,46. Alumiiniumipulbrit kuulub ühe kuupmeetri suurpaneelide kohta 400...450 g. Kampolseepi võetakse 10% alumiiniumipulbri hulgast. Segu temperatuur peab pärast segamist olema 45°C. Nüüd valatakse segu metallvormidesse, mis hoitakse enne autoklaavi viimist 2,5 t. aurutuskambrites.

Suurpaneelid kivistatakse autoklaavis 8 atü juures järgmise režiimi järgi:

5 + 6 + 3 + 1 tundi (rõhu tõstmine + isothermiline kuumutamine + rõhu allalaskmine + allajahutamine).

Ahtme Ehitusmaterjalide Kombinaadis toodetavate põlevkivituhk-gaasbetoon-suurpaneelide mahukaal on 700...800 kg/m<sup>3</sup>, survetugevus 50...70 kG/cm<sup>2</sup> ja külmutuskindlus vastavalt mahukaalule ja tugevusele 35...80 tsükli.

Kasutamine. Põlevkivituhk-gaasbetooni tooteid kasutatakse laialdaselt meie vabariigi elamu-, tööstus- ja põllumajandusehitustel.

Praegu toodab Ahtme Ehitusmaterjalide Kombinaat aastas soojaisolatsiooniplaate üle 50 000 m<sup>3</sup> ja suurpaneeli üle 40 000 m<sup>3</sup>. Suurpaneelidest on senini ehitatud üle 350 suure

ehitusobjekti. Lähemal ajal hakkab põlevkivituhk-gaasbetooni tootma Balti Ehitusmaterjalide Kombinaat tootmisvõimsusega 310 000 m<sup>3</sup> põlevkivituhk-gaasbetooni aastas. Põlevkivituhk-gaasbetoon on silikaat- ja tsementgaasbetoonist 10...20% võrra odavam.

### Põlevkivituhk-raskebetoon

Koostis. Raskebetooni komponentideks on:

sideaine - siin võib kasutada kahesuguse koostisega sideainet:

- a) jääfraktsioon - saab kasutada madala- ja keskmargiliste betoonide (margid  $\leq 300$ ) saamiseks,
- b) jääfraktsiooni 60...80% ja jahvatatud kvartslüüva 40...20% segu - saab kasutada kõrgemargiliste (margid  $\leq 400$ ) ja suure püsivusega betoonide saamiseks;

täitematerjal - siingi võib kasutada kahesugust koostist:

- a) jämedateralistes betoonides on täitematerjaliks kvartslüüv ja killustik,
- b) peenateraliste, nn. liivbetoonide puhul kasutatakse kvartslüüva. Kvartslüüv täidab osaliselt ka sideaine ülesandeid, kuna kvartsi tera pindmine kiht reageerib vaba lubjaga ning tekivad uusmoodustised.

Kui tavalisel temperatuuril ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ) ja aurutusmenetluses ( $80...100^{\circ}\text{C}$ ) kivistatavad betoonid reeglina valmistatakse liiva ja killustiku baasil, nn. jämedateralistena, siis autoklaavis ( $175...200^{\circ}\text{C}$ ) kivistamise korral kasutatakse täitematerjalina peamiselt kvartslüüva. Nagu juba eespool mainitud, reageerib täitematerjalina manustatav kvarts osaliselt lubjaga ning annab seetõttu tugevama ja püsivama tehiskivi. Vaatamata sellele, et liivbetoonide saamiseks kulub sideainet 1,5...2 korda rohkem kui jämedateraliste betoonide puhul, on autoklaavis kivistatavad liivbetoonid meie vabariigis mitmeti vägagi otstarbekad:

esiteks kasutatakse sideainena tööstusjääki - põlevkivituhka, mille maksumus on ~5 korda madalam kui paekivikillustikul, ja teiseks, kõrgtugevate ja püsivate betoonide saamiseks pole meie paekivikillustik alati küllalt kvaliteetne; kvartslüüva baasil valmistatud peeneteralisest betoonist saadakse aga kõrge ja püsiva kvaliteediga toode.

Valmistamise tehnoloogia. Raskebetoonis kasutatav jääfraktsioon tuleb kõigepealt hästi kustutada. Väiksemates katelagregaatides tekkinud lendtuha jääfraktsioonis olevat vaba lupja saab täielikult kustutada juba 5 atü juures 40...60 min. vältel. Suurtest katelagregaatidest saadud tuhk on aga niivõrd tugevasti põletatud, et selles sisalduv vaba lubi 5 atü juures nimetamisväärselt ei kustu. Isegi 10...20 atü juures ei kustu see tuhk küllaldaselt. Et suurtes katelagregaatides tekkinud lendtuha jääfraktsiooni saaks kasutada raskebetooni sideainena, tuleb seda jahvatada niivõrd, et tuha eripind oleks 2000...2500 cm<sup>2</sup>/g, ja alles pärast seda kustutada tuhk 10 atü juures 40...60 min. vältel.

Betoonisegu vahakord võetakse vajalikust betoonisegu konsistentsist ja betooni margist lähtudes, jämedateralise betooni puhul 1:2,5...3,5:4...6 (lendtuha jääfraktsioon:liiv:killustik), liivbetooni puhul 1:3...4,5 (jämedateralise liiv). Põlevkivituhk-raskebetoonist saab valmistada suurpaneele ja plokkke, mille mõõtmed ulatuvad kuni 600x300x20 cm. Betoonisegu kivistatakse autoklaavis 8 atü juures järgmise režiimi järgi: 2+5+2 (rõhu tõstmine +isotermiline kuumutamine + rõhu allalaskmine).

Põlevkivituhk-raskebetooni survetugevus on 200...500 kg/cm<sup>2</sup> ja külmutuskindlus 25...150 tsükli.

Kasutamine. Põlevkivituhk-raskebetoonist tooteid võib kasutada elamu- ja kommunaalehituste vundamentides, kandvates põikseintes ja vahelagedes. Põlevkivituhk-raskebetoonidetaile hakkab tootma 1970.a. Balti Ehitusmaterjalide Kombinaat - 60 000 m<sup>3</sup> tooteid aastas. Põlevkivituhk-raskebetoon on 10...20% võrra odavam kui portlandtsementbetoon.

## 2. Lendtuha peenfraktsioonist saadavad materjalid

Peenfraktsioonist on kõige otstarbekam valmistada madala- ja keskmargilisi kohalikke sideaineid, kukermiiti ja kukermiittsementi. Kukermiidi ja kukermiittsemendi koostisi, kivinemise protsesse ja omadusi on uurinud TPI ETUL-is E.Koger-mann, A.Hain, E.Piksary, I.Laul, H. Reispere, autor jt.

Kukermiidi ja kukermiittsemendi koostis. Kukermiit saadakse lendtuha peenfraktsioonist selle jahvatamisel, kukermiittsement aga peenfraktsiooni ja eelpeenendatud klinkri koosjahvatamisel.

Kukermiiti ja kukermiittsementi tuleb jahvatada sedavõrd, et eripind oleks vähemalt  $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Lähtudes klinkri manuse efektiivsuse koefitsiendist ja mõrdi vees püsivusest, on kukermiittsemendi sobivaimaks koostiseks 65-80% lendtuha peenfraktsiooni ja 35...20% tsemendiklinkrit.

Kukermiidi ja kukermiittsemendi kivilinemisprotsessid ja uusmoodustiste koostis. Kukermiidi kivilinmist on otstarbekas vaadelda kolme eri sideaineliste omadustega ühendite rühmana, kus hüdratatsiooni käik või tekkivad uusmoodustised on eripalgelised.

Esimese rühma ühenditeks on vaba lubi (11-15%) ja anhü-driit  $\text{CaSO}_4$  (9-12%), millede kivilinemise esmased hüdratatsiooni-produktid annavad kukermiidikivile algtegevuse. Seejuures need uusühendid tingivad toote paisumise ja tihenemise. Kukermiidi kivilinmisel on vabal lubjal ja anhüdriidil küllaltki mitmepalgeline ülesanne: kõigepealt hüdratiseeruvad nad omaette üksikühenditena, siis aktiveeruvad klaasifaasi ja lõpuks ühinevad räni ja alumiiniumiga ning moodustavad kas kolmik- või nelikhüdroühendeid.

Esimeses rühmas vaatleme peale lubja ja anhüdriidid otseste hüdratatsiooniproduktide veel lubja, anhüdriidid ja alumiiniumi komplekssoola - kaltsiumhüdrosulfoaluminaadi teket

ja omadusi, sest tal on lubja ja anhüüriidiga sarnane toime kukermiidikivi tugevuse arenemisele ja deformatsioonidele.

Teise rühma ühendeiks on tsemendi mineraalid dikaltsiumsilikaat  $\beta 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (9-11%) ehk lühendatult  $\text{C}_2\text{S}$  ja monokaltsiumalumiinaat  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}$  (0,8-1,5%) ehk lühendatult CA. Tsemendi mineraalide osatähtsus nende vähese hulga (10...12%) tõttu on kukermiidikivi tugevuse kujunemisel teisejärgulise tähtsusega. Nimelt on kiirelt hüdratiseeruvad mineraali CA-d äärmiselt vähe (~1,2%) ja  $\text{C}_2\text{S}$ , mida on küll rohkem (~10%), kivineb aeglaselt.

Kolmanda rühma ühendeiks on klaasifaas ja lahustumata jääk. Kukermiidikivi tugevus kasvab põhiliselt nende ühendite tõttu, mis kivinevad šlaki ja putsolaanse kivinemise tüübi järgi. Šlakitaoline kivinemine kulgeb kukermiidi klaasifaasis, mida ergastab kukermiidi enda vaba lubi ja anhüürit. Putsolaanne kivinemine toimub põhiliselt vaba ränihapendi ja vaba lubja vahel ning vähesel määral ka vaba alumiiniumhapendi ja vaba lubja vahel.

Esimese rühma ühendite kivinemine. V a b a l u b i a n n a b veega ühinedes üldtunnustatult kaltsiumhüdroksiidi



Madalamatel temperatuuridel võib kaltsiumhüdroksiid moodustada ka kristallhüdraate  $\text{Ca(OH)}_2\cdot(0,5...6)\text{H}_2\text{O}$ . Vaba lubja hüdratatsioonil tekkiva sideainekivi tugevus sõltub suuresti lubja ettevalmistamise viisist ja kivistamise tingimustest. Lubja võib kasutada kas kustutatud või kustutamata kujul. Levinum on esimene viis. Kustutamata jahvatatud lubja kasutamine on aga mitmeti perspektiivsem, kuna see võimaldab saada suurema tugevusega sideainekivi. Viimati nimetatud viis on tuntud lubja hüdraatse kivistamisena ja selle kasutamise alused on välja töötanud J.Smirnov ja L.Osin.

Lubja hüdraatsel kivinemisel saadava sideainekivi tugevus oleneb suuresti sellest, kuidas CaO ühineb veega, kas lahuses või tahke faasi pinnal nn. topokeemiliselt. Kvaliteetsem sideainekivi saadakse esimesel viisil. Sel juhul aga

peavad olema täidetud mitmed eeltingimused, mis garanteeriksid lubja hüdratiseerumise lahuses. See leiab aset siis, kui lubi ühineb veega suhteliselt aeglaselt. Tavaline kustutama ehituslubj on selleks liiga aktiivne ning ühineb veega väga tormiliselt, tahke faasi pinnal. Tingituna hüdratiseeruva massi ülekuumenemisest hakkab segu keema, mistõttu saadakse poorne ülekuumenemisest hakkab segu keema, mistõttu saadakse poorne üleküüliku struktuuriga sideainekivi. Selle vältimiseks ning lubja hüdratatsiooni aeglustamiseks kasutatakse mitmeid erivõtteid: manustatakse lisandeid (kips, naatriumsulfaat, sulfiitpiirituse praak jt.), alandatakse segu temperatuuri (külm seguvesi, segu spetsiaalne jahutamine) või doseeritakse sobiv kogus seguvett (100...150% lubja kaalust).

Seega peab protsess toimuma sellises mõõdukas tempos, et lubja hüdratatsioon kulgeks lahuses, kust siis tekkinud  $\text{Ca(OH)}_2$  välja sadeneb ning moodustab sideainekivi kristallskeleti. Lubja hüdraatse kivistamise protsessi täielik realiseerimine tööstuses on aga mitmeti komplitseeritud. Oht peitub asjaolus, et jahvatatud lubja osakesed on üldiselt erineva aktiivsuse ja suurusega. Seetõttu leidub alati hüdraatseks kivinemiseks sobivate terakeste kõrval osakesi, mis on ülemaärased aktiivsed ning ühinevad veega topokeemiliselt, ja vähe aktiivse lubja jämedamaid osakesi ( $> 20 \mu\text{m}$ ), mis reageerivad veega liiga hilja - kui sideainekivi skelett juba on moodustunud. Viimasel juhul peab  $\text{CaO}$  hüdratiseeruma isoleeritud kitsas ruumis, mida piirab varem tekkinud  $\text{Ca(OH)}_2$ . Seetõttu ei saa  $\text{CaO}$  edasisel hüdratatsioonil tekkiv  $\text{Ca(OH)}_2$  vabalt kristalliseeruda, rõhub pooride seintele ja sideainekivi võib ohtlikult paisuda. Seega on lubja hüdraatsel kivilinisel tekkiva sideainekivi monoliidile kahjulikud nii ülemaärased aktiivsed kui ka väheaktiivsed lubjaosakesed. Et osaliseltki säästa hüdraatsel kivilinisel tekkivat monoliiti nimetatud kahjulike mõjude vastu, eelkustutatakse lubja osaliselt, kusjuures hüdratiseerub lubja kõige aktiivsem osa.

Kukermiidi hüdratatsioonil toimub lubja hüdraatne kivilinimine, milleks on kaks soodsat tegurit. Esiteks on lendtuha peenes fraktsioonis sisalduv vaba lubi tekkinud valdavalt

tihedas kontaktis klaasifaasiga ja, teiseks, sisaldab kukermiit anhüdriiti, mistõttu oluline osa lubjast kustub mõõduka tempoga. Kuid peale selle vaba lubja, mis hüdratiseerub õigeaegselt, on kukermiidis osa vaba lupja ülemääraselt aktiivne ning ühineb veega tahke faasi pinnal ja osa sedavõrd väheaktiivne, et hüdratiseerub hilinenult, siis, kui on juba moodustunud jäik sideainekivi skelett.

