



K. OJASTE

*GEOLOOGILISTE
PROTSESSIDE
ja NÄHTUSTE
OSATAÄHTSUS
EHITUSGEOLOOGIAS*

TALLINN 1974



TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT

Mäekateeder

✓ K. Ojaste

GEOLOOGILISTE PROTSESSIDE JA NÄHTUSTE OSATÄHTSUS

EHITUSGEOLOOGIAS

Loengukonspekt

Eesti
Teaduste Akadeemia
Geoloogia instituut
№ 2268

Tallinn

1974

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра горного дела

К. Оясте
ЗНАЧЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
И ЯВЛЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬНОЙ ГЕОЛОГИИ
Конспект лекций

На эстонском языке

© ТПИ, Tallinn 1974

Kinnitatud kolleegiumi koosolekul
10. okt. 1973

Vastutav toimetaja A. Reier

Trükkida antud 17. I 1974. Paber 60x84/16
Trükipg. 5,25. Tingpg. 4,88. Arvestuspg. 4,5. Tiraaž 500
MB-01607. TPI rotaprint, Tallinn, Koskla 2/9. Tell.98

Hind 45 kop.

SISSEJUHATUS

Meile teadaolevad geoloogilised protsessid, nagu maavärinad, vulkanism, murenemine, erosioon, abrasioon jt. avaldavad küllaltki olulist mõju maakoore välisilmele ja püstitatud inseneriehitustele. Geoloogiliste protsesside kulgemine on võimalik igasugustes kivimites ja paljud neist (maavärinad, vulkanism jne.) ei ole inimese poolt suunatavad.

Peale mainitute esineb veel rida protsesse ja nähtusi (kivimite tihenemine, niiskuvajumine ja paisumine, karst, sufosioon, ujupinnased, igikelts, gravitatsioonilised protsessid nõlvadel), mis võivad esineda ainult teatud kindla koostise ja tekkeviisiga kivimites. Näiteks võib karst tekkida ainult lahustuvates kivimites, niiskuvajumised on aga võimalikud ainult lõssides ja lõssitaolistes kivimites. Need protsessid ja nähtused avaldavad samuti olulist mõju maakoore teatavatele osadele ja inseneriehitustele (põhjustavad paljudes ehitustes ja rajatistes ohtlikke deformatsioone, mõnikord isegi täieliku purunemise jne.). Võttes aga kasutusele vastavad abinõud, võib kõigi nende protsesside ja nähtuste kahjuliku mõju kas täielikult likvideerida või miinimumini viia. Seejuures tuleb aga silmas pidada, et nimetatud protsesside ja nähtuste osatähtsus on eri geoloogilise ehitusega piirkondades hoopis erinev. Nii näiteks on Eesti NSV-s olulisem tähtsus ainult karstil ning kivimite tihenemisel loodusliku protsessina ja välisrõhu suurenemise tagajärjel. Mõningal määral tuleb arvestada ka ujupinnastega, gravitatsiooniliste protsessidega nõlvadel, kivimite paisumisega ning sufosiooniga. Kivimite niiskuvajumisel ja igikeltsal ei ole meie tingimustes aga mingit tähtsust. Samal ajal on igikeltsal esmajärguline tähtsus põhjarajoonides ja kivimite niiskuvajumisel lõsside ja lõssitaoliste kivimite levikualadel.

I. KIVIMITE FÜÜSIKALIS-MEHHAANILISI OMADUSI KUJUN- DAVAD LOODUSLIKUD TEGURID

1. Kivimite geneesi, diageneesi ja metamorfismi tähtsus nende füüsilis-mehhaaniliste omaduste kujunemisel

Kivimite tähtsamad füüsilis-mehhaanilised omadused, nagu nihke- ja survetugevus, kokkusurutavus, mahumass, veeläbilaskvus, veekindlus jne. on seotud teatud laadi looduslike teguritega, millest olulisema tähtsusega on tekke-, diageneesi ja metamorfismi tingimused. Esmajärguline tähtsus on muudugi tekkel, sest mistahes kivimi omadused on alati seotud nende geneesil valitsenud olukorraga. Võimalik ei ole mõõda minna ka kõigist hilisematest muutustest, mis on kivimitega toimunud nende pika eksisteerimisea vältel. Me ei tee olulist viga, kui eeldame, et kivimid, mis on tekkinud samades tingimustes ja millega pärast seda on toimunud samad muutused, peavad olema ka samade füüsilis-mehhaaniliste omadustega. Täpsustamise huvides tuleb sageli arvesse võtta ka kivimite lasumist.

Kivimite füüsilis-mehhaanilised omadused sõltuvad eelkõige neid moodustavate üksikosakeste omavahelisest struktuurilisest sidemest kui kivimi kõvaduse, jäikuse, tiheduse jms. näitajast.

Kõige tugevam struktuuriline side on tardkivimitel. Kuid juba oma eksisteerimise esimesest hetkest alates võivad niisugused kivimid sattuda murenemisprotsesside purustava toime alla, mis esmajoones mõjutab just osakestevahelist struktuurilist sidet, seda lõdvendades ja nõrgendades. Kui aga tardkivimid lasuvad suures sügavuses paksude kattekivimite kaitse all, kulgevad nimetatud protsessid niivõrd aeglaselt, et praktilisest seisukohast lähtudes ei ole neil mingit tähtsust.

Satub aga niisugune kivim mingil põhjusel maapinnale, hakkab purustavate tegurite mõju väljenduma täies ulatuses. Purunemisprotsess avaldub eelkõige kivimi killunemises, millega paralleelselt kulgevad ka mõned keemilised protsessid. Lõpuks puruneb kivim täielikult ja muutub teatava liivalisandiga saviks. Kuid niisugused purdkivimid saavad juba oma tekkimise esimestest staadiumidest alates (tavaliselt on see seotud pudeda materjali transpordiga jõgedes, liustikes või õhus ja settimisega veekogudes või kontinentidel) diageneesiprotsesside mõju alla, mis põhjustab nende tihenemise ja sageli ka tsementeerumise. Seejuures tekivad täiesti uued kivimid - liivakivid, konglomeraadid ja bretsäid. Olenevalt tsemendi hulgast ja koostisest omandavad need kivimid jälle teatava struktuurilise sideme, mis muudab nad samuti kõvadeks kehadeks. Kõige suurema tugevuse annab ränitsement, kõige nõrgema savitsement. Lubi- ja kipstsement on kõvaduselt vahepealsed.

Diageneesiprotsessidega seotud savide tihenemise astme määrab neid katvate lasundite raskus ja vanus. Järelikult peavad kõige tihedamad ja samal ajal ka kõige kõvemad olema tekelt vanemad savid, mis lasuvad või on kunagi lasunud suu-remas sügavuses. Kuid diageneesiprotsessid ei muuda savisid kunagi nii tihedaks kui metamorfism, mis võib purdkivimitel täielikult taastada struktuurilise sideme ja kõvade kehade omadused. Suureneva rõhu ja temperatuuri tingimustes võivad savid või savikad kivimid muutuda savikiltadeks, füllitideks, vilkkiltadeks või isegi gneissideks. Samuti muutuvad poorsed lubjakivid kristallilise struktuuriga marmoriteks. Järelikult on metamorfism kivimite füüsikalise-mehaaniliste omaduste parandamise seisukohalt igati soodne faktor, suurendades tunduvalt nende kande võimet.

Seoses rõhu ja temperatuuri tõusmisega sügavuse suunas väljendub ka metamorfism kõige ilmekamalt just sügavamal paiknevates lasundites. Järelikult võib kõige tüüpilisemaid moondekivimeid leida neis rajoonides, kus sügavamal lasunud moondekivimid on mäetekkeliiste protsesside käigus ülespoole tõstatatud ja hiljem paljundunud.

Väga sageli tuleb ehitustegevuses kokku puutuda keemiliste ja biokeemiliste settekivimitega. Mainiksime nendest ainult kipsi, anhüdriiti, lubjakive ja dolomiiti. Suurima väärtusega on muidugi lubjakivid, millel on juba küllaltki tugev struktuuriline side. See ehitustegevuseks soodne omadus on siin tingitud tsementeerumisest ja tihenemisest diageneesiprotsessis. Järelikult võib eriti tihedaid lubjakive (nagu ka biokeemilisi ränikaid kivimeid) leida ainult sügavamal lasuvates horisontides.

Looduses esineb väga sageli mitmesuguseid üleminekuvorme purdkivimitelt biokeemilistele ja keemilistele settekivimitele. Siia kuuluvad lubisavid, merglid, ränisavid, suure rauasisaldusega savid jne. Oma tekketingimuste tõttu on nad purdkivimitega võrreldes veidi kõvemad. Neis kivimeis esineb lubi, räni või raud sideainena, andes kivimile teatava kompaktsuse ja kõvaduse. On muidugi selge, et niisuguste kivimite tekkimine võib toimuda ainult teatavates spetsiifilistes tingimustes.

Petrograafilise koostise seisukohalt on eriti oluline teatavate ebapüsivate, näiteks vees lahustuvate mineraalide esinemine kivimis. Sellisteks lisanditeks on harilikult kips, anhüdriit, kaltsiit ja dolomiit. Neid ei esine kunagi tardkivimeis. Kõne alla tulevad ainult settekivimid, mis võivad nimetatud mineraale sisaldada vägagi erineval hulgal või koosneda isegi ainult neist.

Purdkivimite granulomeetrilise koostise seisukohalt huvitavad meid peamiselt kivimit moodustavate terade suurus ja koostise ühtsus. Mõlemad omadused on tingitud geneesist ja selle juures valitsenud olukorrast.

Kivimite murenemisproduktide peenendumise aste on teatavatel murenemisetappidel tingitud kahesugustest teguritest:

- 1) murenevate kivimite omadustest ja ehitusest;
- 2) kivimeid murendavate jõudude intensiivsusest.

Lätekivimite ehitust ja omadusi silmas pidades tuleb eelkõige arvestada kivimi koostist, struktuuri ja tekstuuri, vastupidavust murendavatele protsessidele ning antud lasumistingimuste juures kivimit iseloomustavat lõhelisust. Mi-

da nõrgem on kivim, seda peenemad on antud murenemisstaadiumi produktid. Nende edaspidine lagunemine ning lõpuks saviks ja liivaks muutumine sõltub juba kivimeid moodustavaid mineraale mõjutavatest keemilistest protsessidest. Viimaste olemus ja kulgemise kiirus sõltuvad aga omakorda kliimast ja kokkupuutest sademete ja pinnasevetega ning biosfääriga.

Pikaajaliste lahustumisprotsesside tagajärjel võib näiteks kogu kaltsiumkarbonaat lubjakivilasundist välja kanduda ja kohale jääb ainult savi. Viimane võib hiljem samuti teise kohta kanduda, uuesti settida ning seega ülipeentest osakesetest koosnevaid savilasundeid moodustada, ilma et nende transportil täiendavat peenendumist toimuks. Täpselt samuti võivad liivade ja liivakivide purunemise ja ümbersettimise tulemusena tekkida peeneteraliseid liivad. Hoopisteisiti kulgeb aga savi ja liivade primaarne tekkimisprotsess tardkivimitest. Murenemise lõpptulemusena muutuvad need samuti savideks ja liivadeks. Niisuguste liivaosakeste akumulierumine on seotud kvartsi vabanemisega kivimi lagunemisel, milles kvarts on üheks koostismineraaliks. Savi tekib peamiselt päevakivide lagunemisel, kusjuures protsessidest võtab aktiivselt osa ka vees esinev süsihape. Murenemisel tekkivad karbonaatsed ühendid on vees hästi lahustuvad ja kantakse seepärast lahustena eemale, kus neist teatavates tingimustes võivad tekkida keemilised või biokeemilised setted. Halvasti lahustuvad räni- ja alumiiniumoksiidid jäävad aga paigale ja moodustavad veega ühinedes mitmesuguseid savimineraale.

Murenemisprotsesside intensiivsus ja vältus sõltuvad eelkõige kohalikest tingimustest: kliimast, reljeefist ja antud rajoonis kulgevatest geoloogilistest protsessidest. Näiteks toimub rabenemine kõige intensiivsemalt kontinentaalse kliimaga mägistel aladel. Porsumisprotsessid väljenduvad aga ilmekamalt kuumas niiskes kliimas.

Murenemisproduktide kulutamine ja edasine purunemine tuule mõjul edasikandumisel on eriti iseloomulik kuiva kliimaga tuulistele taimkattevaestele aladele.

Jõgede erosioon väljendub intensiivsemalt mäestikurajoonides, kus vee langus ja järelikult ka voolukiirus on suur.

Jõesängist lahtikistud või muul viisil voolu mõju alla sat-
tunud kivimitükke kantakse edasi ja kulutatakse seni, kuni
jätkub vee elavjõudu.

Merede tegevuse tagajärjel kulgevad kivimite purunemise
ja edasise tükeldumise protsessid kõige intensiivsemalt ran-
najoone lähedal, tugeva murdlainetuse, põhjahoovuste ning
loodete tingimustes. Teataval määral eraldunud merebasseini-
de osades aga, kus sügavus on väike, murdlainetus nõrk ja
hoovused puuduvad, kulgevad ka kivimite purunemisprotsessid
nõrgalt. Jõgede poolt niisugustesse kohtadesse kantud mater-
jal setib sinna ilma täiendava mehhaanilise töötlemiseta.

Geotehnilisest seisukohast lähtudes on väga oluline osa-
ta kaudsete tunnuste põhjal määrata teatavates tingimustes
lasuva purdmaterjali tükisuurust. Hindamisel tuleb kõigepealt
arvestada vee sorteerivat toimet kivimite purunemisprodukti-
de edasikandmisel. Kui näiteks antud rajoonis on säilinud
enam-vähem ühtlane hüdrauliline režiim, peavad jõgede allu-
viaalsetted lättest suudme poole üha peenemaks muutuma. Jõ-
gede mäestikulistest osades on sel juhul tüüpilisteks seteteks
suuremad munakad, veerised ja kruus, mis keskjooksul asendu-
vad peene kruusa ja jämeda liivaga, suudme läheduses aga pee-
ne liiva ja mudaga. Kõige peenemad saviosakesed jäävad aga
väga kauaks vette hõljuma ja saavad settida alles pärast voo-
lu peaaegu täielikku lakkamist. Seetõttu kantaksegi enamik
neist osakestest jõgede poolt seisva vee basseinidesse (jär-
vedesse ja meredesse).

Selle ideaalse skeemi järgi, mis üldjoontes on küll õi-
ge, ei toimu settimist jõgedes kunagi. Põhjuseks on paljud
asjaolud, millest tähtsamad on suuremate tükide sattumine
jõgedesse suurema kaldega lisajõgedest, voolukiiruse suurene-
mine sesoonsete nähtuste tõttu (kevadised kõrgveed, paduvih-
mad jms.), kildude kuju ja mahumassi ebaühtlus jne. Paljudel
juhtudel on järsk koostise muutumine tingitud varingutest mä-
gistel aladel, mille tagajärjel tekivad jõesängi ummistavad
looduslikud tammid. Niisugustel paisualadel langeb voolukii-
rus järsult ja ka ülemjooksul võivad akumulioneeruda peenetera-
lised setted. Seetõttu ongi alluviaalsetted peaaegu alati tea-

taval määral ebaühtlased ja jaotumine terasuuruse järgi pole jõesängi pikkuse ulatuses kaugeltki alati reeglipärane.

Merede purdsetted on selles suhtes palju püsivamad. Jämedamad purunemisproduktid setivad suurte kivide ja kildude-na otseselt kalda ääres. Rannajoonest kaugenedes asendavad neid järjekorras veerised, kruus ja jämedam liiv. Peen liiv setib juba kaldast tunduvalt kaugemal, kuna kõige peenemad mudaosakesed, mis on savide läntematerjaliks, kanduvad lainetuse ja hoovustega õige suurtesse kaugustesse ja katavad settides hiiglasuuri merepõhja alasid. Teatava tükisuurusega setete kauguse kaldast määrab ühelt poolt vees hõljuvate osakeste settimiskiirus ja teiselt poolt vee liikumiskiirus hoovuste ja lainetuse mõjul.

Loomulikult võib nimetatud seaduspärasus ka meresetete puhul tunduvalt muutuda. Peamisteks häirete põhjusteks on hoovuste kiiruse ja suuna muutumine, lainetuse nõrgenemine või tugevnemine, vee temperatuuri muutumine ja lõpuks ka mineralisatsioon. Viimasel teguril, mis tingib savide teatavate füüsikalis-mehhaaniliste omaduste muutumise, peatugem veidi pikemalt.

Merebasseinides tekkinud savide struktuurilised omadused on seotud settimiskiirusega, vee keemiliste omaduste ja teiste settivat massi mõjutavate füüsikalis-keemiliste protsessidega. On teada, et merevee soolade koaguleerivefekt, mis soodustab peente osakeste liitumist ja kiirendab seega tunduval määral settimisprotsessi, on niivõrd tugev, et mõjutab mitte üksnes kolloidosakesi, vaid ka jämedamaid tolmu- ja isegi peenemaid liivaterakesi. Koaguleeriva efekti tõttu võivad kõik need suuruselt ja omadustelt erinevad osakesed vajuda veekogu põhja peaaegu üheaegselt ja moodustada väga väikese tihedusega, kuid täiesti kindla kärjelise struktuuriga setteid, mida iseloomustab liivaterakeste enam-vähem ühtlane jaotumine kogu kivimi lasundis. Edaspidi tihenevad need setted diageneesis, kuid meresavidele omased struktuurilised iseärasused säilivad täielikult.

Vastandina meredele etendab koagulatsioon mageveekogudes tunduvalt väiksemat osa. Seepärast võivad magedas vees

tekinud savisetetes jämedamad osakesed purdmaterjali pideval sattumisel veekogusse jaotuda settemassis süsteemitult ja on nagu uppunud kolloidssesse massi. Niisuguse kivimi nihketugevus on võrdlemisi väike.

Soolases merevees, eriti kui soolade kontsentratsioon on normaalsest kõrgem, setivad kõik basseini sattuvad materjalid koagulatsioonini tõttu kohe, ilma et toimuks nende täiendavat sorteerimist. Mageveebasseinides aga, eriti kui need on küllalt sügavad, langevad jämedamad fraktsioonid põhja kiiresti, kõige peenemad, kolloidosakesed jäävad aga koagulatsioonini puudumise tõttu väga kauaks hõljuvasse olekusse. Kui materjal satub veekogusse tsükliliselt, tekivad väga peeneteralised kivimid, milles plastilised kolloidsed kihikesed vahelduvad jämedateraliste liivakihtidega. Niisugused kivimid on hästi kokkusurutavad, kusjuures vajumine kulgeb kiiresti. Selliste kivimite nihketugevus on väike, sest mõõda plastilisi vahekihte võib kiiresti toimuda libisemine. Tüüpilisteks taoliste kivimite esindajateks on jääaegsed viirsavid.

Madalmeresetete tekkimist võib mõjutada ka kliima. Selles suhtes pakuvad erilist huvi laguunisetted. Laguunisettete akumul eerumise iseloomu ei mõjuta üksnes laguuni satuva materjali hulk, vaid ka vee soolsus. Olenevalt laguuni suubuva vee hulgast, atmosfäärilistest tingimustest (näiteks sademete- või põuaperioodidest) ja sellest, kuidas laguun on ühenduses merega, võib vesi niisuguses basseinis olla eri perioodidel hoopis erineva soolsusega. Mõnel juhul võib vesi isegi täiesti magedaks muutuda.

Kõigi nende tegurite mõjul võivad laguunisetetes teatud tüüpi kihid vahelduda teistega: plastilised savikihid liivakihtidega, selgema struktuuriga kihid struktuuritute kihtidega jne. Mõnel juhul võivad vahekihid olla niivõrd õhukesed, et kihilisust saab vaid mikroskoobi abil kindlaks määrata.

Deltasetteid iseloomustab põimkihiline tekstuur. Eriti selgelt väljendub see jämedateralistes setetes. Kihide kallaksuund langeb igal üksikul juhul ühte voolusuunaga an-

tud kohas ja antud ajal. Voolusuunda mõjutavad aga mitmesugused kohalikud muutused (madalate tekkimine, sāngi nihkumine küljeerosiooni mõjul jne.), mis mõjutavad ka setete akumul eerumise laadi.

Kõiki vaadeldud kivimite lasumise hāireid ei saa kōrvutada nende tagajārgedega, mis on seotud tektooniliste nāhtustega. Tektoonilised hāired vāljenduvad loomulikult vaid nende kihtide lasumisviisis, mis tekkisid enne viimaseid antud rajoonis kulgevaid tektoonilisi protsesse vōi nendega samaaegselt. Seepārast vōivad kattekihid tugevalt dislotseeritud kivimeil lasuda isegi tāiesti horisontaalselt. See nn. diskordantne lasumine nāitab, et katvate kihtidesetamise ajal pole selles rajoonis tektoonilisi liikumisi esinenud.

2. Tektooniliste nāhtuste tāhtsus kivimite fūüsikalise-mehhaaniliste omaduste kujunemisel

Tektooniliste nāhtuste kāsitlemisel seoses kivimite lasumistingimuste ja omaduste kujunemisega peab silmas pidama järgmist:

1) tektooniliste nāhtuste mõju sette kivimite akumul eerumisele ja järelikult ka nende koostise, omaduste ja lasumise muutumisele;

2) kihtide sūgavamatest horisontidest maapinnale kerkimise vōimalusi;

3) kivimite normaalse lasumise hāireid;

4) kivimite kompaktsuse hāireid;

5) põhjavete normaalse lasumise hāireid ja uute režiimide tekkimist.

Tektoonika mõju setete akumul eerumisele seisneb kontinentide konfiguratsiooni ja reljeefi muutumises litosfāari teatavate osade tōusmise ja vajumise tagajārgel. Mandri tōusmisel toimub mere regressioon ja koos sellega laieneb jōge-

de võrk, mis omakorda laiendab alluviaalsetete akumul eerumise ala. Samuti suureneb vooluste kalle, mistõttu tõuseb voolukiirus ja muutub settiva materjali iseloom (setivad suuremad purdosed). Järgnedes vee tasapinna alanemisele basseini, tekib jõesängidel süvenemise tendents, mis levib järkjärgult vastuvoolu üles. Selle tagajärjel tekivad vastupidavate kivimite lasumisaladele kosed, joad jms. Kui ka need tõkked on läbi murtud, süveneb süng, millega tavaliselt käib kaasas süngi kitsenemine. Uue süngi lõikavad jõed sisse juba omaenese setetesse ja moodustavad terrasse. Ka mere transgressiooniga kaasneval erosioonibaasi tõusmisel muutuvad alluviaalsetete akumul eerumise alad ja purdmaterjal hakkab settima seal, kus see varem suure voolukiiruse tõttu polnud võimalik. Veel enam - erosioonibaasi tõusmise ja sellega seotud jõesängide üleujutuse tagajärjel levivad alluviaalsetted voolusüngi kõrgematele aladele.

Kontinentide konfiguratsiooni muutumisel peab muutuma ka merehoovuste režiim. Selle tagajärjel võivad merre kantud materjalid hakata settima hoopis teistel aladel. See omakorda mõjutab lubjakive tekitavate organismide elutingimusi. Merehoovuste kiiruse suurenemisel tõuseb hoovuste uhtumise võime, mistõttu nende erodeeriva mõju alla võivad sattuda varasemad setted, mis uuesti sorteeritakse terasuuruse järgi ja setitatakse.

Põhjalikud muutused kontinentide konfiguratsioonis ja absoluutkõrgustes mõjutavad ka kliimat, mis teatavasti avaldab samuti mõju sette kivimite omadustele, koostisele ja lasumisele. Mandri igasugune tõusmine loob kontinentaalsema režiimi. Keskistel ja suurtel laiuskraadidel tõstab see tunduvalt talviste lumeperioodide osatähtsust, mistõttu hakkavad selgemini väljenduma ka kevadised kõrgveeperioodid. Väikestel laiuskraadidel iseloomustab kontinentaalset režiimi lai aladane steppide ja kõrbete levik, kus akumul eeruvad liivad ja lõss.

Kontinentide tõusmisel saavutavad ülekaalu rabenemisprotsessid. Kuna kontinentide kerkimisega kaasneb mere regressioon, siis tekib endise merepõhja aladele rohkesti laguunisetteid.

Kontinentide vajumise ja mere transgressiooni puhul muutub kliima pehmemaks, merelisemaks, esineb rikkalikult sade- meid, mille mõjul lõunarajoonides areneb lopsakas taimestik ja ülekaalu saavutavad porsumisprotsessid.