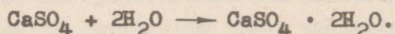
Lubja tardumisjärgne hüdratatsioon ehk tavaliselt mõistetav "lubja hilinenud kustumine" on kaksiktoimega. Esiteks tingib lubja hilinenud kustumine sideainekivis sisepingeid ja paisumise. Need on seda vähem ohtlikud, mida väiksem on hüdratiseeruva lubja hulk ja mida peenemad on lubjaterakesed. Teiselt poolt tingib lubja hilinenud kustumine sideainekivi sisemise kuivamise, mistõttu tõuseb märgatavalt selle tugevus. Joonisel 5 on toodud mitmesuguste geelide ja lubjahüdroksiidi survetugevus olenevalt nende veesisaldusest. Siit näeme, et sideainekivi 20...30 protsendilise niiskuse sisalduse juures, mis esineb tavaliselt betoonide kivilinisel, on tugevuse tõus niiskusesisalduse vähenemisel ühe protsendi võrra keskmiselt järgmine:

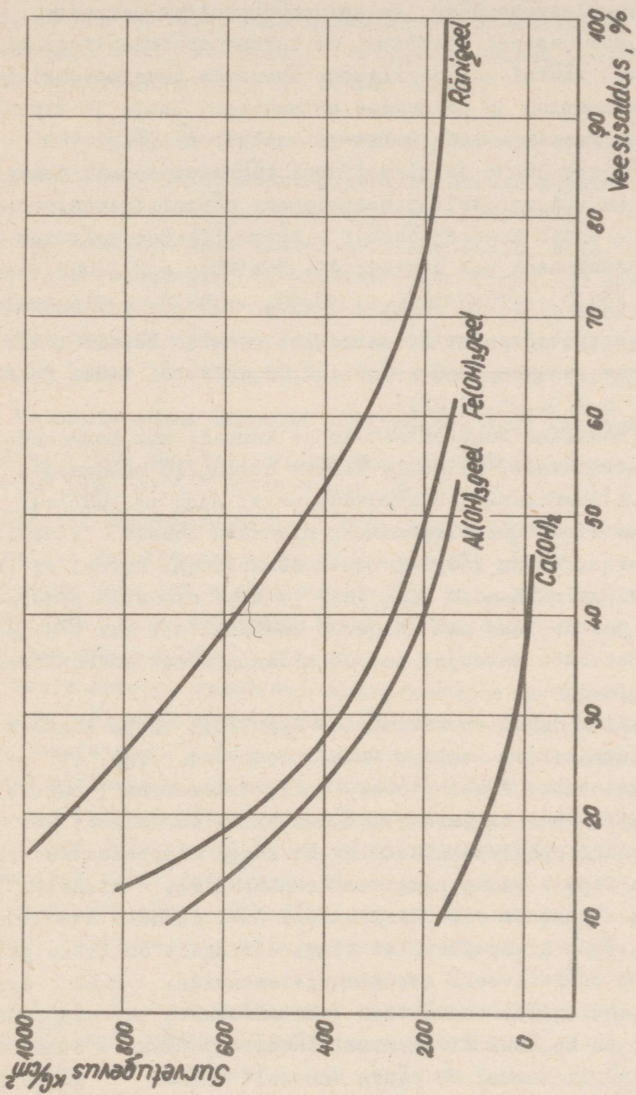
Ca(OH) <sub>2</sub> . . . . .	6	kG/cm <sup>2</sup> ,
ränigeel . . . . .	18	" ,
alumiiniumhüdroksiidigeel . . . . .	17	" ,
raudhüdroksiidigeel . . . . .	19	" .

Seega põhjustab niiskuse vähenemine sideainekivis ühe protsendi võrra survetugevuse tõusu olenevalt ühendi liigist 6 kuni 19 kG/cm<sup>2</sup> võrra.

Lubja tardumisjärgse kustumise tõttu paisub kukermiidikivi niiskes õhus kivilinisel lineaarselt ~ 1%, seega on kukermiidil paisuva tsemendi omadused niiskes õhus kivilinisel. Orienteeruvalt annab lubja hüdraatne kivilinimine plastse standardse mõrdi korral 28 päeva vanuselt kukermiidikivile survetugevuse 5...10 kG/cm<sup>2</sup>.

A n h ü d r i i t annab veega ühinedes kipsi





Joonis 5. Geelide ja lubjahüdroksiidi survetugevusi olenevalt niiskuse-  
sisaldusest.

Omaette struktuurielemendina on kipsi iga lühike, kõige rohkem 3 nädalat. Selle aja jooksul moodustab ta kaltsiumalumiinaatidega kompleksühendeid, kaltsiumhüdrosulfoaluminaate.

Nagu juba eespool mainitud, on kaltsiumhüdrosulfoaluminaat teataval määral analoogiliseks ühendiks kukermiidikivi tugevuse kujunemise ja paisumise seisukohalt lubja ja kipsiga, mistõttu vaatleme tema teket ja omadusi alljärgnevas.

Kips ühineb lubja ja klaasifaasi hüdratatsioonil tekki-va  $\text{Al}(\text{OH})_3$ -ga või monokaltsiumaluminaadi hüdratatsioonipro-dukutidega ja annab kompleksühendi - kõrgsulfaatse kaltsium-  
hüdrosulfoaluminaadi ehk etringiidi.  $3\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4 + 25\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ . Olenevalt lubja kontsentratsioonist sideainekivi vedelas faasis tekib etringiit kas lahuses ( $\text{CaO} \leq 0,9...1,08 \text{ g/l}$ ) või tahke faasi pinnal ( $\text{CaO} \geq 0,9...1,08 \text{ g/l}$ ).

Lubja madalama kontsentratsiooni korral, kus komponen- did ühinevad lahuses, paigutub tekkiv etringiit moodustuva sideainekivi pooridesse, tihendades seda, ning on ühtlasi positiivseks struktuurielemendiks, mistõttu tõuseb sideai- nekivi tugevus. Lubja kõrgema kontsentratsiooni korral ei la- hustu kaltsiumaluminaadid ning lubi ja kips rändavad nimeta- tud ühendi juurde, kus nad ühinevad kohtkindlalt ehk topokee- miliselt. Seetõttu materjal jaotub sideainekivis ebaühtlaselt ja toode paisub.

Kukermiidi puhul on kivinemise algetapil lubja kontsent- ratsioon sideainekivi vedelas faasis sedavõrd kõrge, et et- ringiit tekib tahke faasi pinnal. Selle tulemusena paisub kukermiidikivi vees kivinemisel lineaarselt keskmiselt 4%.

Kukermiidi puhul tekib etringiit seega ebasoodsates tin- gimustes ja tingib suure ning kestva paisumise, mistõttu teda ei saa arvestada vees kivinemisel positiivseks struktuuri- elemendiks. Õhus kivinemisel ei tingi etringiit ohtlikku pai- sumist ja on positiivseks struktuurielemendiks. Peab aga ütleva, et etringiidi osatähtsus kukermiidikivi survetugevuse kujunemisel on ka õhus kivinemisel äärmiselt väike - standard- se plastse mördi korral 28 päeva vanuselt vahest kõigest  $2...3 \text{ kG/cm}^2$ . Siit nähtub, et etringiidi teke oleks nagu eba-

soovitatav, sest ta on väikese tugevusega ja tingib kukermiidi-kivi ülemäärase paisumise vees. Tuleb aga meeles pidada ka seda, et see on lõiv, mida tuleb maksta klaasifaasi kipsiga ergastamise eest, misjärel survetugevus tõuseb plastse standardse mördi korral 50...75 kg/cm<sup>2</sup> võrra.

Teise rühma ühendite kivinemine. Dikaltsiumsilikaadi hüdratatsioonil tekib madalaaluseline kaltsiumhüdrosilikaat (0,8...1,5)CaO·SiO<sub>2</sub>·(0,5...2,5)H<sub>2</sub>O ehk lühendatult CSH(B). Kuna C<sub>2</sub>S hüdratiseerub suhteliselt aeglaselt, siis sellest tulenev survetugevuse osa plastse mördi korral 28 päeva vanuselt on orienteeruvalt 10...20 kg/cm<sup>2</sup>. Monokaltsiumaluminaadi otsesest hüdratatsiooniproduktidel tähtsust ei ole, sest nad ühinevad kipsi ja lubjaga, kusjuures moodustub etringiit.

Kolmanda rühma ühendite kivinemine. Neil kivinemisprotsessidel tekib madalaaluseline kaltsiumhüdrosilikaat (0,8...1,5) CaO·SiO<sub>2</sub>·(0,5...2,5)H<sub>2</sub>O ehk lühendatult CSH(B), samuti on võimalik hüdrogeleniidi 2CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O teke. Kui kukermiiti kasutatakse lubjaga manustatud mörtides, kus se-gasideaine vaba lubja sisaldus on üle 25...30%, võib tekkida lubjarikkam kaltsiumhüdrosilikaat (1,7...2)CaO·SiO<sub>2</sub>·(2...4)H<sub>2</sub>O ehk lühendatult C<sub>2</sub>SH<sub>2</sub>.

Peale eespool vaadeldud uusmoodustiste on kukermiidi kivinemisel võimalik mitmesuguste ühendite vaheliste tahkete lahuste tekkimine. Et suur osa uusmoodustistest on submikroskoopiliste mõõtmetega, on nende struktuuri kindlaksmääramine kas äärmiselt tülikas või hoopis võimatu isegi röntgenograafiliselt. Antud juhul tuleb nõustuda G.Kalousekiga, kes nimetab täpsemalt identifitseerimata koostisega geeli x-faasiks, mis võib sisaldada kõiki hüdrauliliste sideainete puhul esinevaid okside, kuid kus tingimata esinevad CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ja SO<sub>3</sub>.

Kukermiidi hüdratatsioonil tekkinud uusmoodustistest on osa suhteliselt hästi väljaarenenud kristallilise struktuuri-ga, osa aga on kolloidisel kujul ning submikroskoopiliste mõõtmetega (< 0,1 μm) kristalliidid. Hästi väljaarenenud kristal-

lilise ehitusega on kaltsiumhüdroksiid ja vähemal määral ka etringiit. Kolloidsed on kaltsiumsilikaadi, šlaki ja putsolaanse osa kivinemisel tekkinud uusmoodustised.

Edasisel kivinemisel toimuvad uusmoodustiste koostises ja struktuuris muutused. Kaltsiumhüdroksiid reageerib osalt putsolaanse komponendiga ning annab kaltsiumhüdrosilikaadi. Etringiit võib osalt üle minna kipsivaesemasse vormi - monosulfaadiks ning seejuures võib eralduda ka kips. Kaltsiumhüdrosilikaat CSH(B) koostisse kuuluvad kolloidsed uusmoodustised - kristalliidid kasvavad, mistõttu alaneb toodete kaanemine kuivamisel.

K u k e r m i i t t s e m e n d i, mille koostises on 20...35% portlandtsemendi klinkrit ja 80...65% lendtuha peenfraktsiooni, hüdratatsioonil reageerivad veega kõigepealt klinkri mineraalid, tuhas sisalduv vaba lubi ja anhüdriit. Sellele järgneb etringiidi teke ja tuha klaasifaasi aktiveerimine ning hüdratatsioon. Ühtlasi ühineb tuha putsolaanne osa vaba lubjaga, mis pärineb kas klinkri trikaltsiumsilikaadi hüdrolüüsist või tuhas. Seejuures tekkivatest uusmoodustistest on tähtsamad kaltsiumhüdrosilikaadid. Alperioodil tekib lubjarikkas keskkonnas  $C_2SH_2$  ja hiljem, kui sideainekivi vedelas faasis on lubja kontsentratsioon langenud alla 1,12 g CaO/l, moodustub CSH(B). Kaltsiumalumiinaatidest tekib algul  $C_4AH_{13}$ , mis, reageerides osaliselt kipsiga, annab etringiidi. Etringiit tekib ka tuha klaasifaasis sisalduva  $Al_2O_3$  ning vaba lubja ja kipsi vahelisel reaktsioonil. Uusmoodustistest esineb veel kaltsiumhüdroksiid. Toetudes kukermittsemendi ja šlakktsementide koostise teatavale analoogiale esineb arvatavasti ka hüdrogeleniit  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$  ja hüdrogranaadid üldkoostisega  $3CaO \cdot zAl_2O_3 \cdot (1-z)Fe_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot (6-2x)H_2O$ . Kukermittsemendi puhul tuleb arvestada samuti geeli x-faasi.

## Kukermiidi ja kukermiitsemendi füüsikalised

### ja sideainelised omadused

Erikaal ja mahukaal. Kukermiitsideainete erikaal oleneb põhiliselt lähtematerjalide erikaaludest ja nende vahekorrast:

kukermiidi erikaal	2,76...2,82 g/cm <sup>3</sup> ,
kukermiitsemendi erikaal	2,86...2,97 g/cm <sup>3</sup> .

Mahukaal oleneb põhiliselt lähtematerjalide vahekorrast ja sideaine peenusest ning on, olenevalt tihendamise viisist, järgmine:

kukermiidi puiste mahukaal	950...1050 kg/m <sup>3</sup> ,
" tihendatud mahukaal	1250...1350 kg/m <sup>3</sup> ,
kukermiitsemendi puiste mahukaal	1000...1100 kg/m <sup>3</sup> ,
" tihendatud mahukaal	1300...1400 kg/m <sup>3</sup> .

Normaalkonsistents ja tardumise ajad. Normaalkonsistentsse kukermiitaigna saamiseks on vajalik veehulk 27,0...32,0% ja kukermiitsemendi puhul 26,0...28,0% sideaine kaalust. Kukermiitsideainete suurem veevajadus portlandtsemendiga (24...26%) võrreldes on põhiliselt tingitud peenfraktsiooni vaba lubja sisaldusest.