Kivimite füüsikalis-mehhaaniliste omaduste seisukohast pakuvad eelnenud geoloogiliste ajaastute meresetted ehituste alusena huvi enamasti vaid siis, kui nad on maakoore tektooniliste liikumiste tagajärjel kuivale tõstatud. Seetõttu võime vanemaid settekivimeid projekteeritava ehituse alusena leida peamiselt dislotseeritud rajoonides (mägedes) ja aladel, mis on pikemat aega erosiooni mõju all olnud (s.t. kust kattekivimid on kõrvaldatud).

Oma olemuselt võivad kõik tektoonilised häired olla seotud kas maakoore valitsevate tõmbe- või survejõududega. Tõmbejõududega on seotud maakoore osade radiaalne, survejõududega aga horisontaalne liikumine. Tüüpilisemaks radiaalse dislokatsiooni vormiks on murrangud, horisontaalse dislokatsiooni vormiks aga kurrud.

Murrangu puhul toimub vaid teatud kihtide vertikaalne liikumine, ilma et tekiks häireid normaalses lasumises ja kivimite struktuuris, järelkult ka nende omadustes. Mainitud asjaoludest tingituna asetseb meid huvitav kiht murrangu kummalgi tiival erineval kõrgusel. Samal ajal satub aga murrangu tõusnud ala kui väljaulatuv osa eriti tugeva denu- datsiooni mõju alla. Selle purunemisproduktid võivad tiiva jalamile kogunedes katta osa vajunud alast või osaliselt ka eemale kanduda. Sellepärast lasuvadki põhikivimid murrangu tõusnud osas maapinnale tunduvalt lähemal.

Mõnel juhul (eriti vanade murrangute või küllalt aeglasel nihkumisel tekkivate murrangute puhul) võib murrangu mõlema tiiva absoluutkõrgus pikaajalise erosiooni või abrasi- ooni tagajärjel täiesti võrdseks muutuda. Sel juhul saab kunagise murrangu ära tunda vaid selle järgi, et murrangulõ- hest kummalgi pool ulatuvad maapinnale erineva vanuse ja ehi- tusega ning järelkult ka erinevate füüsikalis-mehhaaniliste omadustega kivimid. Murrangu levikuala on tavaliselt küllalt suur ja järelkult saab ehituse asukoha peaaegu alati kas

ühlele või teisele poole lõhet valida. Paljude asjaolude tõttu pole soovitatav ehitust rajada nii, et selle alus murrangulõhet lõikaks.

Murrangulõhed on harva tühjad (avatud). Enamasti on lõhed täidetud dislotseeritud massiivi enese kildude bretsaga. Kui killud on tsementeerimata või nõrgalt tsementeeritud, on olemas väga head tingimused vee tsirkuleerimiseks. Ehituste püstitamisel, süvendite kaevamisel, stollide, tunnelite jms. rajamisel võivad niisugused veed töökohta üle ujutada, paisude puhul võib vesi aga neid mööda veehoidlast välja voolata.

Sageli on murrangulõhed ja neid täitev materjal tsementeeritud tardunud mineraalsete lahustega. Niisuguste lõhede veeläbilaskvus on muidugi vähenenud, kuid sõltub siiski palju tsemendi veekindlusest.

Mõnikord on murrangulõhed teedeks, mida mööda valgub maapinnale magma. Sel juhul on nad täidetud tardkivimitega.

Kuna murrangus säilib sama tiiva piirides kihtide kindel järjekord, saab murrangu tõstetud tiiva uurimise põhjal luua endale küllaltki selge pildi ka vajunud tiiva kihtide ehitusest ja lasumisest. Kuid niisuguste prognooside puhul tuleb alati arvestada, et murranguid esineb sagedamini neil aladel, kus varem on toimunud juba kihtide kurrutamisi. Seega võivad murranguid tekitavad liikumised kulgeda juba häiritud lasumisega kihtides.

Kurrutamisel muutub alati rajooni esialgne geoloogiline struktuur ja kivimite lasumine. Mõnel juhul on lasumise häired vaevalt märgatavad ja seisnevad ainult kihtide väga väikeses kaldes. Mõnikord väljendub aga kurrutus niivõrd intensiivselt, et kihtide kalle võib ulatuda kuni 90°-ni.

Kurdusid tekitavate jõudude iseärasustest tingituna ei jää kihtide kalle ja rõhtsiht ühe ja sama kurru ulatuses kaugetki konstantseks. Kurd ise võib olla aga väga mitmesuguste dislokatsioonivormide kombinatsioon (peen kurrutus, ülenihked jms.). Ülenihke puhul katavad pealenihkunud kihid oma tekkimiskohale jäänud kivimikihte. Geotehnilisest seisukohast on ülenihked huvitavad neile iseloomulike lasumistingimuste

ja nihkumise kontaktipinnal tekkivate purunemisproduktide poolest. Eelkõige on vaja arvestada, et ülenihke puhul võivad noorema formatsiooni kivimid sattuda vanemate kivimite alla. Kihtide lasumine on ülenihke kontaktisoonis tugevasti häiritud. Üksikute kihtide kaldenurgad võivad muutuda $0-180^{\circ}$, s.o. kihid võivad lasuda täiesti ümerpööratud asendis. Ülenihke pealispind on tavaliselt korrapärase kujuga.

Kurdude väga muutliku ja mitmekesise ehituse tõttu tuleb ehitusplatsi hindamisel pöörata erilist tähelepanu kivimite lasumise häiretele. Eriti oluline on see hüdrotehniliste ehituste puhul. Kurruutatud rajoonides tuleb projekteeritava ehituse aluse analüüsimisel alati arvestada, et kurd kujutab endast siiski mingit geomeetrilist keha, mille ehitus allub teatavatele seaduspärasustele. Olulisemaks momendiks on seejuures kihtide järjestus kurru kõigis osades, s.t. üks kiht asendub igas kurru osas teatud kindla teise kihiga. Sellest faktist tuleneb võimalus aluse struktuuri ja kihtide omadusi ette arvestada.

Dislokatsioonide muutumisel võib väga sageli ja põhjalikult muutuda ka põhjavete režiim. Need muutused seisnevad tavaliselt järgmises:

- 1) kompaktsete kivimite veesisalduse suurenemises kivimite lõhelisuse suurenemise tagajärjel;
- 2) vett kandvate horisontide lasumistingimuste ja režiimi muutumises;
- 3) arteesia vee horisontide tekkimises.

Suurte lõhede tekkimisel võib kivimi veeläbilaskvus kaastastroofiliseks muutuda. Eriti suuri raskusi võitluses lõhedega esineb hüdrotehniliste ehituste rajamisel. Eriti ohtlikud on tõmbejõudude tagajärjel tekkinud dislokatsioonid, sest nendes tsoonides on lõhed pahatihti avatud.

Väga sageli algab vee suhtes ebapüsivates kihtkondades esinevate tektooniliste lõhede seintel põhjavete toimel lahustumisprotsess. Lõhed laienevad ja muutuvad tihti suurteks maa-alusteks tühikuteks.

Muutused vett kandvate horisontide režiimis võivad esineda

1) vettpidava aluspõhja kalde muutumises ja selle tagajärjel hüdraulilise gradiendi ning järelikult ka vee voolukiiruse muutumises;

2) tõkete tekkimises vett kandvasse horisonti, millega seoses tõuseb põhjavete tase ja väheneb voolukiirus;

3) vett kandva horisondi katkemises, mille tagajärjel väheneb selle levikuala.

Enamasti asetsevad vett kandvad horisondid isegi tugevalt dislokteeritud rajoonides nooremates, vanemaid formatsioone katvates setetes. Sel juhul määrab vett kandva horisondi kalde ürgne reljeef, mis omakorda on tingitud denudeerivatest teguritest, esmajoones aga erosioonist.

Maa-alustel voolustel esineb tektoonilisi tõkkeid siis, kui rajoonis leidub maa-aluseid antiklinaale, ülanguid jms.

Dislokatsioonide osatähtsus arteesia vete tekkimisel on üldiselt teada. Valdav enamik arteesia vetest on seotud kurdude ja murrangutega. Dislokatsiooniprotsesside tagajärjel võivad moodustuda vägagi ulatuslikud arteesia basseinid.

3. Kivimite lõhelisus

Kivimite lõhelisusel on peaaegu kõigil ehitusaladel äärmiselt suur tähtsus. Juba eespool selgus, et avatud lõhed osutuvad väga heaks põhjavete kogunemiskohaks ja tsirkuleerimisteks. Peale selle vähendavad lõhed oluliselt kivimite tugevusomadusi ja võivad nendele püstitatud ehitustele saatuslikuks saada. Võimalikud on ka kõrgemate nõlvade varisemised ja libisemised. Samuti on kaeveõõnsuste ja tunnelite rajamine ning toestamine lõhederikastes kivimites äärmiselt tülikas.

Tuleb silmas pidada, et peaaegu kõik kaljused kivimid ja kõvad savid sisaldavad lõhesid. Kuid lõhed võivad oma tekkelt, iseloomult, ulatuselt, mõõtmetelt ja levikult olla väga mitmesugused. Sellest tingituna on ka nende mõju väga mitmesugune.

Enamikul juhtudel moodustavad lõhed kivimite massiivis teatava süsteemi. Lõhede süsteem jaotab kivimimassiivi väga

mitmesuguse kuju ja suurusega plokkideks. Sageli ühtivad mõned lõhed kihistuspindadega, erinevate kivimite kontaktipindadega jne.

Tekketingimustest lähtudes jaotatakse kivimites olevad lõhed kolme rühma:

- 1) tektoonilised lõhed,
- 2) endokineetilised lõhed,
- 3) eksokineetilised lõhed.

Tektooniliste lõhede tekkimine on seotud tektooniliste protsesside kulgemisega, mil kivimimassiivile mõjuvad painde-, tõmbe- jt. pinged. Tektoonilised lõhed on eriti iseloomulikud tugevasti dislotseeritud aladele. Mjal on nad nõrgalt arenenud. Tektoonilistest lõhedest tuleb eraldada pseudotektoonilisi lõhesid. Tüüpilised pseudotektoonilised lõhed tekivad maalihetel. Siia kuuluvad ka maakoore vajumisel moodustunud lõhed. Kõige sagedamini on vajumise põhjuseks karstiõõnsuste ja vanade kaevanduskäikude sissevarisemine või sügavamal lasuvate lõssilasundite niiskumisest tingitud tihenemine, kuid põhjuseks võib olla ka suurema hulga maakoore esineva jää ülessulamine.

Endokineetilised lõhed moodustuvad kivimite tekkimise protsessis. Tardkivimites on nad seotud magma hangumisel esineva mahu vähenemisega, savides ja karbonaatsetes kivimites aga rohkesti niiskust sisaldavate setete tihenemisega kivimiks formeerumisel. Peale selle esineb lubjakividel väga sageli ka hea plaatjas eralduvus kihtide viisi.

Eksokineetilised lõhed tekivad kivimites murenemisprotsessides. Kuid väga sageli on eksokineetilised lõhed juba varem ühel või teisel eespool mainitud põhjusel tekkinud lõhede teatavaks arenemisjärguks. Lõhede arenemisel etendavad olulist osa kõik murenemisprotsessid. Rabenemise mõju on, nagu teada, seotud peamiselt temperatuurimuutustega. Porumisprotsessid avalduvad tavaliselt lõhede seinu moodustavate kivimite lagundamises või isegi lahustamises sademete või põhjavete mõjul. Orgaanilisel murenemisel esinevad bakterioloogilised protsessid on tavaliselt seotud ka keemiliste protsessidega.

Lõhede laiuselt lähtudes võib eraldada mikroskoopilisi lõhesid, mis on nähtavad ainult luubi või mikroskoobi abil, ja suuremaid, juba palja silmaga märgatavaid makroskoopilisi lõhesid, mille laius ulatub sentimeetri murdosadest kümnete sentimeetriteni või isegi meetriteni.

Oma iseloomult võivad lõhed olla kas avatud (tühjad) või mingi materjaliga täidetud. Tardkivimites olevad lõhed on sageli täidetud magma hangumisproduktidega, karbonaatsete kivimite lõhed aga kaltsiidiga. Kipsi- ja anhidriidilasundite piirkonnas on savides ja marglites esinevad lõhed sageli täidetud nendes tsirkuleerivast veest settinud sekundaarse kipsiga. Aktiivse murenemise tsoonis on lõhed tavaliselt tühjad või ainult teataval määral murenemisproduktidega täitunud.

Sügavuse suunas ahenevad makroskoopilised lõhed pikka mööda ja muutuvad lõpuks mikroskoopilisteks lõhedeks.

Kivimite lõhelisuse uurimine peab toimuma nii regionaalses ulatuses (teatavate rajoonide piirides) kui ka otse ehitusplatsil. Regionaalsetel uurimistel selgitatakse tavaliselt suuremate tektooniliste lõhede või nende süsteemide esinemise võimalused, kusjuures aluseks on antud ala geoloogilise struktuuri kohta käivad testmed.

Ehitusplatsil uuritakse kivimite lõhelisust täpsemalt: määratakse lõhelisuse aste, lõhede mõõtmed ja ulatus, nende täitumise iseloom jne. Seejuures ei tohi märkimata jätta ka lõhede orientatsiooni.

Kõige paremaks lõhede tundmaõppimise teeks on lõhesid sisaldavate kivimite avamine uurimiskaeveõõnsustega (kraavidega, stollidega, šurfiga jne.). Juba nende kaeveõõnsuste rajamise käigus peab toimuma lõhede kirjeldamine, joonistamine või fotografeerimine. Viimastel aastatel on selleks hea eduga kasutatud ka suure läbimõõduga (kuni 1,5 m) puurauke. Nendesse lastud lavalt on suurepäraseid võimalused lõhede tundmaõppimiseks.

Lõhelisuse paremaks iseloomustamiseks jaotatakse kivimid tinglikult klassidesse, mida tähistatakse indeksitega A-I, A-II, A-III, A-IV, B-I, B-II, B-III, B-IV, B-I, B-II, B-III, B-IV, Γ-I, Γ-II, Γ-III, Γ-IV. Tähed indeksis näitavad lõ-

hedest tingitud kivimi tühemelisust (klassis A - 0,1-0,3%, klassis I - 3-10%), numbrid aga lõhedega eraldatud kivimi-plokkide lineaarmõõtmeid (klassis I 300-100 cm, klassis IV 10-3 cm).

II. KIVIMITE EHTUSGEOLOOGILINE KLASSIFIKATSIOON

Kivimite ehitus ja omadused on väga mitmekesised. Ehitusinseneri vaatevinklist lähtudes ei ole petrograafias kasutatavatel mitmesugustel kivimite klassifikatsioonidel erilist väärtust. Samuti ei ole paljudel petrograafias nii olulistel detailidel ehitusgeoloogias mingit tähtsust. Näiteks ei ole ehitusgeoloogias erilist tarvidust graniitide ja dioritide detailseks eraldamiseks, kuna mõlemad osutuvad väga headeks alusteks isegi kõige raskemate ehituste puhul. Seepärast võetaksegi kivimite ehitusgeoloogilisel klassifitseerimisel aluseks nende tugevusomadused, mis sõltuvad peamiselt kivimeid moodustavate üksikosakeste vahelise sideme iseloomust ja tugevusest.

Vastavalt sellele jaotataksegi kivimid ehitusgeoloogilisel klassifitseerimisel kaljusteks ja mittekaljusteks. Kaljusteks nimetatakse kivimeid, mille üksikosakesed on seotud jäiga sidemega. See võib omakorda olla kas kristallisatsiooniline või baseeruda mingil tsemendil. Seepärast kuuluvadki kaljuste kivimite klassi nii tard-, moonde- kui ka kõvad tsementeerunud settekivimid.

Mittekaljuste kivimite üksikosakeste vahel võib esineda suhteliselt nõrk kolloidne side või puudub see üldse.

Kaljuste kivimite edasine jaotamine toimub üksikosakeste või tsemendi veekindluse järgi, mittekaljustel aga üksikosakeste omavahelise sideme järgi. Vastavalt sellele eraldataksegi kaljuste kivimite klassis veekindlaid ja mitteveekindlaid (nn. pooleldi kaljuseid), mittekaljuste kivimite klassis aga seotud (savikaid) ja seoseta (pudedaid) kivimeid.

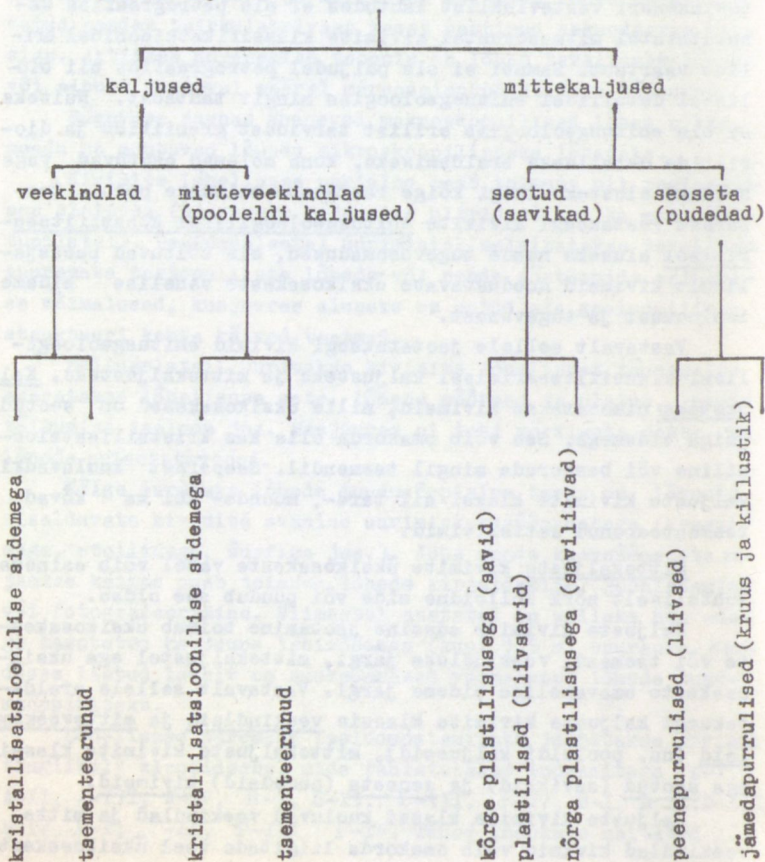
Kaljuste kivimite klassi kuuluvad veekindlad ja mitteveekindlad kivimid võib omakorda liigitada veel üksikosakeste

vahelise sideme iseloomu, mittekaljuste kivimite hulka kuuluvad seotud (savikad) kivimid aga plastilisuse astme ja seoseta (pudedad) kivimid üksikosakeste mõõtmete järgi.

Parema ülevaate saamiseks esitatakse kirjeldatud klassifikatsioon järgmise skeemi kohaselt.

K i v i m i d

(ehitusasjanduses nimetatakse neid ka pinnasteks)



Kaljuste kivimite deformeerumise seadused on lähedased kõva keha deformeerumise seadustele, kuid täielikku ühtivust muidugi ei esine. Jääkdeformatsioonid tekivad juba koormamise algperioodil ning kasvavad koos pingega ja koormamise kestusega. Löökkormustele reageerivad kaljused kivimid nagu happed või elastsed kehad. Nad võivad hästi seista järskude nõlvadena (sõltuvalt murenemise astmest ja lõhede rohkusest). Massiivis osutuvad praktiliselt vettpidavateks. Filtratsioonilised omadused ja veesisaldus sõltuvad lõhelisusest, tühikute esinemisest jne. Veekindlus on sõltuv üksikosakeste või tsemendi lahustuvusest vees.

Mittekaljuste seotud (savikate) kivimite tugevusomadused sõltuvad peaaegjalikult niiskusesisaldusest. Püsivus nõlvades sõltub kõvadel või poolkõvadel savikatel kivimitel lõhelisusest. Savikad kivimid on suure veemahutavusega ja praktiliselt vettpidavad. Kõvadel või poolkõvadel liikidel sõltuvad filtratsioonilised omadused lõhelisusest.

Mittekaljuste seoseta (pudedate) kivimite üksikosakesed on lihtsalt üksteisega kokkupuutes. Seega sõltuvad pudedate kivimite tugevusomadused sisehõõrdumisest ja üksikosakeste staatilisest tugevusest. Staatiliste koormuste all nad märkimisväärselt ei tihene. Tihenevus dünaamiliste koormuste all sõltub eelkõige esialgsest tihedusest ja raputuse intensiivsusest ning võib lõppkokkuvõttes olla üsna suur. On vett hästi läbilaskvad. Veega küllastunult võivad omandada ujupinnase omadused.

III. KIVIMITE LOODUSLIK TIHENEMINE

Ehituslike iseärasuste tõttu võivad looduslikud tihenemisprotsessid toimuda ainult mittekaljustes kivimites. Välisrõhu suurenemisest tingitud tihenemine on aga võimalik kõigis kivimites. Siin käsitleme õige põgusalt ainult looduslike tihenemisprotsesse, kuna välisrõhu suurenemisest tingitud tihenemisenähtusi vaadeldakse detailsemalt aluste ja vundamentide kursuses.

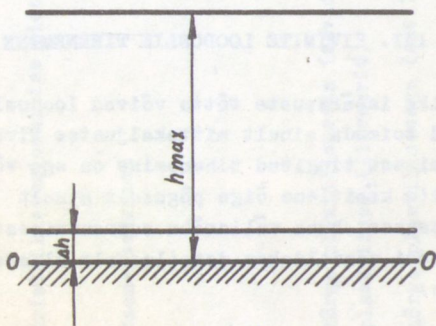
1. Liivade ja savide looduslik tihenemine

Setete tihenemine toimub põhiliselt pooride mahu vähenemise tõttu. Seejuures on tihenemine tavaliselt jääva iseloomuga ja saavutatakse setet moodustavate üksikosakeste nihkumisega üksteise suhtes tihedamasse asendisse. Sõltuvalt setete iseloomust toimub vahest ka üksikosakeste teatav ümber-orienteerumine. Näiteks asetsevad tihenemata savisettes üksikosakesed täiesti korrapäraselt ja kaootiliselt. Tihenemisel kas või oma raskuse mõjul orienteeruvad aga plaatjad lehekujulised saviosakesed enam-vähem risti surve suunale. Tihenemise tagajärjel suureneb nii üksikosakeste kui ka nende kontaktide arv sette ühes ruumiühikus.

Üksikosakeste nihkumisega üksteise suhtes tihedamasse asendisse kaasneb ka setete struktuuri muutumine.

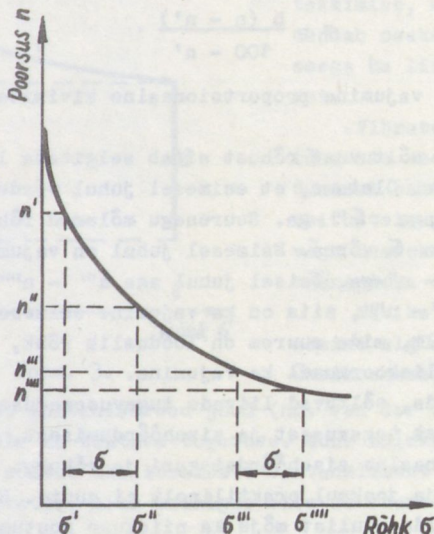
Mõningal määral toimub sette tihenemine ka üksikosakeste ümber olevate veekilekeste õhenemise arvel kontaktikohtades.

Oletame, et mingile pinnale OO koguneb teatava aja mõõdudes elementaarne settekiht paksusega Δh (joonis 1). Settekompleksi edasisel paksenemisel suureneb ka elementaarkihile mõjuv rõhk. Kui see alguses oli lähedane nullile, siis settimisprotsessi lõpul ulatub rõhk juba $9,8 \cdot \sigma \cdot h_{\max}$ (σ tähistab sette mahumassi). Arusaadavalt toimub selle rõhu tagajärjel sette tihenemine nii vaadeldavas elementaarkihis kui ka sellest ülevalpool. Tihenemise intensiivsust võib aga hinnata poorsuse vähenemise järgi.



Joon. 1.

Liivade ja savikate kivimite loodusliku tihenemise protsessi on väga lihtne illustreerida loodusliku tihenemise kõvera abil, mis väljendab poorsuse sõltuvust rõhust. Liivade loodusliku tihenemise protsessis üksikosakeste pooridesse paiknemise võimalused vähenevad järk-järgult. Koos rõhu suurenemisega väheneb seega ka tihenemise intensiivsus. Seepärast ongi liivade loodusliku tihenemise kõverad hüperboolid (joonis 2).



Joon. 2.

Tihenemisest tingitud maapinna vajumisi võib arvutada järgmiselt. Oletame, et mingi kompleksi (paksusega h) poorsus on tihenemisel vähenenud n -lt n' -ni. Osakeste arv aga seejuures suurenenud ei ole. Kui tähistada kivimi üldmaht 100 %, siis osakeste maht kuni tihenemiseni on $100 - n$ ja pärast tihenemist $100 - n'$. Osakeste mahu sambas, mille kõrgus on h ja ristlõige üks pindalaühik, tähistame V -ga. Kuid sama mahu võib arvutada ka valemist

$$V = \frac{h (100 - n)}{100}.$$

Et pärast tihenemist on samba kõrguseks $h - s$ (s tähistab vajumise ulatust), siis avaldub maht V ka järgmiselt:

$$V = \frac{(h - s) (100 - n')}{100}.$$

Võrdsustame saadud võrrandite paremad pooled ja lahendame siis s suhtes. Seega

$$s = \frac{h (n - n')}{100 - n'}.$$

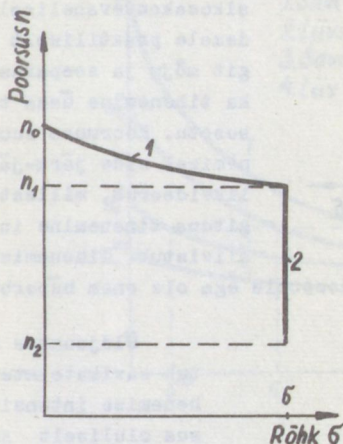
Järelikult on vajumine proportsionaalne kivimite poorsuse vähenemisega.

Vajumise sõltuvust rõhust aitab selgitada loodusliku tihenemise kõver. Oletame, et esimesel juhul võrdub rõhk ζ' -ga, teisel juhul aga ζ'' -ga. Suurenegu mõlemad rõhud hoone mõjust tingituna ζ võrra. Esimesel juhul on vajumine proportsionaalne $n' - n''$ -ga, teisel juhul aga $n'' - n'''$ -ga. Kuna $n' - n'' > n'' - n'''$, siis on ka vajumine esimesel juhul suurem. Järelikult, mida suurem on looduslik rõhk, seda väiksem on võrdsel väliskoormusel ka vajumine.

Nagu teada, sõltuvad liivade tugevusomadused üksikosakes-te staatilisest tugevusest ja sisehõõrdumisest, mis omakorda on proportsionaalne sisehõõrdeteguriga ja rõhuga. Liivade sisehõõrdetegur aja jooksul praktiliselt ei muutu. Sisehõõrdetegurile ei avalda olulist mõju ka niiskuse muutumine. Järelikult on liivadel ainsaks tugevust mõjutavaks faktoriks nii looduslikes tingimustes kui ka ehituste alustes rõhu muutumine. Seda võivad aga põhjustada kas vibratsioonid või vee üles- alla liikumine liiva poorides.

Vibratsioonidel muutub sageli liivaosakestele mõjuvate jõudude suurus ja suund. Allapoole suunduvate jõudude mõjul liivaosakeste raskus ja koos sellega ka rõhk ning kande võime nagu kasvaksid. Ülespoole suunduvad jõud kutsuvad aga esile vastupidiseid nähtusi. Ajal, mil rakusjõudude mõju on minimaalne, on liivaosakestel võimalus tihedamasse asendisse paikneda, millega kaasneb poorsuse vähenemine ja vajumine. Vibratsioonide põhjuseks võivad olla maavärinatest tingitud

maakoore võnkumised, masinate töö jne. Taolistes tingimustes võib liivade poorsus isegi konstantsel välisrõhul õige oluliselt väheneda ($\Delta n_v = n_1 - n_2$) ja ületada mitmekordselt ehitusest enesest tingitud mõju ($\Delta n = n_0 - n_1$; joonis 3).



Joon. 3.

vahel mõjuvad molekulaarsed jõud (nn. van der Waalsi jõud), andes savidele ka teatava tugevuse. Kuna molekulaarsete jõudude suurus sõltub üksikosakeste omavahelisest kaugusest, siis on mõistetav, miks esialgne side on suurem tihedamates setetes.

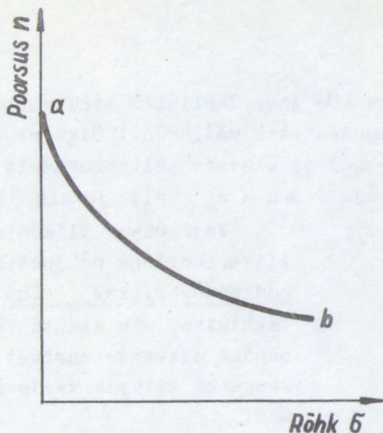
Savikate setete tihenemise hilisemates faasides üksikosakesed tsementeeritakse, millega koos suureneb õige oluliselt ka tugevus.

Tsementeerumata, üksnes molekulaarsetel jõududel baseeruva sidemega savide tihenemine toimub juba üsna väikeste koormuste mõjul. Tihenemiskõveraks on hüperbool, mis on suunatud kumera küljega allapoole ja mille kõverus rõhu suurenemisega väheneb (joonis 4).

Vee tõusev liikumine liiva poorides põhjustab hüdrodünaamilise rõhu tekkimise, mis samuti vähendab osakeste raskust ja seega ka liivade kandevõimet.

Vibratsioonide ja tõusvate veevooluste puudumisel osutuvad liivad ehitustele ja rajatistele väga headeks ja usaldusväärseteks alusteks.

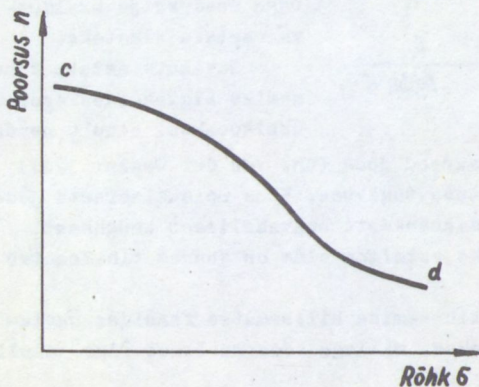
Savikate setete tihenemise algfaasides seovad üksikosakesi ainult nende



Joon. 4.

Tsementeerunud savikate setete tihenemine toimub eespool kirjeldatuga võrreldes veidi teisiti. Esimesed koormamise astmed ei avalda üksikosakestevahelisele sidemele praktiliselt mingit mõju ja seepärast on ka tihenemine üsna tähtsusetu. Koormuse suurenemisel side järk-järgult likvideerub, millest tingituna tihenemine intensiivistub. Tihenemiskõver

on suunatud kumera küljega ülespoole ega ole enam hüperbool (joonis 5).



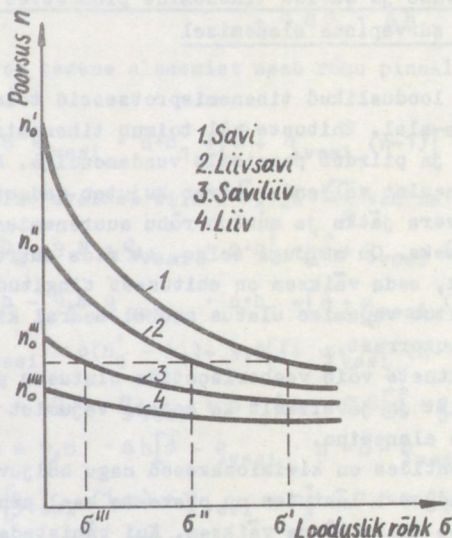
Joon. 5.

Üldjoontes sõltub savikate setete tihenemise intensiivsus oluliselt sette koostisest ja üksikosakesi ümbritseva keskkonna iseärasustest.

Setete koostise mõju tihenemise intensiivsusele selgub joonisel 6 esitatud savi, liivsavi, saviliiva ja liiva loodusliku tihenemise kõ-

veraid jälgides. Kõik need kõverad on koostatud võrdsetest tingimustest lähtudes.

Savikate setete esialgne poorsus, aga ka tihedus, sõltuvad osakeste olemusest ja vee koostisest. Mida rohkem on vee sama koostise juures settes saviosakesi, seda suurem on algaht ja poorsus, kuid seda väiksem on tihedus. Muudel võrdsetel tingimustel on rohkem naatriumioone sisaldava vee puhul



Joon. 6.

savikate setete maht suurem, kaaliumioonide sisalduse puhul aga väiksem. Ka tihenemise intensiivsus on rohkem saviosakesi sisaldavate setete puhul suurem. Kuid tihenemise intensiivsust mõjutab õige oluliselt ka savide mineraloogiline koostis. Muudel võrdsetel tingimustel suureneb see montmorilloniidi-sisalduse suurenemisega. Mis puutub savikate setete kandevõimesse, siis ühesuguse tiheduse juures on kõige tugevam puhas savi, kõige nõrgem aga saviliiv.

Üldiselt ei ole savikate setete algtihedus setteosakesi ümbritseva veekile mõjust tingituna ühesugune. Näiteks veega küllastunud savisetete algporsus n_a on tunduvalt suurem-vähese veesisaldusega setete algporsusest n_c . Nende erinevus $n = n_a - n_c$ väheneb saviosakeste sisalduse vähenemisega ja sette niiskuse suurenemisega. Seda asjaolu kasutatakse sageli ära savikate osakeste sisalduse määramiseks välistöödel. Mida suurem on kuivade ja veega küllastunud savisetete mahuvahe, seda enam on setetes saviosakesi.

2. Liivade ja savide tihenemine pinnasevee taseme või survepinna alanemisel

Kivimite looduslikud tihenemisprotsessid toimuvad tavaliselt laial maa-alal. Ehituste all toimub tihenemine ainult kitsas lõigus ja piirdub peamiselt vundamendiga. Ehitustest tingitud tihenemist väljendav kõver kujutab endast loodusliku tihenemise kõvera jätku ja muutub rõhu suurenemisel üha enam ja enam laugemaks. On muidugi selge, et mida suurem on olnud looduslik rõhk, seda väiksem on ehitusest tingitud vajumine. Järelikult sõltub vajumise ulatus suurel määral kivimite eelnevast pingeolukorrast.

Peale ehituste võib veehorisontide ulatuses põhjustada rõhu suurenemist ja järelikult ka setete vajumist vee taseme või survepinna alanemine.

Veehorisontides on kivimiosakesed nagu hõljuvas olekus. Arhimedese seadusest lähtudes on osakeste kaal nende poolt väljatõrjutava vee kaalu võrra väiksem. Kui tähistada poorse kivimi maht V ja kaal G , poorsus aga ühiku osades n -ga, siis vees hõljuvas olekus avaldub selle ühe ruumalaühiku kaal järgmiselt:

$$\begin{aligned} \gamma' &= \frac{G - G_{\text{vesi}}}{V} = \frac{G - (V - nV) \cdot 9,8 \cdot \gamma_{\text{vesi}}}{V} = \\ &= \frac{G + 9,8 \cdot \gamma_{\text{vesi}} \cdot nV - V \cdot 9,8 \cdot \gamma_{\text{vesi}}}{V} = \\ &= \frac{G}{V} + 9,8 \cdot \gamma_{\text{vesi}} (n - 1). \end{aligned}$$

Kuna $\frac{G}{V}$ pole muud kui $9,8 \cdot \gamma$,

siis

$$\gamma' = 9,8[\gamma + \gamma_{\text{vesi}} (n - 1)].$$

Teades kivimi kaalu muutumist, ei ole enam raske arvutada ka loodusliku rõhu muutumist.

Alanegu vee tase Δh võrra. Sel juhul avaldub pinnale ab mõjuv rõhk vee, vees hõljuvas ja tavalises olekus esineva kivimi rõhkude summana (joonis 7). Järelikult

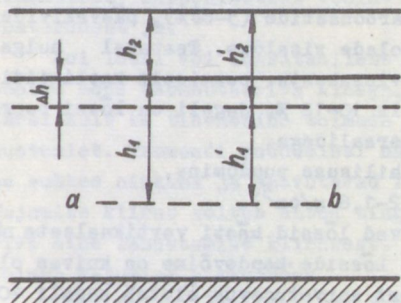
$$\sigma_1 = 9,8 \cdot \rho_{\text{vesi}} \cdot n \cdot h_1' + [\delta + \rho_{\text{vesi}} (n-1)] 9,8 \cdot h_1' + 9,8 \delta \cdot \Delta h.$$

Enne vee taseme alanemist saab rõhu pinnale ab arvutada järgmiselt:

$$\sigma_2 = 9,8 \rho_{\text{vesi}} \cdot n \cdot h_1 + [\delta + \rho_{\text{vesi}} (n-1)] 9,8 h_1$$

Rõhu muutumine avaldub siis σ_1 ja σ_2 vahena:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma &= \sigma_1 - \sigma_2 = 9,8 \cdot \rho_{\text{vesi}} \cdot n \cdot h_1' + [\delta + \rho_{\text{vesi}} (n-1)] 9,8 \cdot h_1' \\ &+ 9,8 \delta \cdot \Delta h - 9,8 \rho_{\text{vesi}} \cdot n \cdot h_1 - [\delta + \rho_{\text{vesi}} (n-1)] 9,8 \cdot h_1 = \\ &= 9,8 \cdot \rho_{\text{vesi}} \cdot n (h_1' - h_1) + 9,8 [\delta + \rho_{\text{vesi}} (n-1)] \cdot (h_1' - h_1) + \\ &+ 9,8 \delta \cdot \Delta h = -9,8 \cdot \rho_{\text{vesi}} \cdot n \cdot \Delta h - 9,8 [\delta + \rho_{\text{vesi}} (n-1)] \cdot \Delta h + \\ &+ 9,8 \delta \cdot \Delta h = 9,8 \cdot \Delta h [\delta - \rho_{\text{vesi}} \cdot n - \delta - \rho_{\text{vesi}} (n-1)] = \\ &= 9,8 \cdot \Delta h [\rho_{\text{vesi}} (1-n) - \rho_{\text{vesi}} \cdot n] = 9,8 \cdot \rho_{\text{vesi}} \cdot \Delta h (1-2n) \\ &= 9,8 \cdot \rho_{\text{vesi}} \cdot \Delta h (1-2n). \end{aligned}$$



Joon. 7.

Kui liivase veehorisondi poorsuseks võtta 40 % ja vee taseme alanemine ulatub 5 meetrini, suureneb rõhk

$$\begin{aligned} \Delta \sigma &= 9,8 \cdot 1000 \cdot 5 (1-2 \cdot 0,4) = \\ &= 49000 \cdot 0,2 = \\ &= 9800 \text{ N/m}^2 = 0,98 \text{ N/cm}^2. \end{aligned}$$

Rõhu suurenemine põhjustab endastmõistetavalt kivimi täiendava tihendamise. Kuid kuivaks muutunud veehorisondi osa

tihenes ka loodusliku protsessina ilma välisrõhu muutumiseta. Järelikult nende samasuunaliste protsesside tagajärjed liituvad ja võivad põhjustada märkimisväärsed ehituste aluste vajumisi. Näiteks Mehhiko linna piirides ulatuvad sellest tingitud vajumised 6 meetrini. Vajumise kiirus on olnud isegi kuni 42 cm aastas.

Vee intensiivse tarbimise võttu alaneb arteesia vete survepind pidevalt ka Tokio territooriumil ja koos sellega toimuvad vajumised kiirusega kuni mõnikümmend sentimeetrit aastas. Analoožilised nähtused esinevad samuti Kalifornias. Vajumised ulatuvad siin 5 meetrini ja on kulgenud kiirusega kuni 40 cm aastas.

IV. LÖSSIDE JA LÖSSITAOLISTE KIVIMITE NIISKUSVAJUMINE

Tüüpilisel lössil on järgmised iseloomulikud tunnused ja füüsikalised-mehhaanilised omadused.

1. Kahkjaskollane, harva hallikaskollane värvus.
2. Suur poorsus, mis ulatub 50–60 %. Suuremad poorid on nähtavad juba palja silmaga. Mõned poorid on toru- või kanalitaolised ja tekkinud lössilasundisse jäänud taimede kõdunemisel. Lössi filtratsioonimoodul on 0,7–1,2 m ööpäevas.
3. Suur tolmufraktsioonide (0,05–0,005 mm) sisaldus, mis ulatub 75 %-ni ja isegi üle selle. Seepärast on löss pehme, jahune ja kergesti pulbriks hõõrutav.
4. Petrograafilisest koostisest lähtudes iseloomustab lössi kvartsi (25–90 %), karbonaatide (5–60 %), päevakivide, vilkude ja mitmesuguste soolade sisaldus. Teataval hulgal esineb lössis ka kipsi. Saviosakeste, peamiselt kaoliniidisisaldus ei ületa tavaliselt 10–12 %. Sageli on lössi poorid täitunud sekundaarsete mineraalidega.
5. Peaaegu täielik kihilisuse puudumine.
6. Väike mahumass (1,2–1,6 g/cm³).
7. Kuivas olekus püsivad lössid hästi vertikaalsete nõlvadena ja isegi võlvadena. Lösside kandevõime on kuivas olekus samuti küllalt hea, sest survetugevus ületab sageli 40–50 N/cm².
8. Veega kokku puutudes lössid märguvad, leonduvad ja vedelduvad kergesti. Vee kapillaartõusu kõrgus ulatub 3–4 m-ni, kapillaartõusu kiirus aga 1 cm/sek.

Ümbersestunud lössipinnaseid nimetatakse lihtsalt lössitaolisteks kivimiteks.

Niiskumisel kaotavad lössid ja lössitaolised kivimid kandvad omadused ja sellega kaasnevad sageli niiskuvajumised.

Lõsside ja lõssitaoliste kivimite niiskusvajumise all tuntakse nende omadust niiskumisel kiiresti ja ebaühtlaselt deformeeruda, s.o. vajuda. Mõnikord on selleks vaja täiendavat rõhku, puhuti piisab juba kivimi enese raskusest. Niiskuvajumise välisteks tunnusteks on lehitrite jms. tekkimine, mis põhjustavad omakorda neile rajatud ehituste deformeermise.

Uurimised on näidanud, et kõik lõssid ja lõssitaolised kivimid ei vaju. Peale selle vajuvad ühed kivimid kohe pärast niiskumist, teised aga alguses paisuvad ja alles seejärel vajuvad.

Lõsside niiskusvajumise põhjused on küllaltki keerulised. Esialgu oletati, et vajumise peamiseks põhjuseks on lõssides esinevate kergesti lahustuvate ühendite, nagu CaCO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ jt. väljalahustumine ja peente mittelahustuvate osakeste väljauhtumine vee poolt. Hilisemad uurimised on aga näidanud, et nimetatud põhjustel on vaid teisejärguline tähtsus. Peamiseks vajumise põhjuseks on lõsside ja lõssitaoliste kivimite niiskumisel esinev poorsuse vähenemine. Looduslikes tingimustes või ehituste all võib vesi lõssi sattuda sademetest, maapealsetest voolu- või seisuvetest, katkistest veetorudest jm.

Kui lõssi või lõssitaoliste kivimite üksikosakesed on seotud mõne tsementeeriva ainega, võib poorsuse vähenemine, järelikult ka tihenemine toimuda alles pärast selle väljalahustumist. Tsemendi puudumisel hakkavad üksikosakesed üksteise suhtes nihkuma ja saavutavad lõpuks kõige tihedama asendi. Vajumise kiirus sõltub antud tingimustel peamiselt tsementeeriva aine lahustumise kiirusest. Vastupidava tsemendi puhul toimub vajumine pikemaajaliselt.

Lõsside ja lõssitaoliste kivimite niiskusvajumine toimub suhteliselt aeglaselt ka siis, kui sideme üksikosakeste vahel moodustavad kolloidosakesed. Vee juurde tulekul lagunevad kolloidid järk-järgult ja vastavalt sellele väheneb üksikosakeste nihkumise tõttu ka poorsus. Mõnikord võib aga juhtuda, et niiskumisel kolloidid esmalt tursuvad ja alles siis lagunevad. Sellega ongi seletatav, miks mõnikord lõssid ja lõssitaolised kivimid niiskumisel esialgu paisuvad ja alles siis vajuvad.

Kui kivimiosakeste vahel märkimisväärne side puudub, toimub vajumine kõige kiiremini. Niiskumisel tekivad üksikosa-keste ümber veekilekesed, mis järk-järgult paksenevad ja hak-
kavad töötama kiiludena. Koos sellega väheneb järsult ka si-
sehõõrdumine, mis ongi oluliseks eelduseks kiviosakeste li-
bisemisele üksteise suhtes tihedamasse asendisse.

Pärast niiskuvajumise esimesi teaduslikke uurimisi sel-
gus, et lõssi levikualadel esineb taolisi nähtusi õige rohke-
sti. Teatavasti levivad lõssid laialdaselt Nõukogude Liidu
Euroopa-osas lõunapoolsetel aladel, Kaukaasias, Lõuna-Siberis,
Kesk-Aasias ja Kasahstanis. Lõssilasundite paksus ulatub siin
30 - 40 m ja isegi üle selle. Eriti ulatuslik on lõssi levik
Hiinas, kus lasundite paksus on veelgi suurem.

Lõssi ja lõssitaoliste kivimite insener-geoloogilisel
uurimisel osutub üheks põhiliseks ülesandeks niiskuvajumise
võimaluse ja ulatuse määramine. Selleks tuleb lõssides või
lõssitaolistes setetes rajada šurfid kas mittevajuva kihtide-
kompleksini või pinnasevee tasemeni ja võtta sügavuse suunas
1-2 m järele laboratoorseks katsetamiseks monoliitsed proo-
vikehad servade mõõtmatega 10-15 cm. Loodusliku niiskuse säi-
litamiseks parafineeritakse proovikehad. Niiskuvajumise või-
maluste selgitamiseks korraldatakse kompressioonikatseted, mil
proovikehale mõjuv koormus σ_h vastab kivimi konkreetsele
koormusele loodusliku lasumise tingimustes. σ_h arvutatakse
valemist

$$\sigma_h = 9,8 \cdot \delta \cdot h,$$

kus h on võetud proovikeha looduslik lasumissügavus (ehituse
alusest arvatuna),

δ - proovikeha mahumass maksimaalsel võimalikul niiskuse-
sisaldusel.

Rakendades eespool arvatatud koormust, määratakse esi-
algu proovikeha vajumine (S_1) selle loodusliku niiskuse tingi-
mustes. Seejärel niisutatakse proovikeha kuni täieliku kül-
lastumiseni veega ja määratakse täiendav deformeerumine (S_2).

Tähistame proovikeha esialgse mahu (kuni koormamiseni)
 A_0 -ga, pärast koormamist loodusliku niiskuse tingimustes A_1 -ga
ja veega täieliku küllastumise tingimustes A_2 -ga. Kivimi va-

juvust võibki iseloomustada näitaja R abil, mis arvutatakse valemist

$$R = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100 \%$$

Kui kompressioonikatsete käigus jääb proovikeha ristlõige konstantseks, võib mahuliste deformatsioonide asemel kasutada ka lineaarseid. Tähistades proovikeha esialgse kõrguse h_0 -ga saame

$$A_1 = (h_0 - S_1) \omega$$

ja

$$A_2 = (h_0 - S_1 - S_2) \omega,$$

millest

$$R = \frac{(h_0 - S_1)\omega - (h_0 - S_1 - S_2)\omega}{(h_0 - S_1)\omega} = \frac{S_2}{h_0 - S_1} \cdot 100 \%$$

Tugevasti vajuda võivatel lõssidel ja lõssitaolistel kivimitel $R = 10 - 12 \%$.

Maapinna vajumise arvutamiseks tuleb määrata R keskmine väärtus kogu uuritava ala ja lõssilasundi paksuse kohta ning korrutada see vajuda võiva kompleksi paksusega. Kui viimane on väljendatud meetrites ja R protsentides, saadakse vajumine sentimeetrites.