Kukermiidi tardumise algus 45 min...2 t., lõpp 2 t. ... 6 t.  
Kukermiitsemendi tardumise algus 1...2 t., lõpp 2 t. 30 min... 6 t.

Mida rohkem sisaldab kukermiitsideaine vaba lupja ja mida aktiivsem on vaba lubi, seda suurem on veevajadus ja seda kiiremini tardub sideaine.

Mahumuutuse ühtlus, paisumine ja kahanemine. Kukermiitsideained sisaldavad mahumuutuse ühtlust ohustada võivaid ühendeid üldiselt tunduvalt rohkem kui portlandtsement, kusjuures sulfaatse väevli sisalduse poolest asuvad nad portlandtsemendi ja paisuvate tsementide piirimail. Mahumuutuse ühtlus on kukermiitsideainete puhul üks komplitseeritumaid ja ühtlasi ka kesksamaid sideaine kvaliteeti määravaid tegureid. Sellest oleneb suuresti kukermiitide kasutamise viis ja -piirkond.

Selles küsimuses orienteerumiseks ning kukermiitsideainete optimaalseima valmistamistehnoloogia väljatöötamiseks ja sobivaimate kasutusalaade kindlaksmääramiseks on vaja tunda üksikasjaliselt neid protsesse, mis tingivad sideainete ebaühtlase mahumuutuse.

Kõigepealt vaatleme portlandtsementide kui kõige põhjalikumalt uuritud ja laiemalt kasutatavate sideainete puhul selles osas kulgevaid füüsikalisi-keemilisi protsesse, kehtivaid seisukohti ja nõudeid.

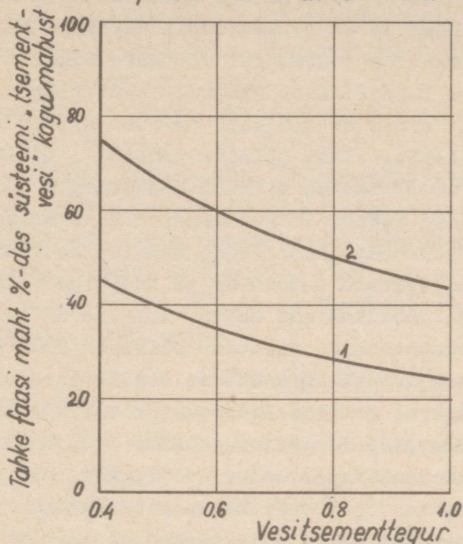
Mineraalsete sideainete ja vee vahelisel reaktsioonil tekkivate uusmoodustiste maht on väiksem kui algkomponentide (sideaine mineraal ja vesi) mahtude summa. Näiteks portlandtsemendi puhul on uusmoodustiste maht ~ 5...25% võrra väiksem algkomponentide mahtude summast.

Millest on aga siis tingitud esimesel pilgul kummalisesena näiv asjaolu, et kivinemisel mõned sideained siiski paisuvad ja mõnikord isegi niipalju, et tooted purunevad?

Seda põhjustab sideaine hüdratatsioonil tekkivate uusmoodustiste paigutuse mikroebaühtlus, mis tuleneb mineraalsete sideainete hüdratatsiooniprotsesside omapärasest. Nimelt võib sideaine ja vee vaheline reaktsioon toimuda kahel viisil: esiteks, läbi vee faasi, kus sideaine komponendid kõigepealt lahustuvad vees, siis ühinevad veega ja sadenevad üleküllastatud lahusest välja ning kristalliseeruvad, ja teiseks, tahke faasi pinnal, kus vesi ja mineraalid ei ühine mitte lahuses, vaid kohtkindlalt ehk topokeemiliselt.

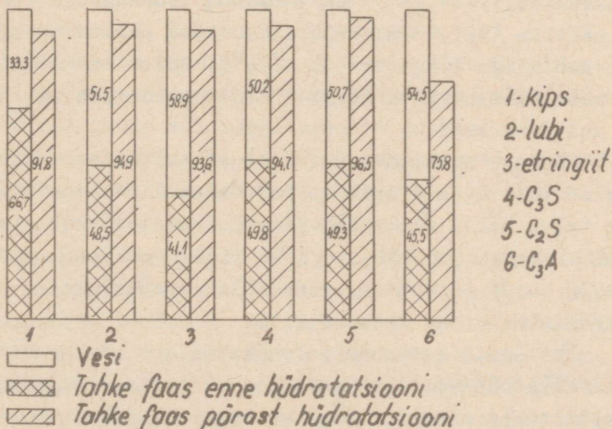
Sideaine uusmoodustiste ebaühtlase paigutuse tingib topokeemiline protsess. Keemilistest jõududest põhjustatuna rändab vesi tahke faasi pinnale ja aine paigutub ümber nii, et uusmoodustised kontsentreeruvad üksikutesse kohtadesse ning tingivad materjali ebaühtlase jaotuse. Seejuures tuleb silmas pidada, et ehk küll uusmoodustiste maht on väiksem algkomponentide mahtude summast, on ometi sideaine hüdratatsioonil tekkinud tahke faasi (sideainekivi) maht suurem kui algtahtke faasi (sideaine mineraal) maht (vt. joon 6). Näiteks portlandtsemendi mineraalide hüdratatsioonil

Süsteemi „portlandtsement - vesi“  
tahke faasi absoluutne maht



- 1-kohe peale komponentide omavahelist segamist  
2-peale hüdratatsiooni lõppu

Süsteemi „sideainemineraal-vesi“ mahu muutus



Joonis 6. Portlandtsemendi ja selle mineraalide hüdratatsioonist tingitud absoluutse mahu muutused.

suureneb tahke faasi maht ~ 35...120% võrra. Asjaolu, et kivinemisel uusmoodustised jaotuvad ebaühtlaselt ning kuhjuvad üksikutesse kohtadesse ja et reaktsioonil tekkinud hüdratiseeritud ühendite maht on suurem kui algtahtke faasi maht, tingibki paisumise. Ebaühtlasest mahumuutusest tingitud paisumine ei ole alati sideaine kahjulik omadus. Nimelt võib mõõduka paisumise korral saada paisuva tsemendi, millel tavalise tsemendiga võrreldes on mitmeid hinnatavaid eriomadusi. Näiteks on need tsemendid asendamatud monteeritavate betoon- ja raudbetoonkonstruktsioonide monolitiseerimisel ning vett mitteläbilaskvate betoonide ja krohvide valmistamisel. Paisumine on mõõdukas ehk ohutu, kui see on väiksem sideainekivi deformatsioonide taluvuse piirist. Mõõduka paisumise korral ei kahjustu kuigi oluliselt sideainekivi struktuur ning selle tugevus ja pikaealisus ei alane ülemäära. Sideainekivi deformatsioonide taluvuse määr ei ole konstantne suurus, vaid see oleneb sideaine liigist, paisumist tingiva ühendi koostisest, ühendi tekke kineetikast ja paisumiskollete jaotuse ühtlusest. Olulisemad on kaks viimast tegurit, kusjuures sideainekivi talub seda suuremat paisumist, mida noorem see on ja mida ühtlasemalt on jaotunud paisumiskolled.

Tsemendikivi ohutu lineaarne paisumine esimese ööpäeva jooksul on 1...1,5% ja esimese kuu jooksul 1,5...2%. Edasi on näiteks 1/2...1 a. vahemikus ohutu paisumise määr ühe kuu kohta aga kõigest 0,05...0,1%. Neist andmetest nähtub, et noor tsemendikivi talub 10...30 korda suuremaid paisumisi kui vana kivi.

Peaaegu niisama suuri lahkuminekuid tsemendikivi paisumise taluvuses tingib ka paisumiskollete jaotuse erinevus. Nii talub hästi ühtlaselt jaotunud paisumiskolletega tsemendikivi kuni 4% või isegi 6% lineaarset paisumist. See ületab 5...10 korda paisumise, mida talub ebaühtlaselt jaotunud paisumiskolletega tsemendikivi.

Ühtlaselt jaotunud paisumiskollete heaks näiteks on põlevkivituhk-portlandtsemendi kivi, kus lendtuha peenimas fraktsioonis sisalduv väga peeneteraline ( $< 15 \mu\text{m}$ ) vaba lubi võib põhjustada suhteliselt suure, kuid ohutu paisumise.

Ebaühtlaselt jaotunud paisumiskolded esinevad betoonides, kus tsemendi leelised ühinevad reaktsioonivõimeliste täitematerjalidega. Siin talub toode lineaarselt kõigest 0,2...0,4% suurust paisumist.

Paisumise suurust saab reguleerida ning hoida mõõdukais piirides sel teel, et muudetakse sideainekivi monoliiti moodustavate põhiühendite ja paisumist tingivate ühendite hulgalisi vahakordi ja nende reageerimise kineetikat. Sideainekivi monoliiti moodustavate põhiühendite sidejõud ja paisumist tingivate ühendite jõud peavad olema kogu paisumisprotsessi vältel selliselt tasakaalustatud, et tekiks ainult mõõdukas paisumine.

Portlandtsemendi ebaühtlase mahumuutuse võivad põhjustada vaba lubi, vaba magneesiumoksiid ja sulfaatne väävel.

1. Vaba lubi paisub kustumisel ning selle üleäärane hulk (üle 2%) põhjustab kivinevas sideaines ohtlikke sisepeingeid, mistõttu tsemendikivi paisub ja selle tugevus ei tõuse vajalikus tempos ning halvemal juhul võib see isegi alaneda ning toode puruneda.

2. Vaba magneesiumoksiid, mis esineb periklassina, hüdratiseerub vabast lubjast palju aeglasemalt (GOST 10178-62 järgi võib MgO üldine hulk olla kõige rohkem 5%) ning põhjustab sellest veelgi ohtlikumaid paisumisi, mis võivad tsemendikivi purustada. Kui portlandtsemendis olev vaba lubi kustub põhiliselt mõne nädala jooksul, siis periklassina esinev vaba magneesiumoksiid hüdratiseerub palju hiljem, sageli alles kuude või isegi aastate jooksul.

Vaba MgO hüdratatsioonil tekkivad kahjustused on vaba lubja kahjustustest ohtlikumad veel seepärast, et hüdratatsioon toimub siin põhiliselt topokeemiliselt.

3. Sulfaatne väävel kipsi naol on portlandtsemendis obligatoorne komponent. Kipsi mõõdukas hulk ( $SO_3 = 1,5...3,5\%$ ) reguleerib tsemendi tardumist ja forsseerib selle kivinemist ning tõstab marki. Sulfaatne väävel võib aga olla ka kahjulikuks komponendiks, kui tsement sisaldab seda üleäärasel hulgal. Nimelt ühineb kips tsemendi trikaltsiumaluminaadiga topokeemiliselt, kusjuures tekib kaltsiumhüdrosulfoalu-

minaat ehk etringiit  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot31\text{H}_2\text{O}$ . Portlandtsemendi kivinemisel peab etringiit põhiliselt moodustuma esimese ööpäeva jooksul, kuna selle hilisem teke kahjustab tsemendikivi. Sellest tingimusest lähtudes on reglementeeritud ka sulfaatse väävli lubatav ülempiir portlandtsemendis.

Lendtuha peenfraktsioonis on mahumuutuse ühtlust kahjustada võivatest komponentidest vaba lupja 11...15%, magneesiumoksiidi 2,5...3% ja  $\text{SO}_3=5...7\%$ . Ehkki vaba lubja ja sulfaatse väävli keskmised hulgad ületavad suuresti portlandtsemendi puhul ettenähtud ülempiire, ei saa ometi peenfraktsiooni mahumuutuse ühtluse üle otsustada ainult eelvaadeldud ohtlike komponentide hulga järgi.

Kuna sideainete paisumistaluvuse määrad on erinevad, siis on ka ilmne, et nad võivad paisumist tingivaid ühendeid sisaldada erisugusel hulgal. Näiteks on kukermitsideainetel ohtlike ühendite reaktsiooni kineetika tunduvalt teistsugune kui portlandtsemendil. Seetõttu peavad kukermitsideainete puhul kehtima tõenäoliselt teised ohtlike lisandite piirhulgad kui portlandtsementidel.

Vaba lubi ja vaba  $\text{MgO}$  reageerivad kukermitides tunduvalt kiiremini, sulfaatne väävel aga aeglasemalt kui portlandtsemendis. Seetõttu talub kukermit portlandtsemendist rohkem vaba lupja (kuni 15%) ja vaba  $\text{MgO}$ , kuid vähem sulfaatses väävli ( $\text{SO}_3$  kuni 2...3%).

Näiteks peenes fraktsioonis sisalduvast vabast lubjast hüdratiseerub 1 päeva jooksul ~70% ja 3 päeva jooksul ~90%. Ülejäänud vähene vaba lubi, mis hüdratiseerub täielikult 5...10 päeva jooksul, ei tingi oluliselt kahjulikke paisumisi. Vaba magneesiumoksiid on samuti kahjutu, sest, esiteks, peenfraktsioonis sisalduv  $\text{MgO}$  on põhiliselt seotud uusühendites (~80%) ning vaba  $\text{MgO}$  sisaldus on valdavalt alla 1% ja, teiseks, on vaba  $\text{MgO}$  põlevkivi lühiajalise põletamise tõttu (mõni sekund) aktiivne ning hüdratiseerub palju kiiremini kui klinkris pikaajalisel põletamisel tekkinud jämedakristalliline periklass.

Sideainekivi moodustavate põhiühendite aktiivsus ning nende hüdratatsiooni kiirus on portlandtsemendil palju

suurem kui põlevkivituhk-sideainetel. Kui portlandtsemendi kivinemisel algab intensiivne tugevuse kasv poole päeva vanuselt, siis kukermiidil 3...5 päeva ja kukermiittsemendil 1...1,5 päeva vanuselt. Seega kustub peenfraktsioonis vaba lubi põhiliselt enne intensiivse kivinemise perioodi. Seepärast taluvad põlevkivituhk-sideained rohkem vaba lubja ning nendest valmistatud tooted suuremaid paisumisi.