Erineva paksusega ($h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$) ja erineva R väärtusega ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$) kihtidest koosneva lõssilasundi puhul kasutatakse R keskmise väärtuse arvutamiseks valemist

$$R_{\text{keskm.}} = \frac{R_1 h_1 + R_2 h_2 + R_3 h_3 + \dots + R_n h_n}{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}$$

Summaarne sissevajumine arvutatakse aga valemist

$$S = R_{\text{keskm.}} (h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n).$$

Kui ehituse alla jäävate lõssilasundite summaarne vajumine on alla 5 cm, peetakse niisugust lõssi mittevajuvaks. Ületab aga summaarne vajumine 5 cm piiri, loetakse lõssi vajuvaks. Tegelik vajumise määramiseks korraldatakse nüüd täiendavad kompressioonikatsed, mil proovikehale mõjuv koormus σ_h vastab kivimi konkreetsele tööolukorrale ehituse

all looduses. G_h arvutatakse käesoleval juhul valemiga

$$G_h = 9,8 \delta \cdot h + G_0,$$

kus G_0 on ehituse poolt avaldatav rõhk.

Vee- ja kanalisatsioonitorude paigaldamiseks rajatavate kraavide puhul $G_0 = 0$, mistõttu $G_h = 9,8 \cdot \delta \cdot h$.

Lõssi niiskusvajumist vältivad abinõud jaotatakse kahte rühma:

- 1) abinõud ehituste aluse märgumise vältimiseks;
- 2) abinõud ehituste alla jäävate lõsside ja lõssitaoliste kivimite kandvate omaduste parandamiseks.

Ehituste aluse märgumist hoitakse ära järgmisel viisil:

a) ehituse territoorium planeeritakse ja pinnaveed juhitakse ära. Taimkate kõrvaldatakse, maa küntakse üles ja trambitakse kõvasti kinni. Madalamate kohtade täitematerjal peab olema vettpidav ja see tihendatakse täitmise käigus. Planeerimise peab lõpetama enne vundamendi ehitamisele asumist. Kõik järgnevad tööd peab aga tegema nii, et hoone alla vett ei satuks;

b) likvideeritakse veekaod torustikest, kraavidest, basseinidest jne. Samuti välditakse igasuguste tööstusvete juhtimist vett läbilaskvatesse kivimitesse, kust see võib lõpuks ehituse alla imbuda. Selles suhtes on eriti ohtlikud rohkesti vett vajavate tehnoloogiliste protsessidega ettevõtted. Ohu likvideerimiseks ehitatakse nad juba vajunud aladele või ka sinna, kus suuremaid vajumisi ei ole oodata.

Kivimite kandevõime parandamiseks kasutatavatest abinõudest mainiksime esmajoones ehituste alla jäävate kivimite tihendamist. Selleks võib kasutada märgamist või kinnitampimist. Esimesel juhul kutsutakse vajumine ja seega ka tihene mine esile niisutamisega. Ehitamisele võib asuda alles pärast vajumise stabiiliseerumist. Mõnikord võib kivimit pärast vajumist tihendada veel kinnitampimisega. Tavaliselt kasutatakse niisutamiseks süvendeid, kust vesi ühtlaselt kivimitesse valgub. Teisel juhul rajatakse ehituse alusesse puuraugud, täidetakse need sama lõssilise pinnasega ja tihendatakse kinnitampimisega 50 - 70 cm paksauste kihtide kaupa. Niiviisi saadakse üsna tugev kivimi kolonn. Aluse tugevus saavutatakse siin nii täitematerjali kui ka puuraukude seinte suurenenud tihedusega.

Peale kirjeldatud viiside on lõsside ja lõssitaoliste kivimite tihendamiseks kasutatud ka kuuma suruõhku (kuni 2 MN/m^2), mis puuraukudesse loodud ja alumises otsas poole meetri pikkuselt perforeeritud torude kaudu settesse surutakse. Toru ümbruses tekib põletatud kivimite tsoon, mis ei lagune vees isegi mõne kuu vältel. See meetod on aga kallis ja veel vähe uuritud.

Väga häid tulemusi annab lõsside ja lõssitaoliste kivimite kandevõime parandamisel keemiline kõvendamine. Praktikas on laiemat kasutamist leidnud silikatiseerimine. Kahe lahusega silikatiseerimisel surutakse torudesüsteemi kaudu kivimisse esialgu vesiklaas ja seejärel kaltsiumkloriidi lahus. Nende vahel toimuva keemilise reaktsiooni tagajärjel tekib SiO_2 , mis seob lõssiosakesed üsna tugevasti. Niiviisi kõvendatud kivimi survetugevus tõuseb $150\text{--}600 \text{ N/cm}^2$. Samal ajal suureneb õige oluliselt ka veepidavus. Seda meetodit kasutatakse juhul, kui filtratsioonimoodul on $2\text{--}80 \text{ m/ööp}$. Ühe puuraugu mõjuraadius ulatub siis $0,4\text{--}0,7 \text{ m}$. Ühe lahusega silikatiseerimisel surutakse kivimisse ainult vesiklaasi lahus happe lisandiga. Selle tagajärjel muutub kivim küll vettpidavaks, kuid tugevus ei suurene kuigivõrd. Ühe lahusega silikatiseerimist kasutatakse juhul, kui filtratsioonimoodul ei lange alla 1 m/ööp .

V. KIVIMITE PAISUMINE

Nagu näitavad vaatlused, toimub kivimitele avalduva rõhu vähenemisel nende mahu suurenemine.

Kaljustel kivimitel toimub mahu suurenemine elastsete deformatsioonide arvel ega ületa rõhu vähenemisel $20\text{--}30 \text{ N/cm}^2$ protsendi sajandikosasid kivimi esialgsest mahust. Need taastuvad deformatsioonid ei sõltu praktiliselt välistingimustest ega kivimi kokkupuutest veega.

Savikate kivimite mahu suurenemine on aga samades tingimustes märksa suurem ja võib ulatuda 10% -ni. Eriti intensiivselt kasvab see näitaja, kui savidel on niiskumise võimalus. Seejuures ei ole rõhu vähenemisel enam erilist tähtsust.

Kaljuste ja savikate kivimite mahu suurenemise erinevus on tingitud sellest, et viimaste maht ei suurene mitte üksnes elastsete deformatsioonide, vaid ka veekilekeste paksenemisest tõttu kivimiosakeste ümber. Nimetatud asjaolul on savikate kivimite mahu suurenemisel just peamine tähtsus.

Savikate kivimite mahu suurenemine ehk paisumine sõltub savide koostisest, kokkupuutest veega, kivimi esialgsest tihedusest ja välisrõhust.

Savide esinemisel ehituste alustes tuleb kõigi vahenditega vältida nende loodusliku struktuuri rikkumist. Eriti ohtlik on kuivamine, kuna selle tagajärjel tekivad savidesse lõhed ja praod, mis igati soodustavad vee pääsemist kivimisse. Niiskumisele järgneb muidugi paisumine ja kandvate omaduste halvenemine.

Savikaid kivimeid võib ehituste alustena kasutada vaid siis, kui enne ehitamise algust on täielikult välditud nende kuivamine. Seepärast võib vundamendikraavi süvendada lõpliku tasemeni alles siis, kui vundamendi ladumiseks on kõik vajalik ehitusmaterjal olemas ja tööga saab kohe alustada. Vundamendi süvendi põhjas olevat savi ei tohi kuival aastaajal isegi üheks ööpäevaks avatuks jätta.

Savikate kivimite paisumisel tekib neid ümbritsevale keskkonnale täiendav rõhk, mida tuntakse paisumISRõhuna. PaisumISRõhk kasvab pikkamööda ja saavutab maksimumi alles mõnekümne päeva pärast. Enamikul savidel ei ületa paisumISRõhk $15 - 20 \text{ N/cm}^2$. Ainult erandjuhtudel võib see ulatuda $120 - 150 \text{ N/cm}^2$. Mida väiksem on paisumISRõhuga võrreldes välisrõhk, seda suurem on muudel võrdsetel tingimustel paisumine.

Looduslikes tingimustes avaldub savide paisumine maapinna kerkimises. Sügavuse suunas avalduvad paisumisnähtused teoreetiliselt ainult seni, kuni paisumISRõhk muutub võrdseks antud sügavuses esineva kivimite loodusliku rõhuga.

Ehituste alla jäänud savide paisumise korral võib esineda ehituste ülestõstmist ainult juhul, kui paisumISRõhk ületab kivimi enese ja ehituse poolt tingitud rõhu.

Kuna savide niiskumine ei toimu kogu ehituse ulatuses ühtlaselt, ei ole ka kerked ehituse perimeetri ulatuses ühtlased. See ongi seintes lõhede ja pragude tekkimise peamiseks põhjuseks. Aja jooksul aga ebaühtlused mõnevõrra tasanduvad.

Paisumise laboratoorsel uurimisel kasutatakse lõsside vajumise selgitamiseks konstrueeritud seadet. Loodusliku struktuuri ja niiskusega proovikeha koormatakse ka siin samavõrra kui vaadeldava konkreetse ehituse all. Pärast esialgset vajumist niisutatakse proovikeha veega ning jälgitakse sellest tingitud paisumist. Katse lõpetatakse alles siis, kui paisumine on juba stabiliseerunud. Selleks kulub sageli üle kuu. Saadud andmete alusel arvutatakse paisumise näitaja R_p järgmiselt:

$$R_p = \frac{S_2}{h_0 - S_1} \cdot 100 \%,$$

kus h_0 on proovikeha esialgne kõrgus,

S_1 - vajumine loodusliku niiskuse tingimustes,

S_2 - maksimaalne paisumine.

R_p võib ulatuda 15-20 %.

Kasutades paisumise näitaja keskmist väärtust ja paisuda võiva savidekompleksi üldist paksust, arvutatakse oodatav ehituse tõusmine samal viisil kui vajumine lõsside juures.

VI. KARST

Karst on omapärane geoloogiline nähtus, mille all mõistetakse kas põhja- või pinnavete poolt põhjustatud teatud tüüpi kivimite lahustamisprotsessi, millega kaasneb omapäraste karstiõõnsuste ja -vormide tekkimine.

Karsti areng kulgeb kõige intensiivsemalt hästi lahustuvates kivimites, nagu kivisool, kips, anhüdriit, lubjakivi, dolomiit ja mergel. Paremini lahustub neist kivisool, kuna karbonaatsed kivimid on märksa vastupidavamad. Peale selle sõltub karsti areng vee liikumise intensiivsusest. Seisva vee puhul karst ei arene. Ka vees esinevad keemilised ühendid ja gaasid avaldavad tavaliselt soodsat mõju. Kuna mainitud lahustuvatest kivimitest on rohkem levinud lubjakivid ja dolomiidid, on ka karstinähtusi kõige üksikasjalikumalt uuritud just nende puhul.

Karsti välised vormid on väga iseloomulikud ja avalduvad karrides, ponoorides, lehtrites, maapinna sissevajumistes, jõgede kadumises maa alla jne.

Karsti nähtavad välised vormid ei teki järsku, vaid kivimite pikemaajalise lahustumisprotsessi tagajärjel. Algul tekivad kivimites olevate lõhede ja pragude kohale sademete mõjul karsti algelised vormid karrid, mis meenutavad vaotao-lisi süvendeid sügavusega mõnest sentimeetrist 1-2 meetrini. Karridega läbilõigatud maa-ala nimetatakse aga karriväljaks.

Karsti areng ei lõpe kaugeltki karride ja karriväljade tekkimisega. Erinevasuunaliste lõhede lõikumiskohtades intensivistub kivimi lahustumisprotsess veelgi ning tekivad leht-ritaolised moodustised. Lehtrite ühinemisel tekib juba suurem auk. Kui lahustumine tungib sügavamale, võivad aja jooksul välja kujuneda ulatuslikud vertikaalsed käigud, mida nimetatakse ponoorideks. Ponooride tekkimisega hakkab karsti areng üha enam kanduma maa alla, kus vesi kasutab esialgu liikumisteena kivimites esinevaid lõhesid ja pragusid. Lahustumise tagajärjel need laienevad ja niiviisi tekivadki lõpuks väga mitmesuguse kuju ja asendiga maa-alused käigud ja käikude süsteemid. Edaspidi laienedes võivad need muutuda väga mitmesuguse kuju ja suurusega koobasteks ja labürintideks, mis paiknevad isegi mitme korrusena. Sageli voolavad niisugustes koobastes ja labürintides maa-alused jõed ja esinevad maa-alused järved. Koobaste ja käikude mitmekesisus on tavaliselt tingitud kivimites esinevast keerulisest lõhede ja pragude süsteemist ja väga võimalik, et ka koostise ebaühtlusest.

Suuremate põhjavee vooluste puhul laienevad käigud ja koopad mitte ainult lahustumise, vaid ka erosiooni tagajärjel. Kuid karstiõõnsuste pideva laienemise ja suurenemise tõttu varisevad nende laed sisse ja tekivad varisemislehtrid, mis ulatuvad isegi maapinnale. Nende kuju ja suurus võib olla väga mitmesugune. Sageli on nad järskude nõlvadega ja meenutavad tõelist lehtrit, vahel aga laugete nõlvadega ja tuletavad meelde tassi või kaussi. Enamiku lehtrite läbimõõt on 1-50 m. Vaid üksikutel juhtudel on läbimõõt isegi 100 m ja üle selle. Sügavus ei ületa tavaliselt 15-20 m. Karsti ulatusliku levikuga rajoonides võivad lehtrid täita kogu maa-ala. Näiteks Uraali läänenõlval Kizeli söebasseinis esineb 30-120 karsti-lehtrit 1 km²-l. Karsti edasise arenemise käigus kujunevad kas paljude karstilehtrite laienemisel ja ühinemisel või karstikäikude ja koobaste sissevarisemisel suuremal maa-alal oma

pärased karstikatlad ja karstiväljad. Sageli on nende tekkimine seotud kivimite tektooniliste häiretega.

Paljudel juhtudel tekivad karstikäikude ja -koobaste lael ja põrandal tilkuvast veest settinud, CaCO_3 -st koosnevad maalilised jääpurikataolised stalaktiidid (ripuvad laes) ja stalagmiidid (kasvavad põrandalt eelmistele vastu).

Karsti areng ja karstivormide tekkimine sõltub suurel määral kihtide asetusest. Lahustuvate kihtide horisontaalse lasumise korral kandub karsti areng kogu kihi levikualale. Vertikaalsel ja kallakul lasumisel areneb karst ainult lahustuvate kivimite paljundumisalal. Kuid kõigil juhtudel määravad karstinähtuste iseloomu ja arenemise põhjavete voolu suund ja intensiivsus ning kohaliku erosioonibaasi asetuse. Mida aktiivsem on veevahetus, seda kiiremini areneb karst. Kohaliku erosioonibaasi alanemisel intensiivistub tavaliselt karstivete voolus, mistõttu karst hakkab samuti kiiremini arenema ja tungib võimaluse korral karstuvas massiivis üha sügavamale. Kui erosioonibaasi alanemine on küllalt suur ning on toimunud korduvalt, esinevad ka karstikäigud ja -koobad mitmekorruseliselt, kusjuures madalam korrustest vastab ka madalamale erosioonibaasi asendile.

Nimetatud tegurite kõrval avaldab karsti arenemisele väga suurt mõju kliima, kuna sellest oleneb vaadeldava maa-kohta sademete hulk ja jaotumine, murenemise iseloom ja kulgemise intensiivsus ning maakoore ülemiste kihtide temperatuurirežiim. Sõltuvalt sellest, kas lumikatet esineb või mitte, sõltuvalt maapinna külmumisest, sademete jaotumisest ja intensiivsusest muutuvad infiltratsioonitingimused ja järelikult ka veevahetuse intensiivsus. Kõigist nendest asjaoludest tingituna võib karst nii ruumis kui ajas areneda ka ühtlaselt või ebaühtlaselt.

Mainimata ei saa jätta ka taimkatte osatähtsust karsti arenemisel. Taimkate mõjutab oluliselt sademete vete voolamise ja infiltratsiooni tingimusi, lume sulamise intensiivsust jne. Näiteks metsaaladel sulab lumi 1,5-2 korda aeglasemalt kui väljadel. Tiheda taimkatte aladel ei kulge ka karsti areng kuigi kiiresti. Peale selle jäävad siin karsti nähtavad välised vormid tagaplaanile, kuna karstumisprotsess

kulgeb peamiselt maa all. Kidura taimkattega aladel on olukord eespool kirjeldatule hoopis vastupidine.

Maailma suurimaks karstikoobaste süsteemiks võib pida da Ameerika Ühendriikides esinevat Mammutikoobast kavernoossetes lubjakivides. Siin esineb 650 km^2 suurusel maa-alal kuni 60 000 karstilehtrit ja 200 koobast, kusjuures koopaid ühendavate käikude pikkus ulatub 250 km. Nõukogude Liidus on tuntuimaks Kunguri karstikoobastik samanimelise linna lähedal. Karst areneb siin kipsis. Käikude ulatus on 4,6 km. Koobastikus esineb üle 30 mitmesuguse suurusega "järve". Suurima pindala on umbes 200 m^2 ja sügavus 4–6 m.

Karstinahtused väljenduvad küllalt ilmekalt ka Põhja-Eestis, kus karst on seotud karbonaatsete kivimitega ja nendes esinevate tektooniliste lõhedega. Üldse esineb Eestis karstivorme rohkem kui 160 kohas. Maapinnal väljenduvad need väiksemate lehtrite näol (lähimõõt kuni mõnikümmend ja sügavus kuni mõni meeter). Real juhtudel esineb väiksemate jõgede kadumist maa alla, kus nad voolavad mõne kilomeetri ulatuses ja ilmuvad siis rohkearvuliste allikatena jälle maapinnale (Kostivere, Uhaku, Kuivajõe jt.). Piki niisuguseid vooluseid esinevad maa peal arvukad karstilehtrid. Maa-alused karstivormid on esindatud vertikaalsete ja horisontaalsete käikudega. Viimaste laius on 10–15 m ja kõrgus kuni 1,5 m.

Möödunud sajandil äratasid uurijate tähelepanu peamiselt karsti välised vormid, kuna karsti hüdrograafiat seevastu uuriti vähe. Põhjuseks oli teadmiste vähesus põhjavetest ja maa-aluste karstikanalite keerulisus. Erilist huvi äratas pinnavete sisseimbumine maa-alustesse õõnsustesse. Paljud arvasid, et tegelik karst esineb ainult seal, kus kogu hüdrograafiline võrk asetseb maa all. Mõned teadlased jõudsid isegi järeldusele, et karstimaassiivides esinevad üksikud isoleeritud voolused ja vesi voolab omaette isoleeritud käikudes ja koobastes.

Viimase aja uurimused lubavad järeldada, et karstimaassiivid kujutavad endast keerulist ja kompleksset vett sisaldavat süsteemi sügavuses vaibuvate käikude ja koobastega. Isoleeritud vooluste kõrval esineb karstimaassiivis ka ühine põhjavete horisont, mis ühendab kõiki koopaid ja käike, lõhesid ja pragusid. Keerulise tektoonikaga rajoonides ei toimu mitte ainult vee liikumine karsti arenemise protsessis moodustu-

nud kärke ja koopaid mooda, vaid karstiõõnsuste kaudu võivad tõusta maapinnale ka sügavamal lasuvad arteesia veed. Samal ajal võivad aga tektoonilisi lõhesid mooda maapinnale tõusvad arteesia veed põhjustada lahustuvates kivimites karsti arenemist. Tüüpiliseks näiteks on siin Tserik-Koli järv ja selle ümbrus Naltšiki lähedal Põhja-Kaukaasias. Järv on mõõtmelt väike, kuid sügav ja kujutab endast suure deebiti ja püsiva temperatuuriga arteesia vete väljumiskohta maapinnale.

Selliseid basseinitaolisi vee väljumiskohti teatakse ka teistes karstirajoonides (Ufaa, Simferopol jne.).

Karsti väliste vormide alusel eraldatakse katmata ja kaetud karsti. Esimene neist on omane Vahemere-äärsetele maadele ja selle arengus etendab suurt tähtsust sademete iseloom. Sademed esinevad siin ägedate valangutena, mis haaravad kaasa ja viivad ära kõik pudedad setted. Seepärast on karstuval alal maapind alati paljas ja atmosfääriliste faktorite mõju all. Karsti areng kulgeb siin maksimaalse intensiivsusega ja näha võib kõiki karsti maspealseid ja mas-aluseid vorme - karre ja karrivälju, ponoores, varisemisolehtreid, jõgede kadumist maa alla, koopaid, kärke jne. Nõukogude Liidus esineb seda tüüpi karsti Krimmis ja Kaukaasias. Teine tüüp on iseloomulik mõõduka ja niiske kliimaga rajoonidele ning esineb Nõukogude Liidu Euroopa-osas, Uraalis ja Siberis. Sellesse tüüpi kuulub ka Eesti karst. Sademed esinevad neil aladel võrdlemisi ühtlaselt ja langevad alla rahulikult. Pudedad setted jäävad oma tekkimiskohale ja karstuvad kivimid on pidevalt kaitstud atmosfääriliste faktorite otsese mõju eest. Samuti on karstuvad kivimid enamikul juhtudel kaetud küllalt paksude mittelahustuvate kivimitega. Seepärast arenebki karst sügaval teiste kivimite all ja paljusid selle väljendusvorme ei teki. Puuduvad näiteks karrid ja karriväljad. Maa peal nähtavatest vormidest on levinumad varisemisolehtrid.

Ehitustegevuses ja kaevanduste tööpraktikas on karst äärmiselt ebasoodne nähtus. Näiteks kui raudteede ehitamisel ei arvestata karstinähtust, võib see põhjustada raudteetammi ootamatuid deformatsioone ja järelikult ka õnnetusi.

Hüdrotehnilistel ehitustel võivad karstiõõnsused põhjustada veekadusid veehoidlatest. Niisuguseid juhusid on esinenud näiteks Hispaanias, Prantsusmaal ja Itaalias.

Tööstus- ja tsiviilehituse praktikas põhjustavad karstiõõnsused ehitiste ootamatuid deformatsioone ja võivad olla nende purunemise põhjuseks.

Maavarade kaevandamisel võivad kaeveõõnsustega lõikuvad karstikälgud ja -koopad või nendega seotud lõhed põhjustada ootamatuid ja suuri vee juurdevoolusid ning esile kutsuda kaeveõõnsuste või isegi kogu kaevanduse uputuse. Nimetatud liiki nähtusi esineb ka Eesti NSV põlevkivikaevandustes.

Karstirajoonides on insenergeoloogilistel uurimistöödel peamiseks ülesandeks selgitada karsti arengu olukord. Saadud andmete alusel võib eraldada alad, kus karst ei tekita raskusi ehitiste püstitamisel ja nende eksplateerimisel. Ohtlike alade jaoks töötatakse aga välja abinõud, mida on vaja kasutusele võtta kas enne ehitamise alustamist või ehituse eksploatatsiooni ajal. Nimetame siin neist ainult olulisi.

1. Püütakse tõkestada pinna- ja põhjavee juurdevoolu lahustuvatele kivimitele pealmaavooluste reguleerimise ja kuivenduskraavide rajamise teel.
2. Karstiõõnsused täidetakse savika materjaliga ja laekivimid varistatakse. Seda moodust kasutatakse sageli raudteede ja maanteede rajamisel, torustike mahapanemisel jne.
3. Ehitise alla jäävaid kivimeid võib tugevdada tsemenditeerimisega. Selleks surutakse puuraukude kaudu kivimites olevatesse lõhedesse ja karstiõõnsustesse tsemendilahust. Sellega tõkestatakse ka põhjavete tsirkulatsioon.
4. Ehitise alla jäävaid kivimeid võib maa-aluse vettpidava tõkke moodustamiseks bituumendada.
5. Karsti arenemise lõpetamiseks kuivatatakse karstunud kivimid. Väljapumbatud vee peab juhtima ohutusse kohta ja vältima edaspidi selle sattumist karstunud kivimitesse.

VII. SUFOSIOON

Sufosiooniks nimetatakse kivimites filtreeruva vooluse poolt kivimi väiksemate mineraalsete koostisosakeste väljahuhtumist (mehhaaniline sufosioon) või vees lahustuvate ainete (tsemendi, koostisosade) väljakandmist lahuseks või la-

hustusmisprotsessis tekkiva tükilise materjalina (keemiline sufosioon). Sufosiooni mõiste võttis esimesena kasutusele A. P. Pavlov (1898).

Looduslikes tingimustes esineb mehhaanilist sufosiooni võrdlemisi harva. Nii võib näiteks mehhaaniline sufosioon tekkida jõe kaldaalas peale suurveest tingitud kõrge veetaseme järsku langemist. Veetaseme alanemine veehorisondis toimub aga võrreldes jõega tunduvalt aeglasemalt, mille tagajärjel moodustub väga suure langusega pinnasevee depressioonikõver ja suur languse poole suunatud hüdrodünaamiline surve. Kui filtreeruva vooluse hüdrauliline gradient saavutab küllalt märgatava suuruse, algabki kivimi tahkete, väikeste mõõtmetega koostisosakeste väljakandmine. Mida suurem on hüdrauliline gradient, seda suuremaid osakesi suudab vesi ära kanda.

Väiksemate koostisosakeste ärakandmisel moodustuvad kivimites tühikud, mis omakorda võimaldavad vee voolukiiruse suurenemist ja veelgi suuremate osakeste ärakandmist. Sõltuvalt kivimite struktuurist ja koostisest on moodustuvad tühikud sageli üsna suured ja sellistele aladele ehitatud looned võivad mõnikord isegi väga palju ja ebaühtlaselt vajuda. Sufosiooni edaspidine arenemine võib põhjustada isegi hoone purunemise. Eriti soodsad on mehhaanilise sufosiooni tekkimise tingimused liivades ja saviliivades.

Sufosiooniga seletub ka kuivas kliimas (näiteks Kesk-Aasias) suurte tühikute tekkimine savikates ja lössitaolistes kivimites. Kirjeldatud nähtust tuntakse aga rohkem savi- ja lössikarsti nime all. Lössidesse tungib vesi tavaliselt vertikaalsete pooride kaudu. Kui on olemas soodsad tingimused suurte filtratsioonikiiruste tekkimiseks (kui lähedal on mõni looduslik või kunstlik negatiivne reljeefivorm), võibki toimuda intensiivne lösside väljauhtumine ja tühikute tekkimine. Ka puuduvad savikates kivimites suuremad üksteisega seotud poorid, mistõttu vesi voolab peamiselt mööda lõhesid ja pragusid.

Eespool toodule tuginedes järeldub, et sufosioon võib tekkida

- 1) kui kivimitel on teatav kindel koostis ja struktuur;
- 2) kui kivimites on küllaldaselt vee voolamiseks vajalikke poore, lõhesid ja tühikuid;

3) kui veevoolusel on võrdlemisi suur kiirus.

Kuigi sufosiooni tekkimise ja arenemise tingimused on küllaltki arusaadavad, puuduvad veel osaliselt seda protsessi iseloomustavad arvulised näitajad. See on tingitud asjaolust, et sufosiooni pole kuigi põhjalikult uuritud. Seepärast piirdume ka siin ainult mõningate näitajate esitamisega.

Vaatluste ja mitmesuguste katsete varal on selgunud, et sufosiooni tekkimiseks ja arenemiseks on soodsaimad tingimused, juhul kui kivim koosneb peaaesjalikult kahest domineerivast fraktsioonist, mille diameetrite suhe on suurem kui 20.

Fraktsioonide mõõtmete suurele erinevusele vaatamata on väiksemate osakeste väljakandmine võimalik ainult siis, kui voolava vee jõud ületab kivimiosakeste kaalu. Vooluse hüdrodünaamiline jõud on aga võrdne hüdraulilise gradiendi ja vee erikaalu korrutisega. Kui viimast vaadelda konstantse suurusena, siis on hüdrodünaamiline jõud võrdeline hüdraulilise gradiendiga. Järelikult taandub sufosiooni võimaluste selgitamine selleks vajaliku nn. kriitilise hüdraulilise gradiendi (I_{kr}) leidmisele. J. Zamarin soovib selle arvutamiseks valem

$$I_{kr} = \frac{\gamma_v - \gamma_v}{10000} (1 - n) + 0,5 n,$$

kus γ_v on väljakantavate kivimiosakeste erikaal $\frac{N}{m^3}$,

γ_v - vee erikaal $\frac{N}{m^3}$,

n - kivimi poorsus ühiku osades.

Kui kivimit moodustavate üksikosakeste keskmine diameeter (d_k) jääb 0,25 - 1,0 mm piiridesse, on V. Pavlovski arvates kriitiline hüdrauliline gradient võrdne keskmise diameetri väärtusega ($I_{kr} = d_k$).

See lihtsustus kriitilise hüdraulilise gradiendi leidmiseks on tehtud laminaarse voolamise tingimustest lähtudes. Kuid laminaarsel voolamisel ummistavad väljakantavad kivimosakesed peagi poorid, mistõttu sufosioon hakkab järk-järgult raugema. Järelikult on sufosiooni pidevaks kulgemiseks vaja vee turbulentset voolamist, mis liivsetes horisontides osutub võimalikuks ainult siis, kui hüdrauliline gradient $I > 5$.

Hüdraulilise gradiendi asemel võib laminaarset ja turbulentset voolamist eraldava piiri iseloomustamiseks kasutada

ka nn. kriitilise filtratsioonikiiruse mõistet, mille arvutamiseks Pavlovski soovitab valemite

$$V_{kr} = 0,002(0,75 n + 0,23) \frac{Re}{d_{ef}},$$

kus V_{kr} on kriitiline filtratsioonikiirus, mille ületamisel laminaarne voolamine muutub antud tingimustes turbulentseks,

n - kivimi poorsus ühiku osades,

d_{ef} - kiviosakeste efektiivdiameeter,

Re - Reynoldsi arv.

Valemite asemel võib kriitilise filtratsioonikiiruse määramiseks kasutada ka alljärgnevat tabelit, mis on koostatud arvukate katsetulemuste põhjal:

Väljakan- tavate kivi- miosakeste diameeter mm	5	3	1	0,8	0,5	0,1	0,08	0,05	0,03	0,01
Kriitiline filtratsioo- nikiirus cm/sec	22,1	17,3	9,85	8,83	6,97	3,05	2,79	2,19	1,74	0,98

Sufosiooni üheks eriliigiks on nn. kontaktsufosioon, mille puhul kahe kihi kontaktitsoonis ühe kihi väiksemad kivimiosakesed kantakse filtreeruva vooluse poolt välja läbi teise kihi pooride. See on võimalik ainult juhul, kui kihtide filtratsioonimoodulid erinevad rohkem kui kaks korda.

Sufosiooninähtuste tekkimise seisukohalt lähtudes on ehitamiseks ettenähtud rajoonide insenergeoloogilisel uurimisel vaja silmas pidada järgmist:

1) rajooni geomorfoloogilisi iseärasusi. Erilist tähelepanu peab osutama negatiivsetele reljeefivormidele, mille läheduses võivad tekkida soodsad tingimused põhjavete turbulentseks voolamiseks. Arvestama peab muidugi ka projekteeritavaid süvendeid;

2) ala geoloogilist ehitust, kuna see määrab ära kivimite leviku ja lasumise ning põhjavete voolamise võimalused;

3) maa-pealseid ja maa-aluseid vooluseid ning nende toimumise ja drenaaži tingimusi;

4) sufosiooniohtlike kivimite füüsikalis-mehhaanilisi omadusi (granulomeetrilist koostist, lõhederikkust, poorsust, filtratsioonimoodulit) ja mineraloogilist koostist;

5) kivimite murenemise iseloomu, murenemise sügavust ja kiirust.

Sufosiooni vältimiseks rakendatakse harilikult järgmisi profülaktilisi abinõusid.

1. Vältitakse pinna- ja põhjavete sattumist sufosiooniohtlikesse kivimitesse. Seda saavutatakse maaepalse vooluse reguleerimisega ja põhjavete drenaažiga.

2. Kui on võimalik, vähendatakse põhjavete voolukiirust.

3. Parandatakse kunstlikult sufosiooniohtlike kivimite füüsikalis-mehhaanilisi omadusi silikatiseerimise, tsementeerimise jms. teel.

VIII. UJUPINNASED

Ujupinnasteks nimetatakse tavaliselt peeneteralisi pudedaid kivimeid, mis võivad veega küllastunud olekus vedelduda, laiali valguda ja voolama hakata.

Ujupinnasteks võivad muutuda väga erinevad kivimid, alates liivsavidest ja lõpetades kruusadega. Kuid enamasti muutuvad ujupinnasteks väga peeneteralised, suure muda- ja tolmuosakeste sisaldusega liivad ja üldse pudedad mitteplastilised kivimid. Mõnel juhul kaotab ujupinnas pärast kuivatamist jäädavalt oma ujupinnase omadused, teisel juhul muutub aga kuivatatud kivim pärast järjekordset veega küllastumist uuesti ujupinnaseks.

Enne liikuma hakkamist ei ole ujupinnasteks muutuvatel kivimitel väliseid veega küllastumise tunnuseid märgata. Kuid liikumisel toimub osakeste ümberpaiknemine ja vesi valgub pinnale. See näitab, et ujupinnase olekusse läinud kivimi poorsus väheneb ja kogu vesi enam pooridesse ei mahu.

Kui ujupinnasteks muutuvad peeneteralised liivad, nimetatakse neid lihtsalt vesiliivadeks. Kivimi vesiliivsesse olekusse ülemineku põhjust arvesse võttes jaotatakse nad filtratsioonilisteks ehk ebavesiliivadeks ja päris- ehk tikso- troopseteks vesiliivadeks.

Filtratsioonilised vesiliivad lähevad voolavasse olekusse kivimi poorides filtreeruva vee teatava kindla hüdrodünaamilise rõhu mõjul, s.t., et vooluse hüdrauliline gradientpeab ületama nn. kriitilise piiri, mis on määratav katseliselt või arvutatakse valemist

$$I_{kr} = \frac{\gamma - \gamma_v}{10000} (1 - n),$$

kus γ on vesiliivse kivimi erikaal $\frac{N}{m^3}$;

γ_v - vee erikaal $\frac{N}{m^3}$,

n - vesiliivse kivimi poorsus ühiku osades.

V. Moštšanski andmetel on väikeseteralistele liivade puhul kriitilise hüdraulilise gradiendi väärtus 0,07 - 0,36 pihurides.

Filtratsioonilisteks vesiliivadeks võivad muutuda enamasti liivad ja teised jämedapurrulised kivimid, mis ei sisalda peendisperseid ja kolloidosakesi.

Filtratsiooniliste vesiliivade üleminekul voolavasse olekusse toimub nende sisehõõrdumise järsk vähenemine. Üheks oluliseks sisehõõrdumist vähendavaks teguriks on ka vibratsioonid, mille mõjul puhtad väikeseteralistele liivad võivad isegi ilma veeta üle minna omapärasesse vedelasse või voolavasse olekusse, moodustades nn. kuivi vesiliivu. Fibratsioonide puhul võivad nad analoogiliselt veega või vesiliivaga tungida piiretes olevate väikeste pragude kaudu süvenditesse. Isegi veega küllastunud filtratsioonilised vesiliivad võivad vibratsioonide mõjul minna voolavasse olekusse, ilma et hüdrauliline gradient ulatuks kriitilise piirini.

Filtratsiooniliste vesiliivade veeand on küllalt hea. Seepärast on nad tavaliste meetoditega kuivendatavad. Endise hüdrodünaamilise režiimi taastumisel taastuvad kiiresti ka vesiliivsed omadused.

Päris- ehk tiksotroopseid vesiliivu iseloomustab eelkõige kolloidsete-disperssete ja peendisperseste fraktsioonide esinemine kivimis. Mida rohkem on kivimis nimetatud fraktsioone, seda tiksotroopsem on kivim.

Tiksotroopsus avaldub kolloidsüsteemides ja seisneb selles, et väliste mõjutuste (löövide, raputuste, vibratsioonide

de, ultraheli jne.) tagajärjel kaotab süsteem oma struktuuri, mis taastub pärast välismõjutuste eemaldamist. Üldjuhul võib tiksotroopsust seletada sellega, et kolloidsüsteemison teatav hulk osakesi kolloidlahuse olukorras, kuid ülejäänud osa on juba koaguleerunud ja esineb geelina. Väliste mõjutuste tagajärjel viiakse koaguleerunud osa samuti kolloidlahuse olekusse.

Tiksotroopsed omadused ilmnevad tavaliselt ainult küllaldasel hulgal saviosakesi sisaldavatel kivimitel.

Tiksotroopsete nähtuste tekkimiseks ja avaldumiseks on tingimata vajalik vaba vee olemasolu ja pooride täielik täitumine veega.

Loodusliku niiskusega pärisvesiliivade uurimisel mikrokoobi abil selgub, et liivaosakestel puudub omavaheline kontakt ja nad hõljuvad üksteisest isoleeritult hüdrofiilsete kolloidide massis. Pärisvesiliivad on kõrge loodusliku niiskusega (21-48 %), suure poorsusega (41-58 %) ja kõrge maksimaalse molekulaarse veemahutavusega. Nende veeläbilaskvus on tühine - loodusliku niiskuse tingimustes ei ületa filtratsioonimoodul 0,1 - 0,01 m/ööp. Seepärast ei olegi pärisvesiliivade kuivendamine tavaliselt kasutatavate meetoditega võimalik. Rahuldavaid tulemusi annab üksnes vaakumfiltrite, elektridrenaaži jms. kasutamine. Kuivendamisel kolloidid vananevad ja pärisvesiliivu iseloomustavad tiksotroopsed omadused kas nõrgenevad või kaovad täiesti ja järgmisel niiskumisel enam ei taastu.

Pärisliivade tihedus võib nende ümberpaiknemisel muutuda väga suurtes piirides. Loodusliku struktuuriga pärisvesiliivade survetugevus ulatub 28-43 N/cm². Struktuuri rikkumisel väheneb aga survetugevus 80-180 korda.

Pärisvesiliivu ei ole seni Eestis kindlaks tehtud, kuigi nende esinemine pole võimatu. Küll aga on võrdlemisi sageli tavaliste liivade vedeldumise juhtumeid vastavate hüdrodünaamiliste tingimuste tekkimisel. Kõige rohkem on niisuguseid olukordi ette tulnud peeneteralistes mereliivades ja mandrijääjärvede liivades.

Liivade insenergeoloogilisel uurimisel tuleb võetud proovide katsetamise teel otsustada, kas pinnasel on vastavates tingimustes kalduvusi vesiliivadeks muutuda. Selleks

määratakse liivade filtratsioonimoodul, veeand, mahumass, tihedus, looduslik niiskusk, kriitiline hüdrauliline gradient, varikaldenurk, poorsus ja granulomeetriline koostis.

Filtratsioonilisi ja pärisvesiliivu võib kergesti eraldada ka järgmiste katsete varal:

1) kui paigutada vesiliivne kivim klaasnõusse, lõpeb filtratsioonilistel vesiliivadel vees hõljuvate osakeste settimine juba mõne minuti jooksul. Settinud mass on rangelt sorteerunud terasuuruse järgi: allpool asetsevad jämedamad, pealpool aga peenemad osakesed. Pärisliivadel võib settimine kesta nädalaid: allpool olev jämedateralistest fraktsioonidest koosnev sete kattub siin aegamööda peendisperseste saviosakestega. Kolloidosakesed jäävad veel pikemaks ajaks hõljuvasse olekusse, muutes vee sogaseks ja halvasti läbipaistvaks;

2) kui paigutada vesiliivne kivim tingimustesse, kus ta võib vabalt vett ära anda, toimub filtratsiooniliste vesiliivade veetustamine võrdlemisi kiiresti. Järele jääv õhkuiv mineraalne osa pole siin muud kui mitmesuguse terasuurusega liiv. Pärisvesiliivade veetustamine kulgeb aga erakordselt aeglaselt: see toimub pigem vee aurustumise kui vaba äravoolu teel. Kuivamisel kolloidosakesed koaguleeruvad ja annavad geeli. Kivim on enamasti hallikat värvi ja teataval määral tsementeerunud.

Võitlusvahendid vesiliivade ebasoodsa mõju vastu on väga mitmesugused ja sõltuvad ehitusgeoloogilistest tingimustest, ehituse tüübist, majanduslikest kaalutlustest jne. Kasutatakse peamiselt vaialuseid, vesiliivade kuivatamist, külmutamist, silikatiseerimist, elektrokeemilist kõvendamist ning süvendite ja kaeveõõnsuste rajamisel kessoone või spetsiaalset toetust.

Vaialuseid kasutatakse suuremate ja vastutusrikkamate ehituste puhul. Vesiliivadesse loodud vaiade töötamisel etendavad peamist osa hõrdejõud. Vaialuste kandevõime aja jooksul mõnevõrra väheneb, millega võivad kaasneda vajumised. Põhjuseks on asjaolu, et vaiade sisselöömisel liivade tihedus nende otseses läheduses esialgu küll järsult suureneb, kuid poorides pinge alla sattunud vee aeglasel laialivalgumisel mõnevõrra jälle väheneb. Vaialused ei talu hästi ka vibratsioon. Selles suhtes on eriti ohtlikud peeneteralised vesiliivad.

Vesiliivade kuivatamist on laialdaselt kasutatud hüdrotehniliste ehituste, vundamentide jne. jaoks vajalike süvendite rajamisel. Kõllalt häid tulemusi võib saada ainult filtratsiooniliste vesiliivade puhul.

Vesiliivade külmutamine annab neile ainult ajutise püsivuse. Seda meetodit kasutatakse kaevanduste praktikas šahtide rajamisel, tunnelite ehitamisel jne. Külmutamiseks kasutatakse spetsiaalsetes seadmetes jahutatud kontsentreeritud CaCl_2 lahust, mis hoitakse kivimites olevates puuraukudes pidevas tsirkulatsioonis. Madalatemperatuurilise lahuse tõttu tekib puuraugu ümbruses külmunud kivimite tsoon, mille temperatuur ulatub -20° kuni -40° . Külmunud vesiliivne kivim muutub vett-pidavaks ja survetugevus võib -15° juures ulatuda $600-1500 \text{ N/cm}^2$ (savidel $200-600 \text{ N/cm}^2$).

Külmutamine nõuab spetsiaalsete seadmete kasutamist ja suurt hulka puurauke. Peale selle on külmutamine väga aeganõudev ($30-60$ ööpäeva). Meetodi eeliseks on, et külmutada võib igasuguseid vett sisaldavaid kivimeid.

Silikatiseerimist kasutatakse tavaliselt vesiliivsete kivimite kandvate omaduste suurendamiseks vundamentide all, vee juurdevoolu likvideerimiseks šahtide, tunnelite jt. rajamisel, hüdrotehnilistel ehitustel jne. Vesiliivade silikatiseerimine on analoogiline lõsside ja lõssitaoliste kivimite silikatiseerimisega. Kuid silikatiseerimine ei täida oma ülesannet savistes ja väga peeneteralistes liivades, kus filtratsioonimoodul on alla $2-2,5 \text{ m}$ ööpäevas, sest niisuguste näitajate puhul ei jõua lahused puuraugu ümbruses kuigi kaugemale levida. Reaktsioon raskeneb ka suure filtratsioonimooduli korral (üle 80 m/ööp.). Seepärast osutubki see meetod kõige otstarbekamaks keskmise terasuurusega ja peenemateralistes liivades.

Elektrokeemilised kõvendamisemeetodid on enam kasutamist leidnud savikate vesiliivaete kivimite puhul, et suurendada nende tihedust, mehhaanilist tugevust ja veepidavust.

Elektrokeemilisel kõvendamisel lüüakse kivimitesse alumiiniumist, vasest või rauast torukujulised elektroodid, mille abil juhitakse pinnasesse alalisvool. Selle tagajärjel toimub seotud vee liikumine anoodilt katoodile ning kivimites oleva kaltsiumi ja naatriumi asendumine elektroodidelt eralduva vesiniku, alumiiniumi ja rauaga. Esimese mainitud nähtuse tagajärjel kivim mõnevõrra kuiveneb ja läheb voolavast

olekust plastilisse või tahkesse olekusse. Vahetusreaktsioon põhjustab aga kivimi hüdrofiilsuse vähenemise ja seega ka mõningad muutused struktuuris. Sageli lastakse koos elektri-vooluga kivimitesse ka mitmesuguseid keemilisi lahuseid, mis aitavad kaasa füüsikalise-mehaaniliste omaduste paranemisele.

Kessoonide kasutamine põhineb suruõhu juhtimisel rajatava kaeveõõnsuse või süvendi ette, et tasakaalustada vesiliivsetest kivimitest väljavalguva vee survet. Seega välditakse ka vesiliivade voolavus. Õhusurved võivad ulatuda kuni $0,3 \text{ MN/m}^2$. Meetodi edukus sõltub väga paljudest faktoritest, nagu kivimite õhuläbilaskvusest, lasumistingimustest, põhjave te tairkulatsioonist ja hüdrostaatilisest rõhust, suruõhutorustiku korrasolekust jne. Edukalt on kessoon kasutatud ka sillasammaste püstitamisel, sügavate vundamentide rajamisel jne.

Spetsiaalsetest toetustest nimetagem vaitoestust. Selleks lüüakse vesiliivadesse rajatava süvendi ümber kas puidust (4–5 m) või metallist vaiad (20 m ja isegi üle selle), mis moodustavad süvendisse tungivatele liivadele tiheda tõkke. Tavaliselt lüüakse vaiad kuni allpool oleva vettpidava kihini või isegi sellesse, et vältida vesiliivade sissetungimist vaitoestuse alt.

IX. IGIKELTS

Igikeltsaks nimetatakse maapinnalt alates teatud paksusega kivimikihti, mille temperatuur on pidevalt pikemat aega negatiivne.

Igikeltsaalade tundmaõppimisel on erakordselt suur rahvamajanduslik tähtsus, kuna umbes 50 % Nõukogude Liidu territooriumist ja 24 % kogu meie planeedi maismaast võtavad enda alla igavesti külmunud alad. Igikelts loob spetsiifilised iseärasused põhjavete dünaamikale ja režiimile. Ka ehitustegevus on neis piirkondades raskendatud.

Igikeltsaalade tekkimist seletatakse mitmel viisil. Riida uurijaid on veendunud, et igikelts on säilinud tänapäevani viimase jääaja pärandusena. Teised aga arvavad, et igikeltsa tekkimine on seotud antud alade negatiivse aastase

soojusbilansiga. Viimane oletus tundub tõenäolisemana, sest igikeltsa rajoonide aasta keskmine temperatuur on ka praegusel ajal negatiivne. Peale selle iseloomustab igikeltsaala-sid kuiv, külm ja pikk talv, lühike, kuid võrdlemisi soe suvi ning väike sademete hulk (150–400 mm aastas), millest talvel langeb vaevalt 50 mm.

Igikeltsa levik ei ole ühtlane. Põhjapoolsetel laiuskraadidel levib ta pidevalt, keskmistel laiuskraadidel võib märgata juba sulanud alade, nn. sulamike esinemist, lõunapoolsetel laiuskraadidel esineb igikelts aga ainult saartena sulanud kivimites.

Igikeltsakihi paksus on väga mitmesugune. Põhja suunas igijääatunud kiht tavaliselt pakseneb. Üldine paksus ulatub mõnest meetrist kuni 1000 m ja isegi üle selle.

Igikeltsakihtide temperatuur ei ole alati ühesugune. Harilikult ei lange see alla -8° . Sulamikega piirkondades on igikeltsakihtide temperatuur $-1,5^{\circ}$ kuni -5° . Veelgi enam lõuna pool, kus valdavaks muutuvad sulanud piirkonnad, ei lange temperatuur alla $-1,5^{\circ}$. Igikelts ei esine alati ühesugusena ja stabiilsena. Sõltuvalt kohalikest tingimustest võib igikelts kas peale tungida või taganeda. Esimesel juhul külmunud kivimikihtide paksus suureneb ja temperatuur alaneb, teisel juhul võib aga jälgida vastupidiseid nähtusi.

Igikeltsa levik maakoore ülemistes kihtides sõltub paljudest teguritest: kliimast, maakoore iseloomust, kivimite koostisest ja niiskusest, lumikattest, nõlvade orientatsioonist, mikroreljeefi iseärasustest, hüdrograafilisest võrgust ja taimkattest. Loetletud faktorid mõjutavad igikeltsakihi paksust, levikuala ja temperatuuri.

Läbi igikeltsarajoonide voolavad suured jõed kannavad endaga kaasa suuri soojushulki. Need jõed on nagu omapärase soojuse akumulatsioonid. Sellistes jõeorgudes igikeltsakiht kas puudub üldse või lasub üsna suures sügavuses.

Sõltuvalt kliimast, maapinna iseloomust, kivimite koostisest ja niiskusest, nõlvade orientatsioonist, taimkattest jms. on nn. aktiivne kiht, mis suvel üles sulab ja talvel jälle külmub, väga mitmesuguse paksusega. Tavaliselt ulatub see mõnekümnest sentimeetrist 3–5 meetrini. Aktiivse kihi paksus võib ka eri aastatel olla erinev.