Kehtib üldine nõue, et mida kiiremini kivineb sideaine, seda kiiremini peab lõppema ka vaba lubja kustumine. Ainult teatav vähene hulk vaba lubja (kuni 2...5%) võib kustuda pärast intensiivse kivinemise perioodi. Hilinenult kustuva vaba lubja hulk võib olla seda suurem, mida suurem on sideainekivi monoliiti moodustavate põhiühendite sidejõud ja mida peeneteralisem on vaba lubi. Sellega on ka seletatav, miks klinkri manus on vähese efektiivsusega ja mõningatel juhtudel isegi kahjulik lendtuha jämedamatele fraktsioonidele, mis sisaldavad rohkem jämedateralist vaba lubja ( $> 15\%$ ). Klinkri manuse tõttu tõuseb küll põlevkivituhk-sideaine kivinemise kiirus, kuid vaba lubja kustumise kiirus ei muutu. Seetõttu kukermiittsemendis kustub pärast intensiivse kivinemise perioodi suhteliselt palju rohkem vaba lubja kui kukermiidis. Kas see on ohtlik kukermiittsemendile või mitte, oleneb kukermiittsemendi sideainekivi monoliiti moodustavate põhiühendite ja paisumist tingiva vaba lubja jõudude vahekorrrast. Peenfraktsiooni baasil saadud kukermiittsemendil on monoliiti moodustavate põhiühendite sidejõud sedavõrd suuremad peeneteralise vaba lubja ühtlaselt jaotunud paisumisjõust, et siin ohtlikku paisumist ei toimu.

Jämedamate fraktsioonide baasil saadud kukermiittsemenditel on aga sideainekivi põhiühendite sidejõud väiksemad ja jämedateralise vaba lubja paisumist tingiva jõu kolded jaotunud sedavõrd ebaühtlaselt ja niivõrd suured, et tekib ohtlik paisumine. See kahjustab tugevalt sideainekivi struktuuri ning alandab suuresti tugevust.

Tabelis 8 on toodud kukermiit- ja kukermiitseptmentmördi paisumise suurused nii õhus kui ka vees kivinemisel. Õhus kivinemisel tekivad paisumine on põhiliselt tingitud vabaltubja kustumisest.

T a b e l 8

Kukermiitmördi ja kukermiitseptmentmördi paisumine

Sideaine nimetus	Niiskes õhus					V e e s				
	paisumise suurus lineaarset %des	paisumise kestus päevades, mille vältel saavutatakse kogu paisumisest				paisumise suurus lineaarset %des	paisumise kestus päevades, mille vältel saavutatakse kogu paisumisest			
		50%	70%	90%	100%		50%	70%	90%	100%
Kukermiit	1,0	2	3	7	16	4,0	4	7	12	18
Kukermiitseptment	0,7	1	2	4	10	1,0	1	2	5	10

Kukermiidil ja kukermiitseptmendil on vabaltubja kustumisest tingitud lineaarne paisumine peaaegu võrdne, ~1%. Niihästi kukermiit kui ka kukermiitseptment taluvad nii suurt, põhiliselt vabaltubja kustumisest tingitud paisumist ning käituvad seega nagu paisuvad tsemendid.

Sulfaatne väävel seotakse portlandtsemendi kivinemisel põhiliselt esimese ööpäeva vältel. Kukermiidis seotakse aga esimese ööpäeva jooksul sulfaatses väävlist kõigest 50...70% ja 3 päeva vältel 60...80%. Etringiidi teke lõpeb alles 7 kuni 21 päeva pärast.

Kukermiitseptmendi kivinemisel tekib etringiit kiiremini kui kukermiidis. Siin seotakse esimese ööpäeva jooksul 70...85% ja 3 päevaga 80...95% sulfaatses väävlist. Kukermiitseptmendis lõpeb etringiidi teke 5 kuni 10 päeva jooksul.

Anhüdriit on kukermiidis kõige ohtlikum ühend, mis tingib vette asetatud toote pikaajalise (12...18 päeva) ja suure paisumise, kuni 4% ulatuses. Sellist paisumist kukermiitmört ei talu ning puruneb. Kukermiitmört peab enne vette asetamist kivinema õhus 5...10 päeva, kuni sulfaatses

väävlist on seotud 80...90%. See on vajalik, et enamik etringiidist võiks tekkida vähese niiskuse käes, kus see ei põhjusta ohtlikku paisumist.

Nimetatud aja jooksul kukermiidi põhiühendid moodustavad küllalt tugeva sideainekivi. See monoliit talub nii vee poolt tingitud struktuuri lõdvenduse kui ka tekkiva etringiidi poolt põhjustatud paisumise. Kukermiitsementmört saavutab vees püsivuse juba ühe ööpäeva vanuselt, ehkki selleks ajaks on sulfaatset väävlit seotud vaid 70...85%, mis on tunduvalt vähem kui kukermiidil vees püsivuse saavutamise ajal. Siinjuures tuleb aga arvestada seda, et kukermiitsemendi sideainekivi on saavutanud juba küllaldase tugevuse ( $20$  kuni  $35 \text{ kg/cm}^2$ ) ning talub hiljem tekkivat etringiiti.

Kukermiitsementmört paisub vees 9 kuni 12 päeva jooksul lineaarselt  $\sim 1\%$ . See paisumine on ohutu ning kukermiitsement käitub nagu paisuv tsement.

Peale eelvaadeldud tegurite, mille alusel põhjendati tsementide ja kukermitide mahumuutuse ühtlust kahjustada võivate ühendite ohtlikkuse määra, tuleb veel arvestada seda, kuivõrd olulised on need üendid sideaine kivinemisel. Portlandtsemendi mahumuutuse ühtlust ohustada võivast kolmest ühendist kaks - vaba lubi ja periklass - on igal juhul kahjulikud. Kips on kivinemiseks vajalik, kuid ülemäärases hulgas on kahjulik.

Kukermitidel on igal juhul kahjulikuks ühendiks aga üks - vaba  $\text{MgO}$ , ülejäänud kaks ühendit - vaba lubi ja kips on kivinemiseks vajalikud, kuid nende ülemäärane hulk on kahjulik. Kukermiit vajab kivinemiseks 8...12% vaba lupja ja 3...5% anhüdrüiti. Seega vaba lupja ja anhüdrüiti on ülemääraselt, kui nende hulgad ületavad vastavalt 12% ja 5%.

Kukermiitsement on universaalne paisuv tsement, mis paisub nii õhus kui ka vees kivinemisel. Seni tuntud paisuvad tsemendid, millede paisumine tugineb etringiidi tekkele, paisuvad vees kivinemisel, õhus kivinemisel aga kahanevad. Kukermiiti tuleb aga praktilise kasutuse seisukohalt vaadelda kui ainult õhus paisuvat sideainet. Tema vees paisumise efekti ei ole võimalik praktiliselt kasutada, kuna toote

vette asetamise ajast oleneb suuresti paisumise kvaliteet. Kui kukermiittoode asetatakse vette liiga vara, ei talu see ülemääraseid deformatsioone, kui aga liiga hilja, ei toimu vajalikku paisumist.

Hüdrauliline aktiivsus. Kukermiit rahuldab plastse mördiga katsetades markide "100...150" ja kukermiitsegment markide "200...300" nõudeid. Kivinemise kiirust iseloomustav suurus  $R_7/R_{28}$  on kukermiidil 0,18...0,25, kuid kukermiitsegmentil 0,30...0,35. Kukermiit saavutab vees püsivuse 5...10 päeva vanuselt, kukermiitsegment aga 1 päeva vanuselt. Keskonna temperatuuri muutus mõjutab kukermiitsegmenti kivinemise kulgu tunduvalt vähem kui kukermiidil. Temperatuuri langusel 20°C kuni 0°C väheneb kukermiitmördi survetugevus ~ 5 korda; kukermiitsegmentil aga ~ 40% võrra.

Kukermiidi ja kukermiitsegmenti pikaajalise kivinemise käigu kohta (kuni 5 aastani) on toodud andmed tabelis 9.

Kukermiit on aeglaselt kivinev sideaine, mille hüdraulilisest aktiivsusest realiseerub esimese kuu jooksul suhteliselt väike osa. Pärast seda kivineb kukermiit väga intensiivselt. Näiteks on 2 kuu vanuse mördi tugevus ~ 1,8 korda suurem kui 1 kuu vanusel. Kukermiitsegmentil on see suhe märksa madalam - 1,3. Pärast 2 kuud kivineb kukermiit küllaltki intensiivselt edasi ning üheaastaselt on suhe  $\frac{R_{1a}}{R_{28 p}} \sim 3$ .

Kukermiitsegmentil on see suhe ~ 1,9 ja portlandtsegmentil kõigest 1,5.

Kukermiit- ja kukermiittsementmörtide tugevuse  
kulg pikaajalisel kivilnemisel

Sideaine liik	Kivilnemise kestus								
	3pv.	7pv.	28pv.	2k.	3k.	6k.	1a.	3a.	5a.
	Mördi survetugevus kG/cm <sup>2</sup>								
Kukermiit	15	28	125	220	265	320	370	440	460
Kukermiit- tsement	60	78	245	320	355	410	455	540	565
Mördi suhteline survetugevus %-des 28-päevase survetugevuse suhtes									
Kukermiit	12	22	100	176	212	256	296	352	368
Kukermiit- tsement	24	32	100	131	145	167	186	220	231

Pikaealisus. Kukermiidi ja kukermiittsemendi puhul on pikaealisuse näitajatest olulisemad külmutuskindlus ja vahelduva niiskumise ja kuivamise kindlus.

Plastsest mördist segu vahekorras 1:3 (sideaine:liiv) valmistatud proovikehad taluvad pärast 28-päevast kivilnemist kukermiitide kasutamisel 10-15 tsükli ja kukermiittsementide kasutamisel 50...100 tsükli vahelduvat külmutamist ja ülesulatamist.

Samad proovid taluvad intensiivset laboratoorset vahelduvat niiskumist ja kuivamist kukermiidi ja kukermiittsemendi puhul vastavalt 10...50 ning 50...100 tsükli.

Kukermiidi ja kukermiittsemendi kasutamine. Kukermiiti võib kasutada ehitismörtide valmistamiseks, mille tugevusmark on kuni "75". Kukermiittsemendist saab valmistada mörte margiga kuni "200" ja betoone kuni "300". Mõlemad sideained on eriti hinnatavad selle poolest, et nendest valmistatud too-

ted kivinemisel ei kahane, vaid paisuvad mõõdukalt. Seepärast on nii kukermiit- kui ka kukermiitsemendimördid ja betoonid suure tihedusega ega lase vett läbi. Selle hinnatava omaduse tõttu võib kukermiitsementi kasutada raudbetoonkonstruktsioonide monolitiseerimiseks ja vett mitteläbilaskvate mörtide ning betoonide valmistamiseks. Kukermiiti saab kasutada vett mitteläbilaskvate mörtide valmistamiseks. Kukermiit- ja kukermiitsemenditooted on 10...20% võrra odavamad kui vastavad portlandtsemenditooted.

### 3. Lendtuha peenimast fraktsioonist saadavad

#### materjalid

Põlevkivituhk-portlandtsement. Peenimat fraktsiooni kasutatakse uut liiki kiirkivineva ja kõrgemargilise portlandtsemendi saamiseks. Peenima fraktsiooni (20...30%) ja tsemendiklinkri (80...70%) koosjahvatamisel saadud tsemendi nimetatakse põlevkivituhk-portlandtsemendiks. Kui kõikide varem tuntud portlandtsementide puhul on kips obligatoorseks lisandiks, siis põlevkivituhk-portlandtsemendi puhul pole seda vaja, kuna lendtuha peenim fraktsioon sisaldab küllaldaselt (~ 15%) kipsanhüdriiti.

Varem vaadati kõigile põlevkivituhk-ehitusmaterjalidele kui odavatele madalama kvaliteediga asendajatele, mida pidi kasutatama vaid kohaste kvaliteetsete materjalide defitsiituse tõttu. Nüüd on aga lendtuha fraktsioonide baasil välja töötatud uued efektiivsed põlevkivituhk-ehitusmaterjalid, mis on varem tuntud materjalidega kas samaväärsed või isegi paremad. Näiteks kukermiitgaasbetoon ja kukermiitsemend on täiesti samaväärsed lubja ja portlandtsemendi baasil saadud materjalidega. Põlevkivituhk-portlandtsement aga ületab tavalise portlandtsemendi rea oluliste näitajate poolest ning on ainulaadseks materjaliks nii põlevkivituhkade kui ka üldse teiste analoogiliste tööstusjääkide (kivisöetuhad, šlakid) baasil saadavate sideainete seas. Nimelt on lendtuha peenima fraktsiooni baasil saadav põlevkivituhk-portlandtsement kiiremini kivinev ja kõrgema margiga kui samast klinkrist val-

mistatud portlandtsement ning sellest valmistatud tooted on parema püsivusega. Põlevkivituhk-portlandtsemendi suur efektiivsus tingis selle kiire kasutuselevõtu ehitustööstuses. Selle tulemusena suudeti üle saada kõrgemargiliste betoonide "400...500" tootmise kitsaskohast meie vabariigis. Põlevkivituhk-portlandtsemendi selline efektiivsus tuleneb reast peenima fraktsiooni spetsiifilistest omadustest. Esiteks vähendab peenima fraktsiooni manus mõrdi või betoonisegu veevajadust 10...20% võrra, teiseks muudab see fraktsioon tsemendi hästi kivinevaks hüdrotermilistes tingimustes ja kolmandaks põhjustab toodete mõõduka paisumise.

Seega ühendab põlevkivituhk-portlandtsement endas kolme eri liiki tsemendi - plastifitseeritud, putsolaanse ja mittekahaneva portlandtsemendi spetsiifilisi omadusi.

Põlevkivituhk-portlandtsemendi kasutamine annab meie ehitustööstusele peale tehnilise efekti veel ka suurt kasumit. Põlevkivituhk-portlandtsemendi korral on tsemendi erikulu 1,3...1,6 korda väiksem kui tavalise portlandtsemendi puhul. Klinkri erikulu on veelgi väiksem, kuna põlevkivituhk-portlandtsement sisaldab 10...25% võrra rohkem lisandit (tuhka) kui tavaline portlandtsement (kips või kips hüdraulilise lisandiga). Põlevkivituhk-portlandtsemendi kasutamisel saadakse säästu 23...48 rubla ühe tonni manustatava tuha kohta. Põlevkivituhk-portlandtsemendist on valmistatud ligi 500 000 m<sup>3</sup> kõrgemargilisi raudbetoon- ja pingebetoonkonstruktsioone. Lähemal aastail suureneb põlevkivituhk-portlandtsemendi toodang tsemenditehases "Punane Kunda" 300 000 tonnini aastas. Lentuha peenimat fraktsiooni saadakse elektrijõujaamadest praegu nii palju, et selle manusega võib aastas valmistada kuni 3 milj. tonni kiirkivinevat ja kõrgemargilist põlevkivituhk-portlandtsementi.

Põlevkivituhk-portlandtsemendi tootmise tehnoloogia ja kasutamise alused on välja töötanud TPI ETUL-is A.Hain, E.Piksarv, R.Otsman, V.Soonike, autor jt.

Põlevkivituhk-portlandtsemendi kivinemine ja uus-  
moodustiste koostis. Põlevkivituhk-portlandtsemendi hüdratatsioonil reageerivad veega kõigepealt tsemendi mineraalid, tuhas sisalduv vaba lubi ja anhüdriit. Viimaste toimel aktiveerub tuha klaasifaas, toimub selle hüdratatsioon ja tuha putsolaanne osa ühineb vaba lubjaga.

Põlevkivituhk-portlandtsemendi kivinemisel tekib rida uusmoodustisi, millest tähtsamad on kaltsiumsilikaatide ( $C_3S$  ja  $C_2S$ ) hüdratatsioonil tekkivad kaltsiumhüdrosilikaadid. Kivinemise algerioidil, kus reaktsioonid kulgevad üleküllastatud lubja lahuses, tekib lubjarikas ühend  $(1,7-2,0)CaO \cdot SiO_2 \cdot (2-4)H_2O$  ehk lühendatult  $/C_2SH_2/$ , mis hiljem, kui lahuse lubjasisaldus alaneb  $1,12 \text{ g CaO}/1$ , läheb üle lubjavaesemasse vormi  $(0,8-1,5)CaO \cdot SiO_2 \cdot 0,5-2,5 H_2O$  ehk lühendatult  $/CSH(B)/$ .

Trikaltsiumaluminaadi  $C_3A$  ja kaltsiumalumoferridi  $C_4AF$  hüdratatsioonil tekivad algerioidil  $C_4AH_{13}$  ja  $C_4FH_{13}$  ning nende tahked lahused. Anhüdriidi hüdratatsioonil tekkinud kips ühineb kaltsiumhüdroaduminaadiga, kusjuures moodustub etringiit  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ . See protsess aeglustab mõdukalt hüdroaduminaatide teket ning seega reguleerib tsemendi tardumist. Peale selle intensiivistab kips põlevkivituhk-portlandtsemendi hüdratatsiooni ning forsseerib kivinemist.

Oluliseks struktuurilemendiks on samuti kristalliline  $Ca(OH)_2$ , mis tekib portlandtsemendi klinkri kaltsiumsilikaatide ( $C_3S$  ja  $C_2S$ ) hüdrolüüsi ja tuha peenima fraktsiooni vaba lubja hüdratatsiooniprotsessi tulemusena. Tuhas sisalduva vaba lubja kustumine tingib tsemendikivi tihenemise ja mõduka paisumise. Seoses tuha klaasifaasi hüdratatsiooniga ning putsolaanse osa ja lubja vahelise reaktsiooniga alaneb lubja kontsentratsioon põlevkivituhk-portlandtsemendikivi vedelas faasis. Selle tõttu kivinemise hilisemas käigus muunduvad uusmoodustised lubjavaesemaks. Kaltsiumhüdrosilikaatidest esineb  $CSH(B)$  tüüp ja kaltsiumhüdroaduminaatidest ja -ferriti-

dest  $C_3AH_6$  ja  $C_3FH_6$  ning nende tahke lahus. Toetudes põlevkivituhk-portlandtsemendi ja šlakk- ning putsolaanportlandtsemendi koostise teatud analoogiale, võib pidada tõenäoliseks hüdrogeleniidi  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$  ja hüdrogranaatide  $3CaO \cdot ZAl_2O_3 \cdot (1-Z)Fe_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot (6-2x)H_2O$  teket põlevkivituhk-portlandtsemendi hüdratatsiooniprotsessis.

Põlevkivituhk-portlandtsemendi hüdrotermilisel kivinemisel kõrgema temperatuuri juures ( $80-100^\circ C$ ) on uusmoodustiste koostis peaaegu niisamasugune nagu tavalise temperatuuri juures kivinemisel. Kõrgemal temperatuuril kulgevad põlevkivituhk-portlandtsemendis kivinemisprotsessid forsseeritumalt kui portlandtsemendis. Tingitud on see lenduha peenima fraktsiooni šlaki- ja putsolaanse osa tugevast aktiivseerumisest hüdrotermilise kivistumise tingimustes. Kõrgema temperatuuri juures ( $80-100^\circ C$ ) kivistamisel muutuvad geeli- taolised uusmoodustised kiiremini jämedamateraliseks, on korrapärasema ehitusega ning nende struktuur on röntgenograafiliselt kergemini kindlaks määratav.

#### Põlevkivituhk-portlandtsemendi füüsikalised ja sideainelised omadused

Erikaal ja mahukaal. Põlevkivituhk-portlandtsemendi erikaal oleneb komponentide erikaaludest ja nende vahekorrast tsemendis ning on  $3,05...3,10 \text{ g/cm}^3$ . Mahukaal oleneb põhiliselt komponentide vahekorrast ja tsemendi peenusest ning olenevalt tihendamise viisist on järgmine:

puiste mahukaal  $1000...1100 \text{ kg/m}^3$ ,  
tihendatud mahukaal  $1400...1500 \text{ kg/m}^3$ .

Normaalkonsistents ja tardumise ajad. Normaalkonsistentsse taigna saamiseks vajalik veehulk on  $0,25...0,75\%$  võrra madalam kui samast klinkrist valmistatud portlandtsemendil ning on  $25,0...26,5\%$ .

Tardumise algus  $2...3 \text{ t. } 30 \text{ min.}$ ,  
lõpp  $4...6 \text{ t.}$

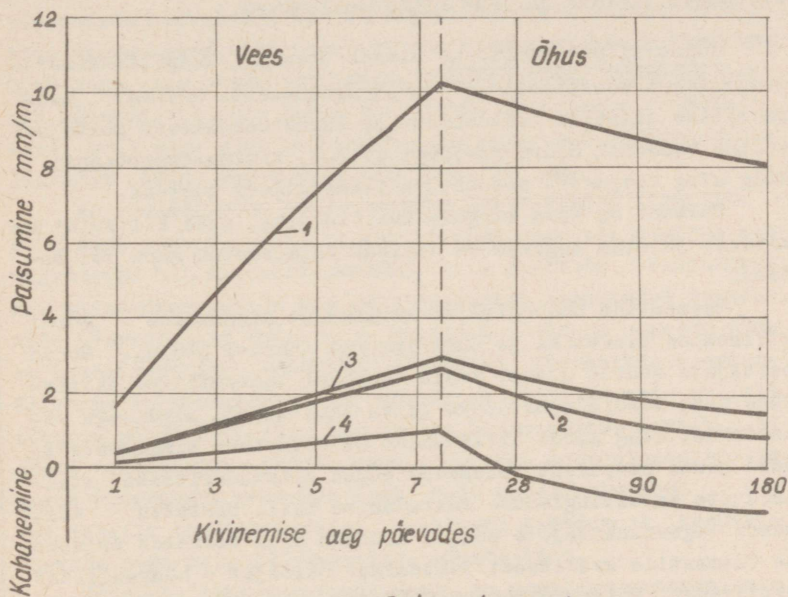
Mahumuutuse ühtlus, paisumine ja kahanemine. Põlevkivituhk-portlandtsement sisaldab mahumuutuse ühtlust kahjustada võivatest ühenditest sulfaatset väävliit ( $SO_3=1,5...3,5\%$ ) ja  $MgO (< 5\%)$  mõõdukalt hulgal ning rahuldab selles osas tsemendi normide nõudeid. Seevastu aga on vaba lubja sisaldus ( $2,5...3,5\%$ ) keskmiselt 1,5 korda suurem tavalise portlandtsemendi puhul tunnustatud piirhulgast (2%).

Põlevkivituhk-portlandtsemendi puhul ei ole see aga ohtlik. Siin on valdav enamus vaba lubja mahumuutuse ühtluse seisukohalt soodsamas füüsilises seisundis kui tavalises portlandtsemendis. Nimelt kuulub põhiline osa (65...90%) vaba lubja lendtuha peenima fraktsiooni koostisse, mis on väga peeneteraline ( $< 15 \mu m$ ) ja palju kiiremini hüdratiseeruv kui tsemendiklinkris sisalduv vaba lubi. Seepärast põlevkivituhk-portlandtsemendile ei või kehtestada tavalise portlandtsemendi puhul väljakujunenud vaba lubja piirsisalduse norme. Põlevkivituhk-portlandtsement rahuldab mahumuutuse ühtluse katsetuste nõudeid tunduvalt paremini kui samast klinkrist valmistatud portlandtsement. Katsetusel autoklaavis 20 atü juures paisub põlevkivituhk-portlandtsement keskmiselt ligi kaks korda vähem kui tavaline portlandtsement. Kui portlandtsemendi mõni proov paisub ülemääraselt palju (lineaarselt üle 0,5%), paisub samast klinkrist valmistatud põlevkivituhk-portlandtsement mõõdukalt (vt. tabel 10).

T a b e l 1 0

Põlevkivituhk- ja tavalise portlandtsemendi mahumuutuse ühtluse katsetulemusi

Jrk. nr.	Tsemendi liik	Tsemendi koostis %-des			Lineaarne paisumine autoklaavis 20 atü juures %-des
		klinker	kips	tuha peenim fraktsioon	
1.	Portlandtsement	95	5	-	1,50
2.	Põlevkivituhk-portlandtsement	70...80	-	30...20	0,25...0,30



1. Paisuv tsement
2. Mittekahanev tsement
3. Põlevkivituuk-portlandtsement
4. Portlandtsement

Joonis 7. Mitmesugustest tsementidest valmistatud taigna paisumine ja kahanemine vees ning õhus kivinemisel.

Tavalise temperatuuri juures vees kivinemisel põlevkivituhk-portlandtsemendikivi paisub lineaarselt 0,25...0,35%. Kivinemisel õhus, mille relatiivne niiskus on ~ 60%, kahaneb see aga ülimalt 0,15%. Põlevkivituhk-portlandtsement paisub summaarselt vähe (0,1...0,2%) ning rahuldab mittekahaneva tsemendi kohta esitatud nõuded (vt. joon.7). Seetõttu on põlevkivituhk-portlandtsemendist valmistatud mördid ja betoonid hästi tihedad ja vett mitteläbilaskvad.

Hüdrauliline aktiivsus oleneb tsemendi keemilis-mineraaloloogilisest koostisest ja jahvatuspeenusest. Sellest hüdraulilise sideaine tähtsaimast ja karakterseimast näitajast sõltub tsemendi hüdratatsiooni kiirus, kivinemisprotsessi kulg ning seejuures moodustuva tsemendikivi tugevus.

Tsement on seda kõrgema kvaliteediga, mida kiiremini see kivineb ja mida tugevam on sellest valmistatud mört või betoon.

Tsementide hüdraulilist aktiivsust hinnatakse mördi kivinemise kineetika ja tugevuse suurusel põhjal. Nende näitajate suurus oleneb peale tsemendi hüdraulilise aktiivsuse veel mördis kasutatava liiva koostisest, mördisegu vahetusest ning mördi kivistamise ja katsetuse tingimustest. Need mördi omapärasest tulenevad mõjud elimineeritakse standardsete katsetingimuste rakendamise teel. Seetõttu võime mördi tugevusnäitajate põhjal hinnata ning võrrelda erinevate tsementide kvaliteedi tähtsaimat näitajat - hüdraulilist aktiivsust. Põlevkivituhk-portlandtsemendi hüdraulilise aktiivsuse hindamisel standardsete nõuete järgi tekib tõsine komplikatsioon. Sellest arusaamiseks tuleb üksikasjalisemalt tutvuda tsemendi aktiivsuse standardse hindamise tingimustega. Tsemendi standardsele mördile 1:3 (tsement:normiliiv) manustatakse vett sellisel hulgal, et segu oleks väheplastilise konsistentsiga ja tihendatav vibreerimisega. Mördisegu on standardsetes tingimustes vibreerimisega tihendatav, kui segu koonuse läbimõõt pärast raputuskatset on vähemalt 105 mm (GOST 310-61). Klinker-portlandtsementide (klinker+kips) ja vahesel hulgal tihedaid mineraalseid lisandeid (šlakid, kvartsi-liiv) sisaldavate portlandtsementide (klinker+kips+ 5...15% mi-

neraalne lisand) puhul saadakse norminõuete kohase konsistentsiga mördisegu siis, kui vesitsementtegur on 0,40. Mördi koonuse läbimõõt pärast raputuskatset on sel juhul põhiliselt 105...120 mm. See vesitsementteguri suurus (0,40) on aluseks võetud tsemendi normides ning sellega valmistatakse kõikide tsementide standardsed mördisegud. Mitmesuguste poorsete lisandite (treepel, diatomiit) manusega saadud tsementide veevajadus ületab sageli suuresti klinkertsementide veevajaduse. Sel juhul ei saa enam vesitsementteguriga 0,40 segu, mis oleks standardselt tihendatav. Tsemendi normid nõuavad, et siis tuleb suurendada mördiseguse veehulka seni, kuni segu saab sellise konsistentsi, et mördikoonuse läbimõõt pärast raputust oleks 105...110 mm.