Igikeltsaalal esinevate kaljuste kivimite füüsikalismehhaanilised omadused muutuvad külmumisel võrdlemisi vähe. Ainult juhul kui kivimites olevad lõhed on veega täitunud, võib külmumisel jää lõhesid õige oluliselt laiendada.

Kuivade mittekaljuste kivimite omadused muutuvad külmumisel ja ülessulamisel samuti vähe. Veega küllastunud kivimid (ka turvas) omandavad külmumisel aga kaljuste kivimite ilme, kuna jää seob üksikosakesed. Külmunult võib niisuguste kivimite survetugevus ulatuda isegi 100–250 N/cm². Ülessulamisel nad aga vedelduvad. Kui kivimi veega küllastumus on tingitud peaaesjalikult füüsikaliselt seotud veest, mis külmub alles väga madalal temperatuuril, muutuvad omadused külmumisel ja ülessulamisel samuti vähe. Sellist igikeltsa nimetatakse plastiliseks.

Mittekaljused külmunud kivimid jaotatakse nende oleku järgi kõvadeks, plastilisteks ja pudedateks külmunud kivimiteks. Kõvade külmunud kivimite üksikosakesed on tsementeeritud jääga. Nad on võrdlemisi haprad, kuid ehitiste all praktiliselt kokkusurumatud. Siia kuuluvad liivakad ja savikad kivimid, kui nende temperatuur on

tolmjatel liivadel alla	-0,3°C
saviliivadel alla	-0,6°C
liivsavidel alla	-1,0°C
savidel alla	-1,5°C

Plastiliste külmunud kivimite üksikosakesed on ainult osaliselt tsementeerunud jääga. Kuid kivimeis leidub peale selle veel rohkesti külmumata vett, mis annab talle teatava plastilisuse. Niisugused kivimid võivad ehitiste all märgatavalt vajuda. Siia kuuluvad liivakad ja savikad pinnased, mille poorides oleva külmunud ja külmumata ning poore maksimaalselt täita võiva vee mahu suhe (nn. suhteline niiskus G) on $\leq 0,8$ ning temperatuur 0°C ja kõvade külmunud kivimite juures märgitud piiri vahel. Kivimid, mille $G > 0,8$, kuuluvad nende omaduste selgitamiseks täiendavale uurimisele.

Pudedates külmunud kivimites ei esine jääd vähese niiskuse tõttu. Siia kuuluvad liivakad ja jämedapurrulised kivimid. Need, nagu kõvad kaljused kivimidki, ei muuda külmumisel ja ülessulamisel oma füüsikalismehhaanilisi omadusi.

Külmunud kivimites esineb jää kristallikeste, läätsede, vahekihikeste, soonte jne. näol. Mittekalguste kivimite pöörades esineb jää kristallidena, tsementeerides üksikosakesed ja muutes nad nn. jaabretsaks. Kaljuste kivimite lõhedes olev vesi moodustab külmumisel jääsooni, mis avardavad olemasolevaid ja tekitavad paratamatult ka uusi lõhesid.

Eri liigi moodustab nn. koopajää, mis on sageli igikelt- sa kollete põhjustajaks väljaspool selle pideva leviku ala. Koopajää tekkimine on seotud suurtesse koobastesse rohke vee kogunemisega, mis jäätudes ei sula isegi suvel. Aja jooksul jäävarud järk-järgult suurenevad ja koopa ümber tekib küllaltki ulatuslik igijää kolle.

Üksikuid igijää koldeid esineb ka kõrgmägedes, nagu Pamiiris, Uraalis, Kaukaasias jm.

Kivimites oleva vee külmumine mõjutab oluliselt ka nende filtratsioonilisi omadusi. Veega küllastunud ja külmunud liivakate kivimite filtratsioonimooduli võib praktiliselt võtta võrdselt nulliga. Külmunud savikad kivimid, mis sisaldavad mõningal hulgal veel külmumata vett, evivad ka teatavat veeläbilaskvust. Kuid selleks, et niisuguses kivimis vett liikuma panna, on vaja küllalt suurt hüdraulilist gradienti. Ka veega küllastumata ja külmunud liivadel on veeläbilaskvus veel teataval määral säilinud.

Külmunud kivimite ülessulamisel esineb neil teatava aja jooksul veel nn. külmatekstuur - sulava jää kohtadesse tekkivad makropoorid, mida mööda toimub ka vee filtratsioon. Niisuguste kivimite filtratsioonimoodul sõltub tekkivate makropooride mõõtmetest ja hulgast ning teataval määral ka kivimi koostisosakeste veeläbilaskvusest, s.t. nendes olevatest mikropooridest.

Liivsavidel, mille filtratsioonimoodul on rikkumata loodusliku struktuuri tingimustes suurusjärgus 0,001 m/ööp., suureneb see pärast mõnetsüklilist külmumist ja ülessulamist ligikaudu 3 m/ööp. Jää sulamisel tekkivate makropooride tõttu võib filtratsioonimoodul teataval määral suurenedagi ka teistel ülessulavatel igikeltsaala kivimitel.

Külmunud kivimite elektrijuhtivus sõltub esmajoones jää ja külmumata vee hulgast ning selle mineralisatsioonist, aga samuti kivimi külmatekstuurist. Üldise seaduspärasusena vähe-

neb kivimite elektrijuhtivus nende külmumisel väga kiiresti, hiljem aga suhteliselt aeglaselt.

Külmunud kivimite tugevus ja deformeeritavus sõltuvad peaaesjalikult granulomeetrilisest koostisest, tekstuurist, niiskusest, kivimi temperatuurist ja koormamise kestusest. Külmunud kivimeid iseloomustab voolavus, mis väljendub selles, et püsival koormamisel pikema aja jooksul deformatsioonid järk-järgult kasvavad. Järelikult taluvad külmunud kivimid lühiajalisi koormusi märksa paremini.

Peendisprerssete osakeste sisalduse suurenemisel väheneb kivimi hetkeline tugevus külmunud olekus tavalise sula olekuga võrreldes märgatavalt. Näiteks ongi savidel tugevuse vähenemine isegi mitu korda suurem kui liivadel, mis seletub külmumata vee esinemisega nendes kivimites.

Põhjaveed jagunevad igikeltsaalal igikeltsapealseteks, igikeltsasisesteks ja igikeltsaalusteks.

Igikeltsapealsed veed lasuvad aktiivses kihis ja on vaba pealispinnaga. Ainult aktiivse kihi külmumahakkamisel võivad nad surve alla sattuda. Aktiivse kihi täielikul külmumisel külmuvad ka igikeltsapealsed veed. Vettpidavaks aluspõhjaks on neile allpool lasuv igikeltsakiht.

Igikeltsapealsed veed toituvad peamiselt sademete infiltratsioonist. Tavaliselt on nad nõrgalt mineraliseerunud. Ainult asulate läheduses suureneb maapinnalt sissevoolavate roiskvetega segunemisel kloriidide, leeliste, lämmastikuühendite jt. hulk. Kui igikeltsapealsed veed toituvad tõusvatest igikeltsasisestest või igikeltsaalustest vetest, võib nende keemiline koostis ja temperatuur tunduvalt erineda teiste igikeltsapealsete vete samadest näitajatest.

Aktiivse kihi väikese paksuse ja hooajalise külmumise tõttu ei ole igikeltsapealsete vete hulk kuigi suur. Talvel ei anna kaevud sellest kihist üldse vett. Suurte jõgede ja järvede läheduses võivad aga igikeltsapealsed veed aastaringelt säilida külmumata olekus ja neid võib kasutada ka veevarustuses.

Igikeltsasisesed veed lasuvad igikeltsakihis selle ülemisest piirist alumiseni ja esinevad vedelas või tahkes faasis. Vedelas olekus on vee esinemine võimalik ainult sulamike aladel. Jääna esinev vesi ei moodusta kivimites üksnes kris-

talle, vaid esineb sageli suuremate läätsedena või kihtidena. Tavaliselt on vesi sulamike piirkonnas pidevas liikumises.

Igikeltsasisesed veed on seotud kas igikeltsapealsete või igikeltsaaluste vetega. Vastavalt sellele on neil ka erinev režiim, keemiline koostis ja füüsikalised omadused. Igikeltsaalustest vetest toituvatel igikeltsasisestel vetel on tõusev iseloom ja nende koostis ning omadused on analoogilised igikeltsaaluste vete koostise ja omadustega. Niisugused igikeltsasisesed veed on puhtad ja kõrgema temperatuuriga. Igikeltsapealsetest vetest toitumisel võivad igikeltsasisesed veed asustatud punktide läheduses veidi roiskunud olla. Nende temperatuur sõltub peamiselt meteoroloogilistest faktoritest ja filtratsiooniteekonna pikkusest sulamikes ning on tavaliselt nulli lähedal. Kõrgema mineralisatsiooniga igikeltsasiseste vete temperatuur võib isegi olla negatiivne ja langeta kuni -5° .

Igikeltsasiseste vete levimistingimused on seotud maapinna reljeefi ja taimkattega. Sesoonsed kliimamuutused ei avalda nendele märkimisväärselt mõju. Veevõtmiseks rajatud kaevude deebit võib olla sõltuvalt kohalikest tingimustest väga mitmesugune, kuid on ühe konkreetse kaevu puhul küllalt püsiv.

Igikeltsaalused veed lasuvad kas otse igikeltsakihi all või sellest sügavamal. Igikeltsaalused veed on alati vedelas faasis ja sageli surve all ning erinevad õige vähe teistest väljaspool igikeltsaala esinevatest põhjavetest. Nende temperatuur tõuseb alati koos lasumissügavusega.

Igikeltsaaluste vete toitumine ja äravool toimub sulamike kaudu. Kuna nende hulk lõunast põhja poole väheneb, siis halvenevad samas suunas ka igikeltsaaluste vete toitumis- ja äravoolutingimused. Aktiivsem side kõigikolme igikeltsaala veetüübi vahel esineb suurte, talvel kinnikülumata jõgede ja järvede ümbruses, kus igikelts teatavasti puudub. Suurte sulamike kaudu on veehorisondid sageli ka maapealsete voolu- ja seisuvetega seotud. Sõltuvalt pinnavete ja igikeltsavete horisontide kõrgusest võib sellistes kohtades toimuda kas pinnavete neeldumine või igikeltsavete väljavoolamine maapinnale.

Igikeltsaaluste vete mineralisatsioon on väga mitmesugune: esineb magedat ja soolast vett. Vete sanitaarne olukord on üldiselt hea. Veevõtmiseks rajatud kaevude deebit on tavaliselt aastaringselt stabiilne.

Igikeltsaaladel puutume sageli kokku kattejäaga.

Kattejää võib tekkida jõgede jääl selle paksenemisel talvel. Jõe kinnikülmumisel jääb vooluse ristlõige järjest väiksemaks ning vee surve võivad jäässe tekkida lõhed ja praod, mille kaudu vesi valgub jää peale ja külmub. Teatava aja möödumisel on võimalik analoogilise protsessi kordumine. Nii võib talve jooksul tekkida üsna suur kattejää kuhik.

Kattejää tekkimist maapinnale võib seletada järgmiselt. Oletame, et igikeltsaalal on aktiivsesse kihti kaevatud kraav. Talve tulekul külmub aktiivne kiht kraavi all täies paksuses kiiremini kui mujal. Selle tagajärjel moodustub aktiivse kihi alumises osas tsirkuleerivale veele tõke. Sellise tõkke taha hakkabki kogunema veel külmumata igikeltsapealne vesi, mis on surve all ja püüab leida väljapääsu maapinnale. Algul pundub maapind kraavi läheduses aeglaselt ja peagi tekib künkas, mille sisemuses esineb jää koos veega. Järk-järgult künkas suureneb ja lõpuks praguneb. Lõhedest väljavoolav vesi valgub laiali ja külmub kiht-kihilt ning moodustab maa peale jääkünka. Kattejää võib tekkida ka suuremate allikate maa peale väljumise kohal.

Kirjeldatud põhjustel võib kattejää tekkida talvel ka väljaspool igikeltsaala. Kuid need juhud pole kuigi tüüpilised.

Talvel tekkinud kattejää tavaliselt suvel sulab. Ainult soodsates tingimustes võib see igikeltsaalal eksisteerida aastaid. Suvel jää ainult kahaneb.

Kõrvuti kattejääga võib igikeltsarajoonides leida ka maaaluseid jääkünkaid - bulgunjahhe, mis maapinnal avalduvad kuplitaoliste künkastena. Bulgunjahhid tekivad juhul, kui suure surve all olev vesi ei suuda enda kohal olevaid kivimeid purustada ja maapinnale tungida. Kõrgemal lasuvad kivimikihid tõstetakse ainult ülespoole, mille tagajärjel tekivad kuplitaolised künkad kõrgusega kuni 30 m ja läbimõõduga kuni 80 m. Kupli sisemuses vesi tavaliselt külmub ja moodustab jäälaastse. Suvel bulgunjahhid harilikult sulavad, kuid soodsatel

tingimustel võivad eksisteerida aastaid ja isegi aastakümneid. Suuremate bulgunjahhide moodustamisest võtavad enamasti osa kas igikeltsasisesed või isegi igikeltsaalused veed.

Igikeltsaaladele on iseloomulikud samuti kivimite voolamised (solifluktsiooninähtused) ja termokarst. Solifluktsioon tekib kevadel aktiivse kihi pehmenemisel selles esineva jää sulamisel. Niisugune pehmenenud kivim võib kallatel voolama hakata ja moodustada solifluktsioonivagusid, -valle, -kuhikuid ja -terrasse. Solifluktsiooniga on seotud ka kiviribapinnaste tekkimine, kus suuremad kivikillud asetsevad nõlva kaldega risti või mõnel juhul paralleelselt orienteeritud ribadena. Niisuguse nähtuse tekke üksikasjad ei ole veel teada. Kuid on selge, et sorteerimine on seotud kivimite vahelduva külmumise ja ülessulamisega. Kui märkimisväärset kivimite voolamist ei esine, tekivad musterpinnased, mille all mõistetakse mitmesuguse tükisuurusega materjali sorteerumist ja rõnga- või polügoonikujuliste moodustiste tekkimist, kus plaatjad kivikillud ulatuvad oma kitsama servaga maa peale. Vastupidi ääresadele koosnevad kivirõngad ja polügoonid sisetistes osades ainult peeneteralisest materjalist. Termokarst on seotud kivimites oleva jää või igikeltsa ülessulamisega. Tekivad maapinna vajumised ja sageli isegi varingud, mis meenutavad karstile iseloomulikke analoogilisi vorme. Varingulehtrid täituvad tavaliselt veega ja moodustavad omapäraseid järvi.

Igikeltsa rajoonides esinevate omapäraste nähtuste ja termilise režiimi tõttu tuleb siin inseneriehituste püstitamisel arvestada tervet rida iseärasusi. Kõigepealt tuleb silmas pidada, et juba mullatööde tegemine on külmunud kivimites raske ja nõuab mitmesuguste vahendite, nagu kangi, kirka ja mõnikord isegi lõhketööde kasutamist. Kuid kõik see teeb tööd kalliks ja pikendab nende kestust.

Iga süvendi kaavamisel keltsaalal häiritakse tahes-tahtmata looduslikku soojusrežiimi. Suvel levib päikeseenergiasüvendi kaudu kivimitesse soodsamalt, kuid sügisel külmub aktiivne kiht süvendi all kuni igikeltsakihi kiiremini kui naabruses. Tagajärjeks on igikeltsakihi pealispinna alanemine suvel, kuid talvel kattejäät tekkimise oht süvendi läheduses. Väga iseloomulik on see nähtus pikemate kraavide puhul.

Seda asjaolu kasutatakse edukalt võitluses kattejäaga. Ots-
tarbekalt rajatud kraavide abil põhjustatakse kattejäa tekki-
mine kaugemal eespool kohast, kus see oleks väga ohtlik. Sa-
ma tulemuse võib saada ka igikeltsa pealispinna tõstmisega
ohtlikust kohast eespool. Selleks kuhjatakse kevadel enne
aktiivse kihi sulamist sobivasse kohta mulla- või turbaval-
lid, mis takistavad nende alla jäävate kivimite sulamist. Jä-
relikult häiritakse ka muldkehadega looduslikku soojusrežiimi.
Briti tähelepanelik peab muldkehade rajamisel olema seal,
kus nendega kaasneva kattejäa tekkimine ei ole soovitatav või
pole üldse lubatud.

Sageli deformeeruvad ka igikeltsaaladele püstitatud hoo-
nete vundamendid. Deformatsioonide põhjuseks on vundamendi
aluse vajumine või tõusmine. Jälle on tegemist igikeltsakihi
soojusrežiimi rikkumisega, sest vundamendi rajamisel asenda-
takse külmuv pinnas kivimmaterjaliga, mis on tavaliselt suu-
rema soojusjuhtivusega ja mille kaudu tungib maapinda kerges-
ti päikeseenergia ning hoone enda soojus. Tagajärjeks on kül-
munud kivimite ülessulamine ja vedeldumine vundamendi all ja
ümbruses, millele võib järgneda ehituse ebaühtlane vajumine.
Talvel aga soodustab niisugune vundament külma tungimist maa-
pinda, millele järgneb kivimite külmumine ja koos sellega
mahu suurenemine. See võib aga vundamendi koos ehitusega üles-
poole tõsta.

Käesoleval ajal kasutatakse igikeltsa rajoonides põhili-
selt nelja ehitamisviisi:

- 1) kivimite soojusrežiimi ei arvestata;
- 2) säilitatakse kivimite külmunud režiim;
- 3) arvestatakse külmunud kivimite ülessulamist ehituse
püstitamise ja selle ekspluateerimise käigus;
- 4) külmunud kivimid sulatatakse enne ehitamist üles.

Ühe või teise ehitamisviisi kasutamine sõltub hoone
konstruktsioonist ja soojusrežiimist ning igikeltsa lasumise
geomorfoloogilistest ja geotehnilistest iseärasustest.

Soojusrežiim ei mõjuta külmunud kaljuste ja kuivade mit-
tekaljuste kivimite ehituslikke omadusi. Niisugustes kivimi-
tes võib hea eduga kasutada esimest eespool nimetatud ehi-
tisviisi. Veega küllastunud pooleldi kaljuste kivimite füü-
sikalisi-mehaanilisi omadused muutuvad aga külmumisel jär-
sult, mistõttu see ehitamisviis ei tule nende puhul kõne alla.

Ehitamine kivimite külmunud režiimi säilitamisega on kõige mugavam, kuna külmunud kivimid osutuvad väga headeks ehituste alusteks. Kuid ükskõik milline ehitus on ka teatud määral soojuste akumulatsiooniks. Ehituste puhul, mis ehitatakse vähe soojust, on võimalikud niisugused konstruktsioonilised lahendused, mille juures eralduv soojus neeldub juba vundamendi aktiivses kihis olevas osas ja allpool lasuvasse igikeltsa ei tungi. Vähestele soojuste eraldumisele vastandata ei ole võimalik seda meetodit kasutada nende hoonete ehitamisel, kus töötavad vibratsioonide tekitavad seadmed. Vibratsioonid vähendavad oluliselt jää tugevusomadusi ja soodustavad selle sulamist.

Külmunud kivimite järkjärgulisele ülessulamisele ehitamise või ekspluateerimise käigus võib baseeruda juhul, kui ülessulamisest tingitud ebaühtlased deformatsioonid ei ole konstruktsioonile ohtlikud ega ületa lubatud piiri. Seejuures ei tohi ehituse alla jäävas ja ülessulavas osas esineda jäälahti ega teisi suuremaid jääkogumikke. Peale selle on soovitatav, et deformatsioonid toimuksid aeglaselt ja võrdlemisi ühtlaselt.

Külmunud kivimite eelnevat ülessulatamist koos nende kandvate omaduste parandamisega kasutatakse juhul, kui teiste ehitamisviisidega pole võimalik tagada ohutust. See meetod tuleb ainuvõimalikuna kõne alla ka juhul, kui ehitatakse sulamikega piirkonnas, kus ehituste alla võib jääda samasugusest külmunud ja sula pinnas.

Lõpuks tuleb märkida veel raskusi, mis on seotud veevarustusega igikeltsa piirkonnas. Vee saamine väikestest ja keskmise suurusega jõgedest ning järvedest on raskendatud, kuna need külmuvad sageli põhjani. Seepärast võib tugineda ainult suurtele jõgedele ja järvedele. Peale selle esineb raskusi vee juhtimisel tarbijateni, sest aktiivsesse või igikeltsakihti asetatud torustikus külmub vesi talvel. Torustiku asetamine igikeltsakihi alla osutub aga enamasti võimatuks. Seepärast peab kasutama keerulisi ja kalleid meetodeid. Torud asetatakse selleks ettenähtud kootavatesse galeriidesse, neid soojendatakse auru või elektriga, mööda torusid juhitakse soojendatud vett jne.

Igikeltza käsitlemisel on otstarbekohane peatuda ka kivimite hooajalisest külmumisest ja ülessulamisest tingitud deformatsioonidel ehitustes ja teedel, kuna nende nähtustega tuleb paratamatult kokku puutuda enamikus maades.

Ehituspraktikas on juba ammu kindlaks tehtud, et vundamentide väikese rajamissügavuse korral tekivad hoonetes maapinna pealmise kihi külmumise tõttu deformatsioonid. Nende vältimiseks on saanud tavaks, et vundamendid rajatakse talvel külmuvast kihist sügavamale. Talvise külmumise sügavus sõltub aga reast faktoritest. Otsustava tähtsusega on õhu minimaalne temperatuur, lumikatte paksus ja kestus.

Sageli on aga vundamenti rajamissügavus talvel külmuvast kihist mõnevõrra väiksem, kuid sellele vaatamata hoonetes deformatsioone ei esine. Neid erilisi olukordi saab seletada kivimite külmumissügavuse erineva mõistmisega. Siin võib esineda kaks võimalust. Ehituspraktikas kasutatav külmumissügavus määratakse kivimite nullisotermi, teine aga faktilise külmumise järgi. Tavaliselt ületab esimene oluliselt teise. See on tingitud asjaolust, et 0° juures igasugune vesi ja kivim ei külmu täielikult. Seejuures on otsustava tähtsusega põhjavete mineralisatsioon. Kivimites füüsikaliselt seotud vesi külmub samuti nullist madalamal temperatuuril. See pärast ei vastagi nullisotermi järgi määratud külmumissügavus alati kivimite tegelikule füüsikalisele olukorrale. Savikad kivimid (saviliivad, liivsavid) külmuvad näiteks alles $-0,5^{\circ}$ või isegi -1° juures. See võimaldabki vundamentide rajamise sügavuse võtta mõnevõrra väiksema nullisotermi järgi saadud näitajast. Pealegi on iga ehitus ise soojusallikaks, olgu ta siis kütav või mitte kütav, ja takistab külma tungimist allolevaidse kivimitesse. Sellest tingituna on tegelik külmumissügavus veelgi vähenenud ja nullisotermi jooneni mitteulatuva vundamendiga hoone püsib samuti märkimisväärselte deformatsioonideta.

Kivimite külmumine on seotud vee kogunemisega külmumistsooni. Vesi võib külmumistsooni sattuda mitmel viisil: auruks, kilevee liikumise printsiibil ühelt kivimiosakeselt teisele, gravitatsioonilisel teel, kapillaare mööda või surve mõjul. Kivimite külmumine on võimalik ainult juhul, kui vett on kogunenud külmumistsooni küllalt suurtes kogustes.

Vee gravitatsiooniline või surveiline voolamine vundamenti alla on määratav ehitusplatsi hüdrogeoloogiliste tingimuste järgi. Vee kapillaarne juurdevool võib toimuda siis, kui põhjavete taseme ja külmumistsooni vahe on väiksem kapillaartõusu kõrgusest. Kilevee liikumine on talvel üldiselt tähtsusetu ja järelikult on selle kogunemise võimalused minimaalsed.

Vundamentide rajamissügavuse vähendamine on eriti ohtlik siis, kui allpool lasuvad suure kapillaarsusega kivimid, nagu näiteks peeneteralise liivad või suure tolmufraktsioonide sisaldusega kivimid. Suureteralistes liivades, kruusades ja veeriselistes kivimites aga vete kapillaartõusu praktiliselt ei esine ja seepärast puuduvad antud juhul külmumisest tingitud deformatsioonid isegi vundamentide üsna väikese rajamissügavuse puhul.

Kivimite külmumisest tingitud deformatsioone teedel tuntakse külmakergete nime all. Külmakerked rikuivad igasugust teed. Eriti ohtlikud on nad raudteedel, kus väikseimgi tee ebatasasus võib ohtlikuks saada. Autoteedel ei ohusta väiksemad tõusud normaalsetel kiirustel (60–80 km/t) veel liiklust. Ainult siis, kui kergete kõrgus ületab 10 cm ja nad ulatuvad mõne ruutmeetriti, on juba vaja kiirust tunduvalt alandada.

Külmakerkeid esineb igal aastal paljudel Nõukogude Liidu, Lääne-Euroopa ja Põhja-Ameerika maanteedel ning raudteedel. Kirjanduses leidub isegi andmeid külmakergete esinemise kohta Lõuna-Ameerika teedel. Otsest seost aasta keskmise temperatuuri ja külmakergete vahel ei esine. Otsustava tähtsusega ei ole ka talvise külmumise sügavus (Lääne-Euroopas on see keskmiselt 0,15 – 0,90 m, Nõukogude Liidus aga ületab 1 m).

Külmakerked tekivad talve alguses, kasvavad kuni kevadeni, mil saavutavad maksimaalse ulatuse ja siis kaovad. Kerkepuplites esineb jää kas laätsedena või vahekihtidena. Jää sulamisel tekkinud vesi niisutab tugevasti läbi tee muldkeha ülemised kihid.

Külmakergete tekkimine on võimalik tingimustes, kus vesi võib teetammis sattuda külmumistsooni. Seepärast on kergete tekkimistingimuste uurimisel vaja esmajärjekorras määrata kivimite temperatuur ja selle muutumine talvel teetammis, vete voolamise teed ja võimalused ning nende voolamise intensiivsus külmumistsooni.

Teetammi kivimite jahtumine toimub külma tungimisel kivimitesse tee pealispinna, teetammi nõlvade ja kraavide kaudu. Kivist, betoonist või asfaltbetoonist teekatted kergendavad teetammi läbikülmumist. Kui tee sõiduosa on lumest puhastatud, nõlvad ja kraavid aga kaetud lumega, on samas sügavuses sõiduraja all ja väljaspool seda kivimite temperatuuri erinevus teetammis üsna suur.

Vee voolamine teetammi külmumistsooni toimub analoogiliselt vundamentide juures kirjeldatuga. Suurema tähtsusega on siin vee gravitatsiooniline ja kapillaarne voolamine. Seepärast esineb suure kapillaartõusuga kivimites alati ka rohkem külmakerkeid.

Vee külmumisega poorides kapillaarne voolamine lakkab. Kuna suuremates poorides külmunud vee ja kiviosakeste pealispinna vahele jäävad külmumata veekilekesed, jätkub nüüd vee ümberpaiknemine kilevee liikumise printsiibil. Kuid temperatuuri järkjärgulisel alanemisel hakkavad külmuma ka kilede välimised osad ja vee liikumine osutub nüüd võimalikuks ainult sisemisi, kivimiosakestele kõige lähemaid kileosasid mööda. Seepärast vee voolamine külmumistsooni aeglustub tunduvalt ja jäälaatsede või vahekihikeste kasvamine väheneb ning lakkab lõpuks hoopis.

Veeaur liigub kivimites suurema aururõhuga alalt väiksema aururõhuga alale, s.t. kõrgema temperatuuriga alalt madalama temperatuuriga alale. Külmakergete tekkimisel toimub seega veeauru liikumine altpoolt ülespoole ja teetammi nõlvade ning kraavide poolt sõiduraja poole.

Vee gravitatsiooniline voolamine või surve on suunatud võrdlemisi harva teetammi sõiduraja alla. See on võimalik üksnes eriti halbades hüdrogeoloogilistes tingimustes, drenaaži puudumisel või korrast äraolekul.

Eespool toodust selgub, et kõige enam osutuvad külma-kergete ohtlikeks need teeosad, mis on rajatud tolmpinnasesse või rohkesti tolmufraktsioone sisaldavatesse kivimitesse. Niisugusel juhul on kapillaarse ja kilevee voolamise võimalused eriti head. Sobivamateks kivimiteks teedeehituses on seega suure- ja keskmiseteralised liivad, kruusad ja veerised.

Külmakerkeid põhjustavad tegurid võib jaotada looduslikeks, konstruktiivseteks ja eksploatatsioonilisteks.

Esimesse rühma kuuluvad geoloogilised ja kliimaatilised tingimused. Peale geoloogiliste, geomorfoloogiliste, hüdrogeoloogiliste ja ehitusgeoloogiliste tingimuste peab vaatluse alla võtma ka kivimite füüsikalise-mehaanilised omadused. Uurimistööd ei tohi piirduda ainult teetammi laiusega, vaid arvestama peab samuti naabrust. Variantide võimaluse korral on teetrassi õige asendi valikul otsustav tähtsus. Kui valikuvõimalust ei ole, tuleb peamine tähelepanu pöörata looduslike tingimuste parandamisele teede ehitamise ja eksplaateerimise käigus.

Teise rühma kuuluvaid konstruktiivseid faktoreid püütakse vältida teede projekteerimise ja ehitamise käigus. Teetammi paigutatakse vee kapillaartõusu katkestajad kruusavahekihtide näol, juhitakse ära teetammi kogunev vesi ja välditakse spetsiaalsete drenaažiseadmete abil iga liiki vee voolamist teetammi. Mõnikord paigutatakse teekattes ka soojusisolatsiooni kihid.

Eksploatatsiooniliste faktoritega võitlemisel kuulub peamine tähelepanu külma sissetungimise takistamisele teetammi sõiduraja, tammi nõlvade ja kraavide kaudu. Samuti püütakse vältida tammi kivimite niiskumist sügisel kraavidesse kogunenud veest. Selleks peab kraavid korras hoidma ja kindlustama nendest pidev vee äravool.

X. GRAVITATSIOONILISED PROTSESSID NÕLVADEL

Gravitatsiooniliste protsesside hulka nõlvadel kuuluvad raskusjõust tingitud kivimite nihkumised.

Nõukogude Liidu territooriumil on seda laadi nähtused laialt levinud. Võitlus nende vastu nõuab suuri kulutusi. Pissab, kui mainida, et raudteetammidel esinevate nihkumiste ärahoidmiseks kulutatakse igal aastal miljonitesse rubladesse ulatuvaid summasid.

On teada rida juhtumeid, kus gravitatsioonilised protsessid nõlvadel on oluliselt häirunud ehitiste normaalset eksplaateerimist või põhjustanud nendes isegi ohtlikke deformatsioone. Nõlvade nihkumise tagajärjel on sageli muutunud kasutamiskõlbmatuks mitmed looduslikult kaunid ranniku-

alad. Seepärast peab gravitatsioonilistesse protsessidesse nõlvadel kui väga ohtlikesse geoloogilistesse nähtustesse suhtuma suure tähelepanuga.

Nõlvadel esinevate gravitatsiooniliste protsesside kui väga laia mõiste raamidesse kuulub rida nõlvade nihkumise ja deformeerumisega seotud nähtusi, mida võib jaotada nelja suurde rühma:

- 1) varingud ja rusukalded,
- 2) maalihked,
- 3) maaroomad,
- 4) plastilised deformatsioonid.

Varingute all mõistetakse kivimite allavarisemist järskest nõlvadest, mis võib olla seotud lõhede ja pragude tekkimisega nõlvas, selle õõnestamisega, nõlva moodustavate kivimite purunemisega jne. Varingutele on iseloomulik allapoole paikneva kivimimassi pöörlev ja ümberpaiskuv liikumine. Nad on küllaltki katastroofilised ja toimuvad kiirusega mõni meetri sekundis.

Rusukalded on seotud nõlva moodustavate kivimite murenemisel tekkiva materjali nihkumisega nõlva jalamile.

Maalihete hulka kuulub enamik nõlvadel esinevatest nihkumistest. Nõlva moodustavate kivimite ümberpaiknemine toimub siin mingit pinda mööda, mis võib olla väga erineva kuju ja asendiga. Maalihke põhjused võivad olla samuti väga erinevad. Tavaliselt on nad seotud nõlvade niiskumisega ja sellest tingitud kivimite omaduste muutumisega. Maalihked esinevad ühtlase ja kihilise ehitusega nõlvades. Eralduva kivimimassi liikumise kiirus kõigub samuti suurtes piirides, alates mõnest meetrist minutis ja lõpetades mõne meetriga ööpäevas.

Maalihete uurimisel ja kirjeldamisel kasutatakse lihkepinna, lihkejalami, lihkesügavuse, lihkekeha ja lihkehäilu mõisteid.

Lihkepinnaks nimetatakse pinda, mida mööda eraldub kivimimass ja toimub nihkumine. Sõltuvalt nõlva geoloogilisest ehitusest ja nõlva moodustavate kivimite omadustest on ka lihkepinnal erinev kuju ja asend. Ühesuguse ehitusega savikates nõlvades on see sujuv kõverpind, mis on lähedane silindripinnale.

Kihilistes nõlvades on lihkepind ebaühtlane: nõlva ülalosas on see järsem, allosas aga lamedam. Libisemisel kihipinda või tektoonilisi lõhesid mööda võib lihkepind olla tasane, laineline või murtud kujuga. Mõningatel maalihetel on koguni mitu lihkepinda, kusjuures nihkumine toimub kas mitut pinda mööda korraga või eri staadiumidel ja eri aegadel erinevaid pindu mööda.

Lihkepinna kujul ja asendil on oluline tähtsus libiseva massi mahu ja kuju määramisel. Toimunud maalihete lihkepinna täpne asend ja kuju määratakse tavaliselt puuraukude, šurfide või stollide abil.

Lihkejalami nimetatakse lihkepinna väljumiskohta nõlva jalamil. Enamasti ühtib lihkejalam nõlva jalamiga. Mõnikord laskub aga lihkepind tunduvalt sügavamale ja väljub ülespoole pöördudes alles teatud kaugusel nõlva jalamist. Pole haruldased ka juhud, kus lihkepind väljub nõlva jalamist kõrgemal.

Lihkejalami õige asendi määramisel on suur praktiline tähtsus, kuna see võimaldab kindlaks teha ka lihkepinna õige asendi. Peale selle võimaldab lihkejalami asend erinevates geoloogilistes ja hüdrogeoloogilistes tingimustes selgitada maalihke tegelikke põhjusi.

Lihkesügavuseks nimetatakse vahemaad nihkuvate maamasside pealispinnast kuni lihkepinna ja teda mõõdetakse esimese normaali mööda. Lihkesügavus on üheks oluliseks suuruseks lihe mõõtmete määramisel. Lihkesügavus määratakse pärast lihkepinna kuju ja asendi täpsustamist.

Lihkekehaks nimetatakse libisevat kivimite massi. Mõnikord moodustab libisev mass nõlva jalamil laiali valgudes deluuviumiga sarnaneva sette, mistõttu seda nimetataksegi maalihkedeluuviumiks. Mõnel juhul meenuvad libisenud ja laiali valgunud mass aga künklikku ja ebataasast maastikku. Samuti esineb olukordi, kus nõlvast eraldunud ja allalibisenud nõlvaosa (lihkekeha) säilitab oma sisemise ehituse, kuid pöördub veidi, mistõttu lihkekehasse satunud kihiosad on paigalejäänud kihtide suhtes ainult kallutatud asendis. Niisugune libisenud nõlva kuju on astmeline ja võib sarnaneda terrassiga ning jõeorgudes uurijaid eksiteele viia.

Lihkehäiluks nimetatakse nõlva kivimite libisemise tagajärjel tekkinud süvendit.

Maaroomad on seotud nõlva moodustavate pudedate kivimite liigniiskusega, mistõttu kallakul nõlval toimub nende aeglane allapoole vajumine (roomamine) kiirusega mõni sentimeeter kuni mõni meeter minutis. Üldiselt on maaroom rohkem pinna pealne ja kohalik nähtus. Kivimite liigniiskumine võib toimuda kas sademetest või põhjavetest.

Nõlvade plastilised deformatsioonid on seotud nõlva moodustavate kivimite plastiliste deformatsioonidega ja ilmnevad ükskõik millise konsistentsiga savikatest kivimitest koosnevates nõlvades. Plastilised deformatsioonid kulgevad võrdlemisi aeglaselt ja ulatuvad ainult mõne sentimeetrini aastas.

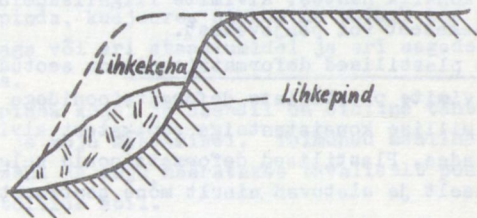
1. Maalihete kirjeldus ja tekkepõhjused

Eespool nimetatud gravitatsioonilistest protsessidest tutvume detailsemalt ainult maalihetega, kuna need on nõlval esinevatest nihetest kõige tüüpilisemad ja esinevad ka ehitusinseneri tööpraktikas õige sageli. Seejuures on kirjeldamisel kõige otstarbekohasem lähtuda maalihete klassifitseerimise põhiprintsiipidest (libiseva nõlva struktuur ja lihepinna kuju, libiseva massi liikumise iseloom ja põhjused, libisemist soodustavad faktorid, lihesügavus ja lihepinna asend, libisemise seos ajaga), kuna need iseloomustavad liheid küllaldase põhjalikkusega ja annavad teatava pildi ka tekkepõhjustest.

Libiseva nõlva struktuurist ja lihepinna kujust lähtudes eraldatakse asekventseid, konsekvantseid ja insekventseid maaliheid.

Asekventseks nimetatakse maaliheid, mis toimuvad ühtlase ehitusega kihistusega nõlvades. Nihkumine toimub siin kõverpinda mööda, mille kuju sõltub kivimi üksikosakeste vahelisest sidemest ja sisehõõrdumisest (joonis 8). Niisuguseid maaliheid esineb kõige enam savikates nõlvades ja kunstlikes muldkehades, kui kivimid on seega küllastumisel omandanud konsistentsi, mis ei suuda kindlustada nõlva püsivust. Libisemine algab tavaliselt nõlva jalamilt ja haarab seejärel kogu nõlva.

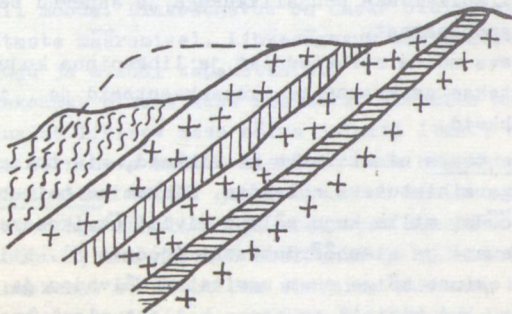
Libisemise põhjustelt on asekventsed maalihked plastilised, s.t. nad on seotud peamiselt kivimite konsistentsi muutustega.



Joon. 8.

Konvekventseteks nimetatakse maalihkeid, mille lihepind on nõlva geoloogilise ehitusega juba ette määratud. Siin võib esineda neli juhtu.

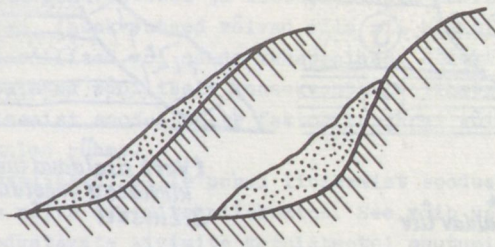
1. Nõlva moodustavad savika koostisega kihid on selle jalami suunas kaldu. Niiskumisel või nõlva allosa kõrvaldamisel hakkavad nad allpool lasuvate kõvemate kihtide pealispinda mööda allapoole nihkuma (joonis 9).



Joon. 9.

2. Mulla ja taimkatte libisemine mullaalust pinda mööda, mida sageli esineb soostunud, kunstlike süvendite ja muldkehade nõlvadel.

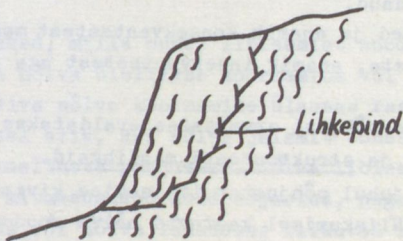
3. Deluuviumi libisemine põhikivimeil, mille pealispind on ühtlasi ka lihkepinnaks. Mõnikord kulgeb niisugustel libisemistel lihkepind ka veidi sügavamalt ja haarab osalt põhikivimite murenemiskoorikut (joonis 10).



Joon. 10.

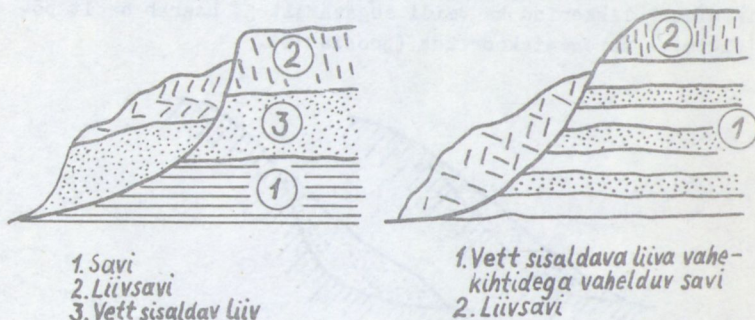
4. Kivimeis olevaid lõhesid mööda toimuvad libisemised. Lihkepind kujuneb sel juhul välja lõhede süsteemist ja on tavaliselt murtud kujuga (joonis 11). Niisuguseid lihkeid võib esineda pragulistes kaljustes kivimites, kui lõhed ja praod on omavahel seotud ja nende pind on kaetud savikate murenemisproduktidega või sisseimbuvate vete poolt kaasatoodud savika materjaliga.

Kolme esimese kirjeldatud maalihke puhul algab libisemine tavaliselt nõlva jalamilt, neljanda puhul aga nõlva ülal osast.



Joon. 11.

Insekventsed maalihked esinevad ebaühtlase ehitusega kihelistes nõlvades. Lihkepind on nõlva ülsosas järsem, allosas aga lamedam (joonis 12). Libisemine algab tavaliselt nõlva ülaosa eraldumisega. Libisemise põhjustelt on insekventsed maalihked kas plastilised või sufosioonilised.



Joon. 12.

Libiseva massi liikumise iseloomust lähtudes jaotatakse maalihked delapsiivseteks ja detrusiivseteks. Niiviisi liigitas maalihkeid ka A. P. Pavlov – üks nende esimestest uurijatest. Delapsiivsed maalihked algavad ebapüsivate kivimite libisemisega nõlva jalamil. Selle tagajärjel kaotab toe ka kõrgemal asetsev nõlvaosa ja liikumine haarab kogu nõlva. Detrusiivsete maalihete puhul algab libisemine nõlva ülaosa eraldumisega. Liikuma hakanud kivimid rõhuvad madalamal asuvaid ja nii haarab ka siin liikumine kogu nõlva. Kuid paljusid maalihkeid ei saa paigutada kummassegi rühma, sest nendes esineb nii delapsiivse kui ka detrusiivse libisemise elemente. Seepärast ei olegi käesolev liigitus kuigi laialdaselt kasutamist leidnud.

Asekventsed ja enamik konsekvantsetest maalihetest kuulub delapsiivsete, enamik insekvantsetest aga detrusiivsete hulka.

Libisemise põhjusi arvestades eraldatakse plastilisi, sufosioonilisi ja struktuurseid maalihkeid.

Esimesel juhul põhjustab libisemise kivimite konsistent-
si muutumine. Niiskumisel kaotavad nõlva moodustavad savid
või savikad kivimid oma püsivuse ja sellele järgneb kogu nõl-
va libisemine. Teisel juhul kutsuvad libisemise esile nõl-
vas kulgevad sufosiooniprotsessid. Enamik maalihkeid on plas-

tilise iseloomuga. Sufosioonilisi maalihkeid on veel vähe uuritud. Nende kahe tüübi kõrval esineb rida vahepealseid, sufosioonilis-plastilisi maalihkeid, mille puhul mõlematel mainitud faktoritel on oluline tähtsus.

Struktuursete maalihete põhjuseks on nõlva kivimites esinevad lõhed ja tektoonilised rikked või nõlva jalami suunas kaldu olevad kihistuspinnad.

Enamik asekventseid ja konsekventseid maalihkeid on plastilised, insekventsed võivad olla nii plastilised kui ka sufosioonilised või nende vahepealsed. Struktuursed maalihked kuuluvad põhiliselt konsekventsete lihete hulka.

Libisemist soodustavate faktorite järgi võib maalihked jaotada kolme rühma.

1. Maalihked, mille puhul libisemist soodustavaks faktoriks on nõlva kivimite niiskumine. See võib väljenduda kas nõlva moodustavate kivimite konsistentsi muutumises ja raskuse suurenemises või ainult viimases. Nõlva niiskumise võivad põhjustada: nõlvale langevad või naabrusest nõlvale valguvad sademete veed, nõlva jalamiga kokkupuutuvad voolu- või seisuveed ja nõlva alal esinevad või sinna voolavad põhjaveed.

2. Maalihked, mille puhul libisemist soodustavaks faktoriks on nõlva ebasobiv konfiguratsioon. Nõlva konfiguratsiooni muutumine võib toimuda kas looduslikel põhjustel või inimeste tegevuse tagajärjel. Esimeste hulka kuuluvad näiteks vooluvete erosioon ja seisuvete abrasioon. Mõlemal juhul toimub nõlva altõõnestamine, millele võib järgneda libisemine. Õõnestamise vältimiseks ehitatakse kaitseseinu või kindlustatakse nõlva veepealset ja veealust osa kivimüüride abil.

3. Maalihked, mille puhul libisemist soodustavateks faktoriteks on nõlva üleliigne koormamine või koormuse muutumine. Ebapüsiva nõlva koormamine ülaosas raskete rajatistega, eriti veel siis, kui nõlva jalamit õõnestatakse, on sageli olnud maalihete põhjuseks. Nõlva libisemist võivad soodustada ka mitmesugused muud asjaolud, nagu maaväriseimine, nõlva mööda või nõlva läheduses liikuvad rongid, mootorite töötamine nõlval, lainete löögid jne. Niisugustel juhtudel on kõige otstarbekohasem likvideerida libisemist soodustav faktor. Kuid mõnikord aitab ka nõlva kalde vähendamine.

Lihkesülgavust aluseks võttes eraldatakse järgmisi libisemisi:

- 1) pinnapealseid, sülgavusega kuni 1 m,
- 2) madalaid, kuni 5 m,
- 3) sülgavaid, 5 - 20 m,
- 4) väga sülgavaid, üle 20 m.

Lihkepinna ülaosa kaldest lähtudes võivad libisemised olla

- 1) väga lamedad, kaldega alla 5° ,
- 2) lamedad, kaldega 5 - 15° ,
- 3) järsud, kaldega 15 - 45° ,
- 4) väga järsud, kaldega üle 45° .

Lähtudes libisemise seosest kulgeva ajaga eraldatakse värsked ja vanu maalihkeid. Värskeste maalihete hulka kuuluvad need, kus libisemine kestab või on alles lähemas minevikus toimunud. Vanade maalihete puhul on libisemine toimunud juba ammu. Sageli on vanad maalihked geoloogiliste protsesside tagajärjel niivõrd muutunud, et nende olemuse ja põhjuste täpsem määramine on seotud suurte raskustega.

Sageli peetakse maalihkeid äkilisteks ja ettenägemata nähtusteks. Tegelikult see nii ei ole. Tekkiva maalihke esimesed tunnused ilmnevad nõlvadel juba ammu. On tarvis neid ainult tunda ja osata libisemisnähtusega seostada. Kuid libisemise esimeste tunnuste leidmine ei ole lihtne, sest nad võivad mõnede teiste nõlval toimuvate protsesside varju jääda. Mõned tunnused on aga iseloomulikud üksnes vanadele, juba minevikus toimunud lihetele.

Allpool on kirjeldatud tüüpilisemaid ja kõige sagedamini esinevaid värskeste ja vanade lihetete tunnuseid.

1. Maalihkelõhed, mis tekivad juba libisemise esimestel staadiumidel. Algul on nad vaevalt märgatavad, kuid laienevad pidevalt. Esimesed lõhed asetsevad üksteisest eraldi. Laienemisel lõhed pikenevad ja lõpuks ühinevad.