Et tsementidele manustatavate mineraalsete lisandite kõik seni tuntud liigid on kas peaaegu sama või suurema veevajadusega kui klinkertsemendid, siis seetõttu hinnatakse nii klinkertsementide kui ka lisanditega manustatud tsementide hüdraulilist aktiivsust mörtidega, mis on peaaegu võrdse konsistentsiga. Seetõttu võimaldab tsementide standardikohane katsetamine saada tsementide aktiivsusest küllalt tõetruu pildi betoonide kasutamise tingimustes. Nimelt ei määra valmistatava betoonisegu vajalikku konsistentsi mitte seguse kasutatava tsemendi liik, vaid konstruktsiooni osa või detaili konfiguratsioon, armatuuri tihedus ja kasutada olevate segu paigaldusvahendite efektiivsus.

Põlevkivituhk-portlandtsement on erandiks mineraalsete lisanditega manustatud tsementide seas. Nimelt on põlevkivituhk-portlandtsementmördi veevajadus lendtuha peenima fraktsiooni plastifitseeriva toime tõttu tunduvalt madalam kui tavalisel portlandtsemendil. Seetõttu põlevkivituhk-portlandtsemendist standardne mört, mille vesitsementtegur on 0,40, valgub laiali 135...160 mm. Põlevkivituhk-portlandtsementmördisegu väga hea töödeldavus, mis tingib selle tsemendi kasutuse suure efektiivsuse betoonides, ei väljendu tsemendi standardse katsetuse metoodika tõttu margi näitajates. Praegused tsemendinormid limiteerivad standardse mördisegu veesisalduse alampiiri - vesitsementtegur võib olla

minimaalselt 0,40. Põlevkivituhk-portlandtsemendist saab aga valmistada standardsetes tingimustes hästi tihendatava mördisegu, mille vesitsementtegur on 0,32...0,36 ning mis on 10...20% võrra väiksem kui klinkertsemendil. Võrdse konsistentsiga betoonisegude puhul on segu vesitsementtegur seda väiksem ja betoon seda tugevam, mida väiksem on tsemendi veevajadus. Seetõttu on põlevkivituhk-portlandtsement-betoonide margid tunduvalt kõrgemad kui tavalise portlandtsemendi puhul, mida aga ei saa eeldada tsemendi markide võrdlemise põhjal. Põlevkivituhk-portlandtsemendi väiksem veevajadus võimaldab suhteliselt kergesti saada kõrgemargilisi betoone.

Põlevkivituhk-portlandtsemendi ja tavalise portlandtsemendi hüdraulilise aktiivsuse võrdlusandmed on esitatud tabelis 11.

Vesitsementteguri kogu muutuse intervallis 0,30...0,50 on põlevkivituhk-portlandtsemendi puhul mördi 1:3 (tsement: voolski liiv) tugevus nii 3, 7 kui ka 28 päeva vanuselt kõrgem kui portlandtsemendil.

Näiteks on 28 päeva vanuse mördi survetugevus uuel tsemendil võrdse vesitsementteguri korral keskmiselt  $\sim 20 \text{ kg/cm}^2$  võrra kõrgem kui tavalisel portlandtsemendil. Mördi võrdse konsistentsi korral on aga mördi tugevuste vahe keskmiselt juba  $100 \text{ kg/cm}^2$ . Seega kui põlevkivituhk-portlandtsemendi hüdrauliline aktiivsus tsementide standardse katsetuse tingimustes ületab tavalise portlandtsemendi aktiivsuse keskmiselt  $\sim 20 \text{ kg/cm}^2$  võrra, siis betoonides kasutamise puhul on aktiivsuste vahe juba  $\sim 100 \text{ kg/cm}^2$ . Peale selle ei iseloomusta tsemendi kivistamise standardne meetodika kaasaja monteeritava raudbetoonkonstruktsioonide hüdrotermilise ( $+80...+100^\circ\text{C}$ ) kivistamise tingimusi põlevkivituhk-portlandtsemendi osas õieti. Temperatuuri tõusul forsseerub põlevkivituhk-portlandtsemendi kivinemine rohkem kui tavalisel portlandtsemendil. See on tingitud lendtuha peenimas fraktsioonis sisalduva happelise klaasifaasi ja lahustumata osa intensiivsest reaktsioonist vaba lubjaga hüdrotermilise kivistamise tingimustes, kusjuures tekib täiendavalt suuremal hulgal uusmoodustisi.

Põlevkivituhk- ja tavalise portlandtsemendiga mörtide .  
tugevus olenevalt vesitsemenditegurist

Tsemendi liik	Vesi- tsement- tegur	Mördi- koonuse läbi- mõõt pärast rapu- tust mm	Kivinemise kestus					mördi paindetugevus kg/cm <sup>2</sup>
			3 pv.	7 pv.	28 pv.	3 pv.	7 pv.	
Põlevkivi- tuhk-port- landtsement	0,30	106	480	560	665	70	79	88
	0,35	124	385	465	570	62	71	78
	0,40	145	320	390	500	56	61	71
	0,45	177	260	325	430	48	57	66
	0,50	203	215	275	370	42	54	61
Portland- tsement	0,30*							
	0,35	105	370	460	555	64	70	77
	0,40	117	300	380	475	54	61	68
	0,45	141	235	315	405	44	53	62
	0,50	171	200	255	350	40	48	56

\* Mördiseegu polnud tihendatav

Kui valmistada põlevkivituhk-portlandtsemendist ja tavalisest portlandtsemendist mördid, mis tavalise temperatuur juures kivinemisel on võrdse tugevusega, siis 80...100°C juures kivistatud põlevkivituhk-portlandtsementmört ületab 25...50 kG/cm<sup>2</sup> võrra samal temperatuuril kivistatud portlandtsemendi.

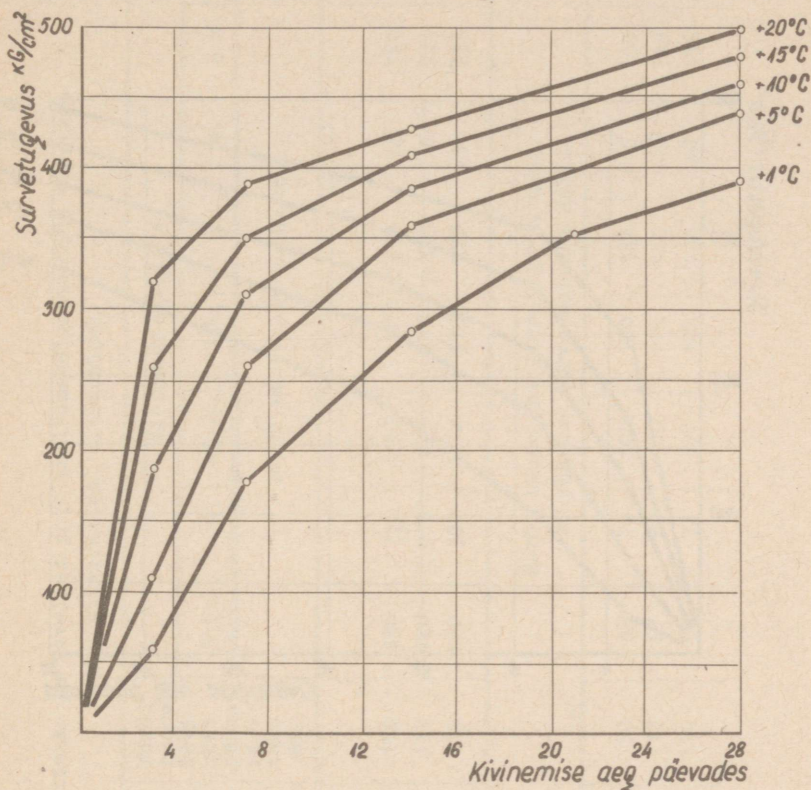
Kokku võttes selgub, et kui põlevkivituhk-portlandtsemendi hüdrauliline aktiivsus tsemendi standardsel katsetamisel ületab portlandtsemendi aktiivsuse ~ 20 kG/cm<sup>2</sup> võrra, siis normaalsetes tingimustes kivistatud betoonides ületab põlevkivituhk-portlandtsement ~ 100 kG/cm<sup>2</sup> võrra tavalise portlandtsemendi ja hüdrotsermiliselt kivistatud betoonides juba 125...150 kG/cm<sup>2</sup> võrra.

Tööstuslikult toodetud põlevkivituhk-portlandtsement rahuldab tsemendi kohta kehtiva standardi järgi hinnatult (kus mördisegu vesitsemmentegur ei või olla vähem kui 0,40) tugevusmarkide "400... 500" nõuded.

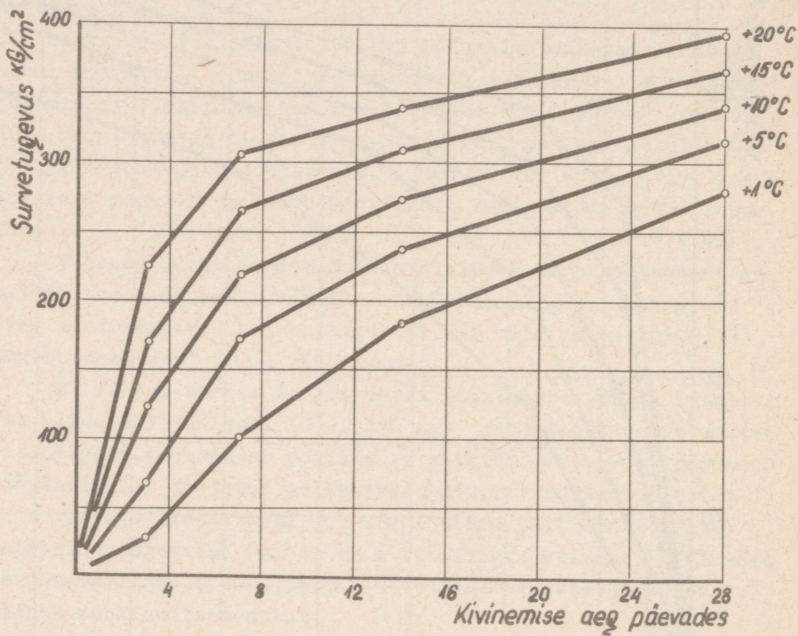
Mördisegu võrdse konsistentsi tingimustes (mördi laiialivalgumine raputuslual 105...110 mm) rahuldab aga põlevkivituhk-portlandtsement põhiliselt markide "500...600" nõuded. Tööstuslikult toodetud põlevkivituhk-portlandtsement-betoonide tugevus ületab kuni 1,5 margi võrra portlandtsement-betoonide tugevuse. Nii on meie vabariigis viimasel ajal kõik kõrgemargilised ("400...500") betoonid valmistatud põlevkivituhk-portlandtsemendist.

Põlevkivituhk-portlandtsemendi ja portlandtsemendi kivinemise kineetika võrdlus 1<sup>o</sup> kuni 20<sup>o</sup>C juures on esitatud joon. 8,9. Joonistelt nähtub, et põlevkivituhk-portlandtsement kivineb ka külmumistäpi lähedastel madalatel temperatuuridel kiiremini tavalisest portlandtsemendist. Eeltoodust selgub, et põlevkivituhk-portlandtsement kivineb ühtviisi hästi nii madalatel kui ka kõrgetel temperatuuridel.

Tabelis 12 on toodud põlevkivituhk-portlandtsemendi ja portlandtsemendi võrdlus pikaajalisel kivinemisel. Neist andmetest nähtub, et põlevkivituhk-portlandtsementmördi survetugevus ületab kõigil kivinemise kestustel kuni 5 aastani portlandtsementmördi tugevuse. Viieaastaselt on võrdse konsistent-



Joonis 8. Põlevkivituhk-portlandtsemendi kivinemise kineetika eri temperatuuridel.



Joonis 9. Portlandtsemendi kivinemise kineetika eri temperatuuridel.

Põlevkivituhk- ja tavalise portlandtsemendiga mörtide tugevuse  
kulg piksajalisel kivilnemisel

Tsemendi liik	Vesi- tsement- tegur	Mördi koonuse läbi- mõõt- pärast rapu- tust mm	Kivilnemise kestus					Mördi survetugevus kg/cm <sup>2</sup>			
			3 pv.	7 pv.	28 pv.	3 k.	6 k.		1 a.	3 a.	5 a.
			Mördi suhteline survetugevus %-des								
Põlevkivituhk- portlandtsement	0,40	150	290	370	490	590	695	710	760	765	
Portlandtsement	0,33	112	420	515	625	745	875	910	935	935	
Portlandtsement	0,40	110	260	350	470	575	675	690	735	740	
Mördi suhteline survetugevus %-des											
Põlevkivituhk- portlandtsement	0,40	150	59	76	100	120	142	145	155	156	
Portlandtsement	0,33	112	67	82	100	119	140	146	149	149	
Portlandtsement	0,40	110	55	74	100	122	144	147	156	157	

signa segude puhul põlevkivituhk-portlandtsementmört 195 kg/cm<sup>2</sup> võrra tugevam portlandtsementmördist.

Pikaealisus. Tsementbetooni pikaealisus oleneb tema koostisest ning omadustest ja eksploatatsiooni tingimustest.

Toote püsivus sõltub põhiliselt betooni tihedusest ja on seda suurem, mida tihedam on materjal. Olulise tähtsusega betooni püsivusele on ka tsemendikivi kvaliteet. See oleneb tema keemilis-mineraloogilisest koostisest, selle sobivusest täitematerjalidega (liiv, killustik) ja betooni ümbritseva keskkonnaga (õhk, vesi). Püsivam on see tsemendikivi, mis sisaldab vähem vaba lubja, vaba magneesiumoksiidi ja leelisi ning mõõdukalt sulfaatset väävli, lubja ja aluminaate.

Peale selle oleneb betooni püsivus veel tsemendikivi ja täitematerjalide vahekorrrast. Võrdse tihedusega betoonidest on püsivam see, mis sisaldab vähem tsemendikivi. See on tingitud asjaolust, et tsemendikivi on täitematerjalidena kasutatavate looduslike kivimitega võrreldes suhteliselt väiksema püsivusega. Nimelt on tsemendikivi suurema energiasisaldusega ning tunduvalt ebastabiilsem kui looduslikud kivimid, mis on stabiliseerunud geoloogiliste aegade vältel. Tsemendikivi suurem ebastabiilsus tuleneb nii keemilistest kui ka füüsikalistest teguritest.