2. Maalihkehäilud, mida kirjeldasime juba eespool.

3. Eralduvuspinnad, mis tekivad lihkekeha nõlvast eraldumisel.

4. Maalihkevallid lihkejalamil. Nende kõrgus võib ulatuda mõne meetrini. Juhul kui lihkepind kulgeb erosiooniba-

sist madalamal, võivad vallid tekkida mere, järve- või jõekaldast teataval kaugusel ja ilmned põhjatõusudena või isegi saartena.

5. Maalihkeastmed. Keerulise maalihke puhul on astmeid mitu. Maalihkeastmeid ei või ära segada jõeterrassidega. Jõeterrassi platvorm on tavaliselt horisontaalne või väikese kaldega jõe suunas. Maalihkeastmete kalle on aga alati suunatud nõlva poole.

6. Kõverad puutüved ja nn. purjus mets. Nõlva libisemisel nihkuvad koos sellega allapoole ka kasvavad puud ja põõsad ning võtavad kallaku asendi. Kuna puu kasvab ikka raskusjõule vastassuunas, tekivadki koos vanema, alumise kallaku osaga kõverad tüved. Pärast libisemist kasvanud puud on aga sirge tüvega. Mõnikord toimub nõlva nihkumine erinevates suundades eri aegadel. Seetõttu on osa puid nõlval erinevates suundades kõverate, osa aga sirgete tüvedega. Võrreldes kõverate ja sirgete puude vanust, saab enam-vähem ära määrata ka libisemise aja.

7. Kihtide lasumishäired nõlva piirides.

8. Kivimite suurenenud niiskusesisaldus ja loodusliku struktuuri häired.

9. Nõlval olevates ehitistes või teedes ootamatute deformatsioonide tekkimine. Deformatsioonide avastamisel peab kohe selgusele jõudma, kas need ei ole tingitud muudest põhjustest.

Libisemise esimeste tunnuste avastamisel peab asuma maalihke teaduslikule uurimisele, et koheste vastuabinõude rakendamisega võimalikke katastroofe ära hoida. Määratakse kindlaks libisemise suund ja kiirus, lihkepinna asend ja kuju ning libisemist soodustavad ja põhjustavad tegurid. Maalihetega saab edukalt võidelda alles siis, kui kõik selle üksikasjad on täpsemalt teada. Konkreetsetest tingimustest ja olukordadest lähtudes valitakse siis ka sobivad lihkeid ärahoidvad abinõud.

2. Nõlvade püsivuse tingimused

Libiseva nõlva püsivus sõltub paljudest asjaoludest, nagu nõlva kalle ja ehitus, kivimite füüsikalise-mehhaanilised omadused (kivimiosakeste omavaheline side, sisehõõrdumine, niiskusesisaldus jne.), nõlva olek, selle koormamise ja konfiguratsiooni muutumine jne. Järelikult peab nõlva püsivuse kontrollimisel arvestama väga paljusid komplitseeritud faktoreid, mille mõju maalihke erineva tüübi puhul on samuti erinev. Seepärast ongi nõlvade püsivuse kontrollimise meetodid küllalt komplitseeritud. Siin piirdumegi ainult mõningate, kõige üldisemate meetodite selgitamisega, kuna need on aluseks keerulisemate arvutusmeetodite tundmaõppimisel.

Lihtsamal maalihkel, kui lihkepind on enam-vähem tasane ja nõlva jalami poole kaldu, sarnanevad libiseva nõlva tasakaalutingimused kaldpinnal lasuva keha tasakaalutingimustega (joonis 13). Libisemist ärahooldvaks jõuks on lihkepinna ac esinev sisehõõrdumine ja nidusus, nõlva nihutavaks jõuks aga lihkekeha raskuse Q lihkepinnaga paralleelne komponent S . Lähtudes sellest, nõlv ei libise juhul, kui

$$S \cdot \eta < N \operatorname{tg} \varphi + F \cdot c$$

ehk

$$Q \sin \alpha \cdot \eta < Q \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + F \cdot c,$$

kus Q on lihkekeha raskus,

α - nõlva kaldenurk,

φ - sisehõõrdenurk lihkepinnas,

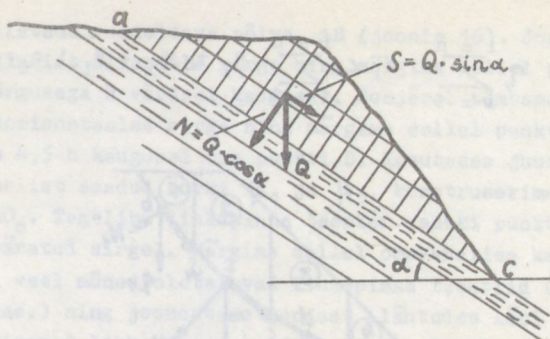
$\operatorname{tg} \varphi$ - sisehõõrdetegur lihkepinnas,

F - lihkepinna pindala,

c - nidusus lihkepinnas ja

η - tagavarategur (ehk ka nõlva püsivustegur), mis peaks jääma 1,2 - 1,5 piiridesse.

Kui lihkepind on murtud kujuga, võib lihkekeha jaotada murdekohtadest lähtudes üksikutesse sektsioonidesse, kusjuures igale sellisele sektsioonile vastab oma kaal ($q_1, q_2, q_3, \dots$), lihkepind ($F_1, F_2, F_3, \dots$), nidusus ($c_1, c_2, c_3, \dots$), sisehõõrdenurk ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$) ja lihkepinna kalle ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$).

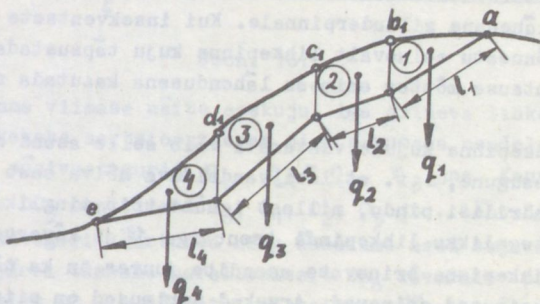


Joon. 13.

Lahutame, nagu ennegi, sektsiooni raskuse lihepinnaga paralleelseks (S_1) ja ristuvaks komponendiks (N_1) (joonis 14). Ka käesoleval juhul ei libise nõlv, kui

$$\eta \sum_{i=1}^{i=n} S_i < \sum_{i=1}^{i=n} N_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + F_i \cdot c_i.$$

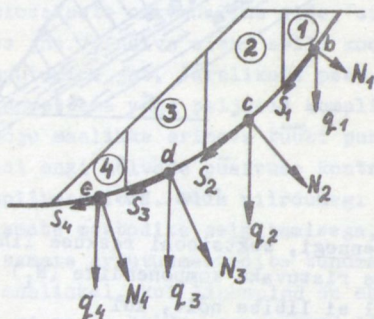
Asekventsete ja insekventsete maalihete puhul võib lihekeha jagada samuti sektsioonideks, mille raskus kantakse sektsiooni raskuskeskmest tõmmatud vertikaaljoone ja lihepinna lõikekohta (punktid b, c, d ja e) ning lahutataks lihepinnaga paralleelseks (S_1) ja ristuvaks komponendiks (N_1).



Joon. 14.

Teades iga sektsiooni piiridesse jäävat lihepinda, võib nõlva püsivuse tingimuse väljendada järgmiselt (joonis 15):

$$\sum_{i=1}^n S_i < \sum_{i=1}^n N_i \operatorname{tg} \varphi_i + F_i \cdot c_i.$$



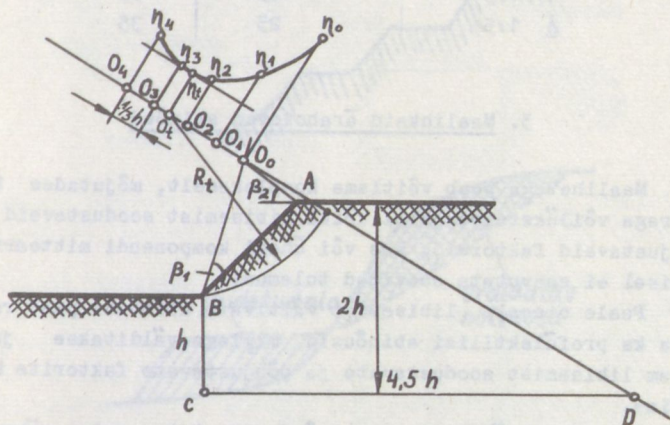
Joon. 15.

Kõigi eespool vaadeldud näidete puhul lähtuti eeldusest, et lihkepinna kuju ja asend on juba teada. Sageli on aga vaja kontrollida nõlvu, mille lihkepinna kuju ja asendit iseloomustavaid andmeid on vähe või puuduvad need üldse. Niisugused juhud on kõige tüüpilisemad asekventsetele ja insekventsetele lihetele.

Oletatava asekventse maalihke puhul on lihkepind oma kujult lähedane silinderpinnale. Kui insekventsete lihete puhul ei õnnestu eelnevalt lihkepinna kuju täpsustada, võib ka siin lihtsuse mõttes esimese lähendusena kasutada silindripinda.

Lihkepinna kujule vaatamata võib selle asend nõlvas olla mitmesugune, s.t. et läbi vaadeldava nõlva saab minna palju silindrilisi pindu, millest igaüht võib tinglikult vaadelda kui tegelikku lihkepinda tsentriga φ ja kõverusraadiusega R . Lihkepinna erinevate asendite juures on ka nõlva tasakaalutingimused erinevad. Arvukad uurimused on siiski näidanud, et asekventsetel lihetel läheb tegelik lihkepind harilikult läbi nõlva jalami, insekventsetel aga veidi sügavamalt. Seejuures asetseb tegeliku lihkepinna tsenter küllaltki piiratud alal.

Tähistame vaadeldava nõlva AB (joonis 16). Joonestame nõlva jalamist allapoole sirge ning märgime sellel punkti C nõlva kõrgusega h võrdsel kaugusel. Seejärel tõmbame punktist C horisontaalse sirge ning märgime sellel punktist C lähtudes $4,5 h$ kaugusel uue punkti D. Kasutades juuresolevast tabelist saadud nurki β_1 ja β_2 , konstrueerime sirged BO_0 ja AO_0 . Tegelik liikepinna tsenter asubki punktidega D ja O_0 määratud sirgel. Märgime sellel omavahelise kaugusega $\sim 1/3 h$ veel mõned oletatavad liikepinna tsentrid (näit. O_1, O_2, O_3 jne.) ning joonestame nendest lähtudes läbi nõlva jalami minevad liikepinnad raadiusega R_0, R_1, R_2, R_3 jne.



Joon. 16.

Jaotame viimase näite eeskujul iga erineva liikepinna puhul liikekeha seksioonidesse ning arvutame nendele vastavad nõlva püsivustegurid $\eta_0, \eta_1, \eta_2, \eta_3$ jne. Kanname risti sirgele DO_3 punktidest O_0, O_1, O_2, O_3 jne. lähtudes saadud püsivusteguri väärtused ning ühendame need sujuva kõvera abil. Seejärel tõmbame paralleelselt DO_0 kõverale puutuja. Puutepunktist DO_0 -le tõmmatud ristsirge määrabki ära tegeliku liikepinna tsentri O_t . Lõpuks on veel vaja konstrueerida O_t -le vastav tegelik liikepind raadiusega R_t ning kontrollida nendele tingimustele vastavalt veel kord nõlva stabiilsust.

Lihkepinna tsentri leidmiseks kasutata-
vate abinurkade väärtusi

Nõlva kalle	β_1^0	β_2^0
1,73:1	29	40
1:1	28	37
1:1,5	26	35
1:2	25	35
1:3	25	35
1:5	25	35

3. Maalihkeid ärahoidvad abinõud

Maalihetega peab võitlema komplekselt, mõjutades kas korraga või üksteise järel kõiki libisemist soodustavaid ja põhjustavaid faktoreid. Kas või ühegi komponendi mitteam-
tarnimisel ei saavutata soovitud tulemusi.

Peale otseste, libisemist vältivate abinõude peab raken-
dama ka profülaktilisi abinõusid, millega välditakse juba
varem libisemist soodustavate ja põhjustavate faktorite tek-
kimine.

Maalihkeid ärahoidvad abinõud jaotatakse kolme rühma.

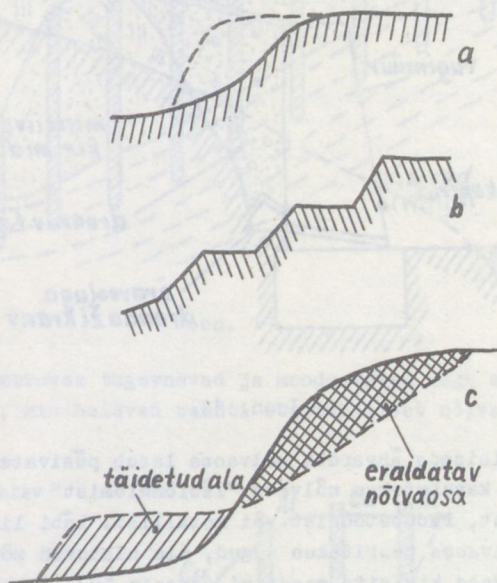
1. Abinõud, mis vähendavad nõlva kivimeid nihutavaid
jõude või pidurdavad libiseda võivate nõlvaosade liikumist.
2. Abinõud libiseda võivate kivimite tugevuse suurenda-
miseks.
3. Abinõud, mis aitavad likvideerida või nõrgendada li-
bisemist soodustavaid ja põhjustavaid faktoreid ja protses-
se.

Esimesse rühma kuuluvatest abinõudest on olulisemad:
nõlva tasandamine, tugimüüride ehitamine ja nõlva "läbiõmb-
lemine" vaiadega.

Nõlva tasandamise eesmärgiks on nõlva kalde vähendami-
ne. Madalama nõlva võib tasandada ühe võttega. Kõrgemaid nõl-
vu tasandatakse astmete kaupa, kusjuures astmete laius, kal-

denurk ja kõrgus määratakse pinnasemehaanikas väljatöötatud meetodite järgi (joonis 17, a ja b).

Kasulik on nõlva tasandamisel ülaosast saadud materjaliga täita nõlva allosa. Sel juhul jääb ära tasandamisel saada-va pinnase vedu (joonis 17, c).

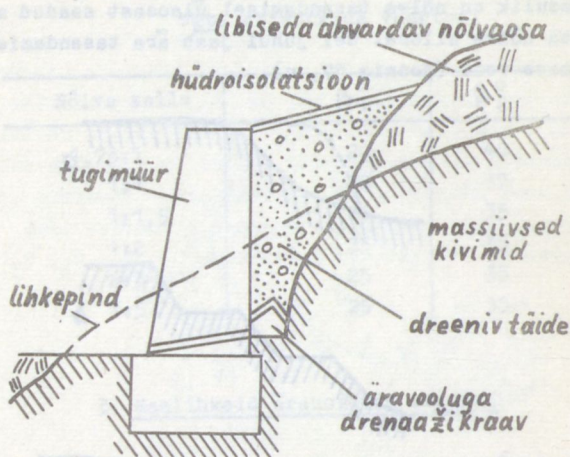


Joon. 17.

Juhul kui nõlva tasandamine pole võimalik või ei anna soovitud tulemusi, pidurdatakse libiseda võiva nõlvaosa liikumist tugimüüride ehitamisega nõlva jalamile. Kuid suuremaid libisevaid masse ei suuda ka tugimüürid kinni pidada. Seepärast ongi tugimüüride peamiseks ülesandeks liikumise algusmomendi vältimine. Niikaua kui säilib kivimite staatiline asend, peab vastu ka tugimüür. Tavaliselt arvutatakse tugimüürid vastavate ehitusmehhaanika meetodite abil.

Tugimüüri aluseks peavad olema kivimid, mis koos ebastabiilse nõlvaosaga liikuma ei hakka. Seepärast on vaja enne tugimüüri püstitamist uurimistööde andmete varal määrata lihepinna võimalik asend. Tugimüüri taha rajatakse drenaažikraav vee kogumiseks. Vee väljajuhtimiseks kraavist ehitatakse

se tugimüüri teatud vahemaa järele äravooluteed (joonis 18).

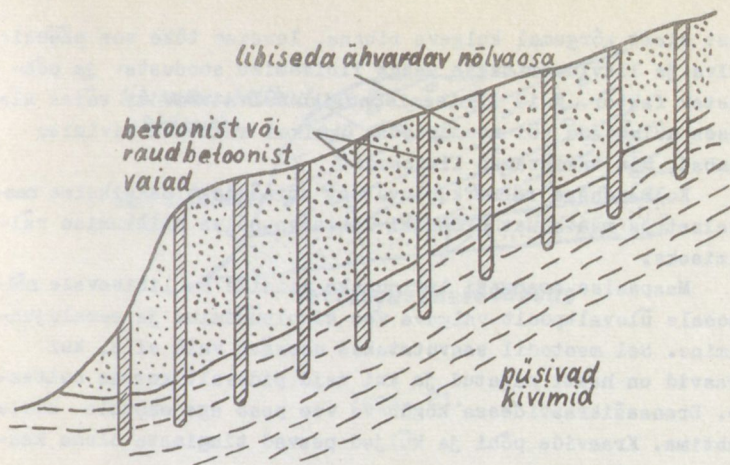


Joon. 18.

Kui libiseda ähvardav nõlvaosa lasub püsivate kivimite massiivil, kasutatakse nõlvade "läbiõblemist" vaiadega. Vaiad on betoonist, raudbetoonist või metallist. Läbi libiseda ähvardava nõlvaosa puuritakse augud, mis ulatuvad mõne meetri võrra püsivate kivimite massiivi (joonis 19). Aukudesse lüüakse kas metallvaiad või valatakse nad täis betooniga või raudbetooniga. Kokkuhoiu mõttes ei ole vaja puurauke täita kogu pikkuses. Küllaldane on, kui täita ainult alumine osa kuni lihkekeha poole paksuseni. Ülemine, tühjaks jäänud osa täidetakse aga saviga, et vältida vee imbumist puuraukude kaudu kivimitesse. Tavaliselt asetsevad vaiad ridadena malekorras.

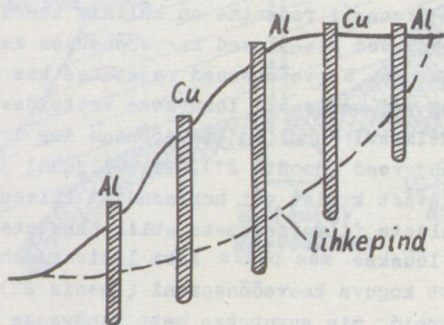
Teise rühma abinõudest on kasutatavamad kivimite elektrokeemiline kõvendamine ja külmutamine.

Elektrokeemilist meetodit kasutatakse püeda libisemisele kalduva massiivi kõvendamiseks. Selleks lüüakse libiseda ähvardavasse nõlva vaheldumisi kas vask- või raudvaiad ja alumiiniumvaiad. Võib kasutada ka betoon- või raudbetoonvau, mis eelnevalt kaetakse vastavate metall-lehtedega. Raud- või vaskvau kasutatakse katoodina, alumiiniumvau anoodina. Peale mehhaanilise mõju elektrivoolu läbilaskmisel kivimid elek-



Joon. 19.

troodide ümbruses tugevnevad ja moodustavad nagu monoliit-
sed sambad, mis hoiavad samuti ebastabiilset nõlva (joonis
20).



Joon. 20.

Külmutamist on hakatud nõlvade tugevdamiseks kasutama
alles viimasel ajal. Arvutused näitavad, et libiseda ähvar-
dava nõlva külmutamise ja külmunud olekus hoidmise maksumus
ei ületa eriti palju teiste maalihkeid ärahoivate abinõude
maksumust. Kui külmutada vett kandev kiht piki nõlva libise-

vast alast kõrgemal kulgeva ribana, luuakse tõke vee pääsule nõlva ja likvideeritakse seega libisemist soodustav ja põhjustav faktor. Kuid libisemisohtliku nõlva võib ka täies ulatuses külmutada või moodustada üksikud külmunud kivimite sambad, mis takistavad libisemist.

Kolmandasse rühma kuuluvatest abinõudest mainiksime maa-pealset ja maa-alust drenaaži libiseva nõlva niiskumise vältimiseks.

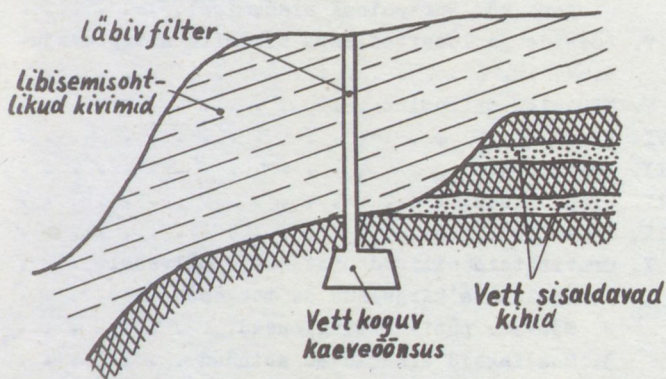
Maa-pealse drenaaži levinumaks viisiks on libisevale nõlvaosale ülevalt poolt valguva vee kinnipüüdmise ja eemalejuhtimine. Sel meetodil saavutatakse eesmärk vaid siis, kui kraavid on hästi rajatud ja kui neid pidevalt korras hoitakse. Drenaažikraavidesse koguneva vee peab aga ohutule alale juhtima. Kraavide põhi ja küljed peavad tingimata olema kaetud veekindla kattega.

Peale naabrusest nõlvale valguva vee tuleb nõlva kaitseda ka sademete eest. Selleks peab kuivenduskraavid rajama otse libisevasse massiivi. Ka sel juhul kaetakse kraavide põhi ja seinad veekindla kattega. Soovitav on, et kattematerjal oleks küllalt elastne. Kraavid orienteeritakse nii, et nad haaraksid sademeid maksimaalsel hulgal.

Maa-aluse drenaaži rajamine on küllalt keeruline. Siia kuuluvad mitmesugused maa-alused kaeveõõnsused koos muude kuivendusseadmetega. Kaeveõõnsused rajatakse kas otse vett kandvasse kihti või selle all lasuvasse vettpidavasse kihtidekompleksi. Esimesel juhul on kaeveõõnsus ise dreniks, kuhu voolavad põhjaveed (joonis 21). Teisel juhul juhitakse vesi vett sisaldavast kihist või horisondist kuivenduskaeveõõnsusse vertikaalsete filterseadmete abil. Kasutatakse lääbivaid filtreid, mis lüüakse maa pealt läbi libisemisohtliku nõlvaosa kuni vett koguva kaeveõõnsuseni (joonis 22), ja sisse-löödavaid filtreid, mis surutakse vett kandvasse kihti kaeveõõnsuse laest. Mõlemal juhul juhitakse libisemisohtlikust nõlvast või vett kandvast kihist kinnipüütud vesi filtrite abil kaeveõõnsusse ja selle kaudu nõlvast eemale. Milline kuivendusmeetod ühel või teisel juhul valida, oleneb nõlva kivimite niiskumise iseloomust ja nõlva ehitusest.



Joon. 21.



Joon. 22.

S i s u k o r d

Sissejuhatus.	3
I. Kivimite füüsikalisi-mehhaanilisi omadusi kujundavad looduslikud tegurid.	4
1. Kivimite geneesi, diageneesi ja metamorfismi tähtsus nende füüsikalisi-mehhaaniliste omaduste kujunemisel	4
2. Tektooniliste nähtuste tähtsus kivimite füüsikalisi-mehhaaniliste omaduste kujunemisel	11
3. Kivimite lõhelisus.	16
II. Kivimite ehitusgeoloogiline klassifikatsioon	19
III. Kivimite looduslik tihenemine.	21
1. Liivade ja savide looduslik tihenemine.	22
2. Liivade ja savide tihenemine pinnasevee taseme või survepinna alanemisel.	28
IV. Lõsside ja lõssitaoliste kivimite niiskusevajumine.	30
V. Kivimite paisumine	35
VI. Karst.	37
VII. Sufosioon.	42
VIII. Ujupinnased.	46
IX. Igikelts	51
X. Gravitatsioonilised protsessid nõlvadel.	64
1. Maalihete kirjeldus ja tekkepõhjused.	67
2. Nõlvade püsivuse tingimused.	74
3. Maalihkeid ärahooldavad abinõud	78

Hind 45 kop.



K. OJASTE

*GEOLOOGILISTE
PROTSESSIDE
ja NÄHTUSTE
OSATAHTSUS
EHITUSGEOLOOGIAS*

TALLINN 1974