Keemilised tegurid. Betooni pikaealisus oleneb keemilistest tegurite järgmistest mõjuviisidest.

Tsemendikivi-sisesed protsessid:

Tsement peab olema sellise keemilis-mineraloogilise koostisega, et tsemendikivi moodustumisel kulgevad protsessid toimuksid nii ruumiliselt kui ka ajaliselt sedavõrd hästi kooskõlastatult, et ei tekiks sideainekivi monoliiti ülemäärast kahjustavaid paisumisi. See nõue rahuldatakse tsemenditootmises kehtivate tehnoloogiliste võtete rakendamise teel, kusjuures ei ületata üldtunnustatud või standarditega fikseeritud ohtlike komponentide - vaba lubja, vaba magneesiumoksiidi ja sulfaatses väävli piirhulkasid.

Tsemendikivi piirpinnal toimuvad protsessid:

1. Tsemendikivi ja täitematerjali vahel toimuvad reaktsioonid. Tsemendikivi ja täitematerjali (liiv, killustik) vahel ei toimu tavaliselt märkimisväärsed keemilist reaktsiooni, kuna valdav enamik täitematerjale on tsemendikivi suhtes praktiliselt inertsed. Tsemendi ja täitematerjali koostiste ning füüsikalise seisundi teatud kombinatsiooni puhul tekib aga nende vahel reaktsioon, mis ebasoodsal juhul tingib sedavõrd ohtliku paisumise, et betoon puruneb. Selline olukord võib aset leida, kui klinkerportlandtsement sisaldab leelisi (arvestatuna  $\text{Na}_2\text{O}$  ekvivalendile) üle 0,5...0,8% ja täitematerjalina kasutatakse amorfset ränihapendit sisaldavat kivi- mit, nagu opaali, kaltседoni jt. Ohtlik paisumine tekib sel juhul, kui betoon kivineb niiskes keskkonnas. Teistes tingimustes kivinemisel ohtlikku paisumist ei teki. Näiteks vees kivinemisel on paisumine väike ning suhteliselt kuivas keskkonnas kivinemisel betoon koguni kahaneb.

Ohtliku paisumise tingib tsemendikivi ja täitematerjali kokkupuutepinnal moodustuv geelitaoline suuresti paisuv leelishüdroksilikaat. Kui portlandtsement sisaldab küllaldaselt hulgal hüdraulilisi lisandeid (vähemalt 10...20%), jaotuvad paisumiskolded ühtlasemalt üle kogu betooni massi ning ohtlikku paisumist ei teki.

Kuidas käitub aga põlevkivituhk-portlandtsemendikivi reaktsioonivõimelisi täitematerjale sisaldavas betoonis? Tsementide koostiste võrdlusel selgub, et põlevkivituhk-portlandtsement, võrreldes tavalise portlandtsemendiga, on selle korrosiooniliigi suhtes osalt halvem, osalt aga parem. Nimelt sisaldab põlevkivituhk-portlandtsement rohkem ohtlikku komponenti - leelisi, kuid ühtlasi sisaldab ta ka ohtlikku paisumist vähendavat komponenti - hüdrauliliste lisandite taolisi koostisosi. Nendeks on lendtuha peenima fraktsiooni happeline klaasifaas ja lahustumatu jääk. Ülekaalu saavutab positiivne hüdrauliliste lisandite taoline komponent ning põlevkivituhk-portlandtsementbetoonides on tsemendi leeliste ja reaktsioonivõimeliste täitematerjalide vahel kulgev reaktsioon tunduvalt piiratum ja vähem ohtlik kui klinkerportlandtsementbetoonides.

Tabelis 13 on toodud vähe ( $R_2O^* = 0,43\%$ ) ja palju leelisi ( $R_2O = 1,14\%$ ) sisaldavast klinkrist valmistatud mitmesuguse koostisega portlandtsementidest valmistatud mörtide paisumise kulg. Neist tulemustest selgub, et nii väikese kui ka suure leelisesisalduse korral paisub põlevkivituhk-portlandtsementmört tunduvalt vähem kui tavaline portlandtsementmört.

T a b e l 1 3

Reaktsioonivõimelist räni sisaldavast liivast valmistatud mörtide paisumine olenevalt klinkri leelisesisaldusest ja tsemendi koostisest

Jrk. nr.	Klinkri leelisesisaldus %des	Sideaine koostis %des			Proovikehade vanus aastates				
		klin-ker	tuhk	kips	0,5	1	2	3	4
					Lineaarne paisumine %des				
1	0,43	95	-	5	0,092	0,156	0,303*	0,384*	0,404*
2	"	80	20	-	0,144	0,204	0,268*	0,292*	0,296*
3	"	70	30	-	0,128	0,164	0,192	0,208	0,220
4	1,14	95	-	5	0,280*	0,512*	0,860*	1,032*	1,096*
5	"	80	20		0,188	0,272*	0,364*	0,384*	0,396*
6	"	70	30		0,156	0,204	0,256*	0,276*	0,284*

\* Proovikehad pragunesid.

2. Tsemendikivi ja ümbritseva keskkonna vahel toimuvad reaktsioonid. Tsemendikivi võib reageerida teda ümbritsevas õhus või vees leiduvate mitmesuguste ühenditega ja seejuures kahjustuda. Nende protsesside ulatus vees on tunduvalt suurem kui õhus. Vees kulgevate kahjustuste loomus võib olla mitmesugune. Seejuures tekkinud uusmoodustised on kas vees kergesti lahustuvad või põhjustavad ohtlikke paisumisi. Kahjustuste ulatus oleneb tekkiva uusmoodustise liigist ja hulgast. Viimased olenevad omakorda agressiivse keskkonna keemilisest koostisest ja kontsentratsioonist ning tsemendikivi keemilis-mineraloogilisest koostisest.

\* Leeliste koguhulk on arvestatud  $Na_2O$  peale, kusjuures  $K_2O$  osahulk selles on saadud  $K_2O$  hulga korrutamisel 0,658-ga.

Peale selle võib magedas vees tsemendikivist lahustuda vaba lubi ja kaltsiumirikkamad ühendid, mistõttu toote poor-sus suureneb. Selle tagajärjel langeb betooni tugevus ja vastupanu ilmastiku füüsikaliste tegurite suhtes.

Peab veel kord meelde tuletama, et tsemendikivi ja ümb-ritseva keskkonna vahel toimuvate reaktsioonide ulatus ole-neb peale eelvaadeldud keemilis-mineraloogiliste tegurite vä-ga oluliselt ühest füüsikalise suurusest - betooni tihedu-sest. See betooni kvaliteedi näitaja on tähtsaim, mis määrab põhiliselt betooni püsivuse, teised tegurid on sellest vähem tähtsad.

Füüsikalised tegurid. Betooni püsivust kahjustavate füüsikaliste tegurite mõju tugineb tsemendikivis sisalduva vee hulga või selle faasilise koostise perioodilisel muutumi-sel.

Tsemendikivi veesisalduse muutumise mõju pääseb maksvu-sele tsementtoote kuivamisel ja eriti vahelduva kuivamise-niiskumise tingimustes.

Vee faasiline koostis muutub vee külmumisel jääks. See protsess on otsustava tähtsusega veega immutatud tsement-toodete püsivusele vahelduva külmumise ja sulamise tingimus-tes.

1. Tsemendikivi püsivus vahelduval kuivamisel ja niisku-misel.

Tsementbetoonide veesisalduse muutus tingib nende ma-humuutuse. Veesisalduse suurenemisel paisub betoon, vähene-misel aga kahaneb. Mahumuutus on seda suurem, mida suurem on betooni veesisalduse muutus.

Kui keemilistest teguritest tingitud mahumuutused olid mittepöörduvad, siis füüsikalistest teguritest tingitud ma-humuutused on aga pöörduvad ning vahelduvalt kuivav ja niis-kuv betoon kahaneb ja paisub korduvalt. Igakordne mahumuutus tingib materjalis jäävaid deformatsioone. Seejuures tsemendi-kivi struktuurielementide vahelised sidemed lõdveneivad ning

tekivad mikropraod. Selle tulemusena võib ebasoodsal juhul betoon tunduvalt kahjustuda, selle tugevus alaneda ning detail isegi laguneda. Vahelduval kuivamisel ja niiskumisel tekkivate kahjustuste tempo ja ulatus oleneb põhiliselt tsemendikivi kvaliteedist ja kuivamise-niiskumise kiirusest. Tsemendikivi kvaliteet oleneb tsemendi liigist ja vesitsementtegurist. Tsemendikivi maht muutub seda vähem ja ta talub seda paremini vahelduvat kuivamist ja niiskumist, mida tugevamini on vesi selles seotud ja mida tihedam on tsemendikivi.

Tsemendikivis sisalduv vesi liigitatakse tsemendi ja vee vaheliste seoste tugevuse põhjal nelja ossa: keemiliselt seotud, adsorptsioon-, kapillaar- ja vaba vesi. Nende seoste tugevust saab hinnata veeauru rõhu suuruse järgi. Mida tugevamini on vesi ühendis seotud, seda madalam on selle ühendi veeauru rõhk ning seda suurem on energiakulu, mida vajatakse vee eraldamiseks tsemendikivist.

a. Tsemendikiviga on kõige tugevamini ühinenud hüdromineraalides keemiliselt seotud vesi. See vesi hoitakse tsemendikivis kas põhi- või kõrvalvalentsidega. Tugeva põhivalentsseose puhul on vesi tsemendikivist eraldatav vaid suhteliselt kõrgel temperatuuril, 300...500°C juures ( $Mg(OH)_2$ ,  $Ca(OH)_2$ ). Nõrgema kõrvalvalentsseose korral, mis esineb kristallhüdraatides, eraldub vesi tunduvalt madalamal temperatuuril. Kuigi osa kristallhüdraatide puhul ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$  jt.) eraldub vesi 200...300°C juures, siis  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  ja mõned hüdrosilikaadid hakkavad osaliselt dehüdratiseeruma isegi juba 50...60°C juures. Viimati nimetatud ühendite lõplik dehüdratatsioon toimub 250...500°C vahemikus. Põhiline osa keemiliselt seotud veest on tsemendiga ühinenud niivõrd tugevasti, et lähtudes betooni eksploatatsiooni tavalistest tingimustest, tuleb see vesi arvata tahke faasi koostisse.

b. Nõrgemini on seotud vesi, mis katab tsemendi kivinemisel tekkinud geeliosakesi adsorptsioonikihina. Adsorptsioonivesi hoitakse tahke faasi pinnal nn. van der Waalsi jõududega. See osa veest kujutab endast pseudotahke materjali kilet (filmi), mis liidab geeli peenimad osised ühtseks tu-

gevaks monoliidiks. Adsorptsioonivee võib tsemendikivist eraldada juba tavalise temperatuuri juures, kuid seejuures peab õhk olema väga kuiv - õhu relatiivne niiskus olgu vähem kui 40%.

c. Tsemendikivi peenkapillaarides sisalduv vesi on veelgi nõrgemini seotud ning tsemendikivist kergemini eraldatav kui adsorptsioonivesi. Kapillaarvesi lahkub tsemendikivist tavalise temperatuuri juures, kui õhu relatiivne niiskus on  $\leq 80...90\%$ . Mida peenemad on kapillaarid, seda raskemini eraldub vesi nendest ja seda kuivem peab olema õhk. Ainult väike osa kapillaarveest, mis katab kapillaaride seinu kahe-kolme veemolekuli paksuse kihina, on adsorptsioonivee omadustega.

d. Kõige nõrgemini on tasemendikiviga seotud suurtes poorides ( $\varnothing > 50 \mu\text{m}$ ) ja tühikutes olev nn. vaba vesi. Näiteks on see vesi tsemendikivist kergesti eraldatav isegi mehaaniliselt või lahkub kivist juba nõrgal kuivamisel tavalise temperatuuri juures, kui õhuniiskus on vaid pisut alla küllastuspunkti.

Peab aga silmas pidama, et tsemendikivis sisalduva vee eelvaadeldud neli gruppi ei ole selgepiirilisel eraldatavad. See on tingitud mitmest asjaolust. Kõigepealt eraldub mitmesugustest kristallhüdraatidest keemiliselt seotud vesi juba sedavõrd madalal temperatuuril, et see langeb kokku adsorptsiooni ja kapillaarides sisalduva vee eraldumisega.

Peale selle eraldub vesi kaltsiumsilikaatidest nende kuumutamisel pidevalt. Näiteks tobermoriitfaasi, s.o. CSH(B) geeli kuumutamisel muutub pidevalt nii selle röntgendiagramm kui ka veeaururõhk. Seejuures ei ilmne mingeid järsked üleminekuid, vaatamata sellele, et kuumutamisel tekib teistsuguse koostisega kaltsiumhüdrosilikaat. See seletub tobermoriitfaasi füüsikalise omapäraga. Nimelt koosneb tobermoriit mitmesuguse suurusega väga väikestest kristallitidest. Kristallitsete hüdromineraalide veeauru rõhk oleneb peale ühendi liigi veel tunduvalt kristallikeste suurusest ja nimelt on seda suurem, mida väiksem on kristalliit. Kristallitide eri-

nevast suurusest tingituna toimuvad järsud muudatused üksikutes kristalliitides ajaliselt nihutatult, mistõttu summaarne muutus kulgeb seejuures sujuvalt. Seepärast pole tobermoriidi kuumutamisel ka märgata järskede üleminekuid ei struktuuris ega veeauru rõhus.

Et põhiline osa keemiliselt seotud veest ei eraldu tsemendikivist tavalistes betoonehituse eksploatatsiooni tingimustes, siis on tsemendikivi seda püsivam, mida rohkem ta sisaldab keemiliselt seotud vett. Seevastu nõrgemalt seotud adsorptsiooni- ja kapillaarvesi võib aga eralduda tsemendikivist betoonehituse tavalistes eksploatatsiooni tingimustes. Kui on teada veehulk, mida tsemendikivi kuivamisel ja niiskumisel ära annab või juurde võtab, siis saab selle põhjal otsustada ka betooni püsivuse üle. Ohtlik on tsemendikivis see osa veest, mille aururõhk  $+20^{\circ}\text{C}$  juures on suurem kui  $6 \cdot 10^{-4}$  mm elavhõbedasammast või mis on eraldatav kuumutamisel  $105^{\circ}\text{C}$  juures.

Kivinemisel muutub suhteliselt energiarikas submikroskoopiline geelitaoline tsemendikivi struktuur jämedamakristalliliseks ning stabiilsemaks. Selle tulemusena suureneb pidevalt tugevamalt seotud vee hulk nõrgemalt seotud vee arvel ning väheneb tsemendikivi kahanemine-paisumine vahelduval kuivamisel-niiskumisel ja betoon muutub ilmastikukindlamaks. Tsemendikivi struktuur jämeneb kiiremini hüdrotermilise kivistamise puhul. Eriti intensiivselt kulgeb see autoklaavis kivistamisel. Vahelduval kuivamisel ja niiskumisel on kõige vastupidavam autoklaavis mõõdukalt kivistatud tsemendikivi.

Tabelis 14 on toodud portlandtsemendi kolme eri liigi kohta näitajad, mis iseloomustavad nende püsivust vahelduval kuivamisel ja niiskumisel.

Nendest andmetest nähtub, et parima püsivusega vahelduval kuivamisel ja niiskumisel on klinker-portlandtsement, mis talub 300...400 katsetsükli. Põlevkivituhk-portlandtsement jääb selles osas tavalisest portlandtsemendist keskmiselt 1% võrra maha, kuid ületab hüdrauliliste lisanditega portlandtsemendi keskmiselt 1,7 korda.

Portlandtsementmörtide vahelduva kuivamise ja  
 niiskumise kindlus

Jrk. nr.	Portlandsemendi liik	Koostis %-des klinker	Mördi vesi- tsement- tegur*	Mördi 1:3 kaalu- kadu kuiva- misel %-des	Mördi kaha- nemine kui- vamisel mm/m	Vahelduva kui- vamise ja niis- kumise kindlus tsükklites
1.	Klinker-portland- tsement	95	0,50	4,1	1,6	300...400
2.	Hüdrauliliste li- sanditega port- landtsement	80	0,53	5,0	2,2	150...200
3	Põlevkivituhk- portlandtsement	70	0,43	3,1	1,0	250...350

\* Mördikoonuse läblmõõt pärast raputust oli 150...160 mm.

Tsementtoote kahanemine ja paisumine olenevad peale eeltoodud tegurite veel suuresti tsemendikivi ja täitematerjali vahekorrast ning on seda väiksemad, mida vähem sisaldab betoon tsemendikivi.

Portlandtsemendid kahanevad kuivamisel järgmiselt:

tsemendikivi	3...5 mm/m,
tsementmört	1...2 " ,
tsementbetoon	0,5...1" .

## 2. Tsemendikivi külmutuskindlus.

Ehitusmaterjali külmutuskindlus oleneb põhiliselt pooride hulgast ja laadist. Tsemendikivi on seda külmutuskindlam, mida vähem on selles poore ning mida soodsam on nende kaju ja suurus.

Pooride kvaliteedi kriteeriumiks külmutuskindluse seisukohalt on nende veega täitumise aste ja temperatuur, mille juures neis olev vesi muutub jääks. Poorid on seda ohutumad, mida väiksem on nende veega täitumise aste või mida madalamal temperatuuril muutub neis olev vesi jääks.

Ohutud on ülipeened geelipoorid ( $\emptyset$  alla 200 Å), kuna neis oleva vee õhuke kelme on tsemendikivi pinnal selle vabade molekulaarsete jõudude poolt niivõrd tugevasti aheldatud, et vesi muutub jääks alles ligikaudu  $-70^{\circ}\text{C}$  juures. Samuti on ohutud suured sfäärilised õhupoorid ( $\emptyset$  0,1...2 mm). Need poorid tavaliselt ei täitu veega, kuna neil puudub kapillaarimavus. Õhupoorid pole ainuüksi ohutud, vaid nende mõõdukas sisaldus (3...5%) võib suuresti (kuni 3...4 korda) tõsta tsemendikivi külmutuskindlust. Õhupooride kasulikkus seisneb selles, et nad on materjali külmutumisel reservruumiks, kuhu võib ümber paigutada osa veega täitunud pooride veest. Kuna jää maht ületab 9% võrra vee mahu, tekib veega täitunud poori külmutumisel surve, mis on seda suurem, mida madalam on temperatuur ning mida rohkem on pooris jääkristalle. Pooris rõhu all olev vesi migreerub osaliselt õhupooridesse, mistõttu langeb rõhk pooris ja pinge tsemendikivis. Vahepealse suurusega kapillaaripoorid ( $\emptyset$  0,1...50  $\mu\text{m}$ ) on külmutuskindluse

suhtes kõige ohtlikumad\*. Kapillaarpoorid täituvad veega täielikult ja põhiline osa neis olevast veest, ~ 80%, muutub jääks  $-15^{\circ}\text{C}$  juures, s.o. betooni tavalistes eksploatatsiooni tingimustes. Ainult kõige peenemates kapillaarpoorides olev vähene veehulk külmub jääks alles  $-25\dots-30^{\circ}\text{C}$  juures.

Külmutuskindla tsemendikivi saamiseks on vajalik esiteks vähendada segu vesitsementtegurit ja teiseks toodet niivõrd põhjalikult kivistada, et kapillaarpoorid täituksid hüdraatsete uutmoodustistega. Kui segu, mille vesitsementtegur on 0,40...0,45, kivistada põhjalikult - vees või niiskusega küllastatud keskkonnas vähemalt 1 kuu vältel, siis võib saada tsemendikivi, milles peaaegu ei olegi kapillaarpoore, vaid põhiliselt ainult geelipoorid, mis sisaldavad pseudotahket vett. Selline tsemendikivi on väga suure külmutuskindlusega.

Põlevkivituhk-portlandtsemendist betoonidel on kaks olulist eelist, võrreldes tavaliste portlandtsementbetoonidega: esiteks on põlevkivituhk-portlandtsemendi puhul vesitsementtegur 10...20% võrra madalam ja teiseks sisaldab betoon ~ 1% võrra rohkem õhupoore. Seetõttu sisaldab põlevkivituhk-portlandtsementbetoon tunduvalt vähem ohtlikke kapillaarpoore ja enam kasulikke õhupoore ning on suuresti (2...4 korda) külmutuskindlam tavalisest portlandtsementbetoonist. Põlevkivituhk-portlandtsemendist valmistatud tavalised betoonid taluvad 100...300 külmutustsüklit ja betoonid, mis on saadud vastavaid erinõudeid silmas pidades, peavad vastu kuni 1000...2000 külmutustsüklit.

Põlevkivituhk-portlandtsemendi kasutamine. Põlevkivituhk-portlandtsementi kasutatakse monoliitsete ja monteeri-tavate betoon-, raudbetoon- ning pingebetoonkonstruktsioonide valmistamiseks samaväärselt tavalise portlandtsemendiga.

---

\* Siin ei vaadelda tühemete ebaühtlasest jaotusest tingitud tsemendikivi struktuuri vigu, nagu mikropragusid ja kihvahesid, mis on eriti ohtlikud tsemendikivi külmutuskindluse suhtes.

Põlevkivituhk-portlandtsemendist betoone kasutatakse nii maapealsetes, maa-alustes kui ka veealustes ehitustes. Eriti efektiivne on põlevkivituhk-portlandtsementi kasutada seal, kus on oluline betooni kõrge tugevusmark - "400...500", külmutuskindluse mark - "200...300" ning suur tihedus.

Põlevkivituhk-portlandtsemendist betoone ei või kasutada neis tingimustes, mis on agressiivsed tavalise portlandtsementi suhtes, enne vastavaid uurimusi.

Põlevkivituhk-portlandtsementtooted on 15...30% võrra odavamad portlandtsementtoodetest.

1. A. Aarna, K. Kask, A. Reier, I. Ürik. Põlevkivi, Tallinn 1954.
2. Сланцезольные материалы в строительстве, АН ЭССР, Таллин 1955.
3. Сборник трудов по изучению золы сланца-кукерсита. Труды ТПИ I, Таллин 1959.
4. Сборник трудов по изучению золы сланца-кукерсита II. Труды ТПИ, 1961.
5. Исследования по строительству II. АН ЭССР, 1961.
6. Исследования по строительству У. Госстрой ЭССР, 1964.
7. Сборник трудов по изучению золы сланца-кукерсита III. Труды ТПИ, 1966.
8. Сборник трудов по изучению золы сланца-кукерсита IV, Труды ТПИ, 1968.
9. В.Х.Кикас, Р.Э.Отсман, Т.А.Лаур. Газобетон на основе золы горячего сланца-кукерсита эстонского месторождения. Авторское свидетельство № I92046, 1967.
10. В.Х.Кикас, Р.Э.Отсман, Э.Э.Когерман. Сланцезольное вяжущее. Авторское свидетельство № I85745, 1966.
11. В.Х.Кикас, Р.Э.Отсман, А.А.Хайн. Цемент. Авторское свидетельство № I7872I, 1966.
12. А.В.Волженский, Ю.С.Буров, В.С.Колокольников. Минеральные вяжущие вещества. Москва 1966.
13. Ю.М.Бутт, С.Д.Окороков, М.М.Сычев, В.В.Тимашев. Технология вяжущих веществ. "Высшая школа", 1965.
14. H.Kühl. Zement-chemie I, II, III. 1956-62.
15. G.L.Kalousek, C.W.Davis, W.E.Schmertz. The Journal of the ACJ, 20, 10, 693 (1949).

# S i s u k o r d

Sissejuhatus . . . . .	3
I. PÕLEVKIVI KUUMUTUSJÄÄGID. . . . .	5
1. Põlevkivi anorgaanilise osa koostis . . . . .	5
Keemiline ja mineraloogiline koostis . . . . .	5
Mineraalide jaotus . . . . .	6
2. Muutused põlevkivi anorgaanilise osa kuumutamisel. . . . .	7
Muutused põlevkivi anorgaanilise osa mineraalide kuumutamisel . . . . .	7
Uusühendite hüdrauliline aktiivsus . . . . .	8
Uusühendite hulk . . . . .	11
3. Põlevkivi tööstuslikul kasutamisel tekkivad jäägid ja põlevkivituhad . . . . .	12
Põlevkivikoks. . . . .	12
Põlevkivi poolkoks . . . . .	13
Põlevkivituhk. . . . .	13
II. PÕLEVKIVI LENDTUHK EHTUSMATERJALIDE TOORAINENA	19
1. Lendtuha fraktsiooniline koostis ja ehitusmaterjalide saamiseks kasutatavate fraktsioonide klassifikatsioon . . . . .	19
2. Lendtuha tööstuslike fraktsioonide koostised ja omadused. . . . .	22
Keemiline ja mineraloogiline koostis . . . . .	22
Terastiku koostis ja peenus . . . . .	24
Erikaal ja mahukaal . . . . .	25
Hüdrauliline aktiivsus . . . . .	26
Kukermiitoodete kivistamine kõrgemal temperatuuril . . . . .	30
Tsemendiklinkri manuse mõjust kukermiidi hüdraulilisele aktiivsusele . . . . .	32

III. PÕLEVKIVI LENDTUHA FRAKTSIOONIDEST SAADAVATE MATERJALIDE VALMISTAMISE TEHNOLOOGIA JA OMA- DUSED. . . . .	34
1. Lentuha jääefraktsioonist saadavad mater- jalid . . . . .	34
Autoklaavis kivistatud põlevkivituhkbetoo- nides tekkivad uusmoodustised . . . . .	35
Põlevkivituhk-gaasbetoon . . . . .	36
Koostis ja komponentide peenendus . . . . .	36
Toodete valmistamise tehnoloogia ja omadused . . . . .	37
Soojaisolatsiooniplaadid . . . . .	37
Suurpaneelid . . . . .	38
Kasutamine . . . . .	38
Põlevkivituhk-raskebetoon . . . . .	39
Koostis . . . . .	39
Valmistamise tehnoloogia . . . . .	40
Kasutamine . . . . .	40
2. Lentuha peenefraktsioonist saadavad materja- lid . . . . .	41
Kukermiidi ja kukermiittsemendi koostis . . . . .	41
Kukermiidi ja kukermiittsemendi kivinemis- protsessid ja uusmoodustiste koostis. . . . .	41
Kukermiidi ja kukermiittsemendi füüsikali- sed ja sideainelised omadused . . . . .	49
Erikaal ja mahukaal. . . . .	49
Normaalkonsistents ja tardumise ajad. . . . .	49
Mahumuutuse ühtlus, paisumine ja kahanemi- ne. . . . .	49
Hüdrauliline aktiivsus. . . . .	58
Pikaealisus . . . . .	59
Kukermiidi ja kukermiittsemendi kasutamine. . . . .	59
3. Lentuha peenimast fraktsioonist saadavad materjalid. . . . .	60
Põlevkivituhk-portlandtsement . . . . .	60
Põlevkivituhk-portlandtsemendi kivinemine ja uusmoodustiste koostis . . . . .	62

Põlevkivituhk-portlandtsemendi füüsikalised ja sideainelised omadused . . . . .	63
Erikaal ja mahukaal . . . . .	63
Normaalkonsistents ja tardumise ajad . . .	63
Mahumuutuse ühtlus, paisumine ja kahanemine . . . . .	64
Hüdrauliline aktiivsus . . . . .	66
Pikaealisus . . . . .	74
Keemilised tegurid . . . . .	74
Füüsikalised tegurid . . . . .	77
Põlevkivituhk-portlandtsemendi kasutamine . .	83
Kirjandus . . . . .	85

Vastutav toimetaja I.Laul

---

Trükkimisele antud 7. X 69. Paber 60x84/16  
 Trükipg. 5,5. Tingpg. 5,12. Tiraaž 600  
 MB-09623. TPI rotaprint, Tallinn, Pikk jalg 14  
 Tell. 387 Hind 17 kop.