

A TALAJSTABILIZÁCIÓ NÉHÁNY FIZIKAI ÉS KÉMIAI VONATKOZÁSA

Bevezetés

Mint csaknem minden technikai tevékenység, a talajstabilizáció is teljes mértékben tapasztalati alapokon elindulva alakult ki. Nem voltak ismeretek minőségileg, még kevésbé mennyiségileg azok a fizikai és kémiai alaptörvények, melyek következtében egy-egy talajstabilizáció sikerrel, mások viszont kudarcra jutottak. Tapasztalaton alapultak azok a szabályok, utasítások is, melyek alapján a stabilizáló anyag szükséges mennyisége megállapítható volt. A talajfizika terén az utóbbi években elindult fejlődés, mely a talajok viselkedését meghatározó fizikai és kémiai alaptörvények megismerését tűzte ki célul, a stabilizáció szempontjából is hozott új eredményeket, sőt, a talajstabilizációval kapcsolatos kérdésekre vonatkozó kutatás több esetben maguknak a talajoknak műszaki szempontból fontos tulajdonságaira is magyarázatot adott. E tanulmányban e fizikai és kémiai jelenségek és törvényszerűségek közül tárgyalunk néhányat, a különféle stabilizációs eljárások jobb megismerését tűzve ki célul.

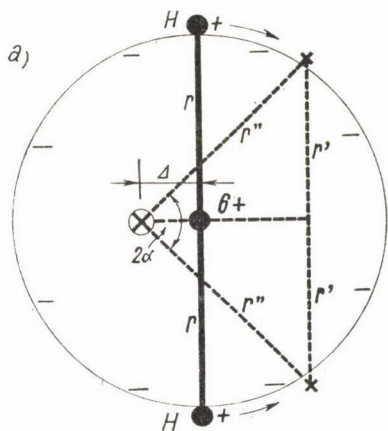
A víz szerepe stabilizált talajokban

Mind természetes, mind mesterségesen stabilizált talajokban a szilárd szemcsék között létrejövő kapcsolatokra döntő mértékben hat ki a víz; ha tehát e kapcsolatokat meg akarjuk ismerni, akkor foglalkoznunk kell a víz tulajdonságaival.

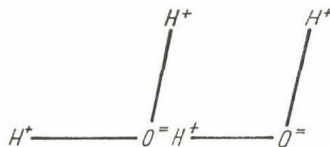
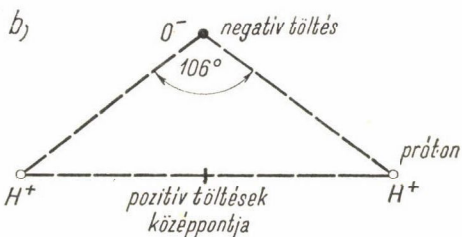
A víz sajátságos anyag; normális hőmérséklet és nyomás mellett a H_2S , H_2Se és H_2Te vegyületek analógiájára gáznak kellene lennie, mégis folyadék, s mint folyadék, bizonyos szempontokból kristályos állapothoz hasonló rendezettséget mutat, mint a szilárd testek.

A víz tulajdonságai a vízmolekula szerkezetének következményei. A vízmolekula, a H_2F_2 és a HCN molekulákhoz hasonlóan, elektromos polaritással rendelkezik, vagyis a negatív és pozitív töltetek középpontjai a molekulán belül nem esnek egybe; ezenkívül a hidrogén atomok, bár egy bizonyos molekulához tartoznak, kölcsönhatásba tudnak lépni a szomszédos molekulákkal és ún. hidrogén-kötéseket alkotnak. Egy mol ($6,02 \cdot 10^{23}$) hidrogén-kötés energiája 6000 kalória nagyságrendű. A hidrogén-kapcsolatok következtében a cseppfolyós víz molekulái nem függetlenek egymástól, minden egyes molekula a szomszédjaihoz kötött. E kötések a molekulák mozgása során folytonosan szét kell szakítani és újra kell alkotni. A hidrogén-molekula szerkezete és polaritása következtében a folyékony víztömeg is szerkezettel rendelkezik, vagy legalábbis másodlagos szerkezeti egységeket tartalmaz.

Ez a szerkezet megváltozik akkor, ha a vízhez ionokat, más molekulákat, vagy diszpergált részecskéket adunk. A szerkezetváltozás mértékére az a hőmennyiség lesz jellemző, ami felszabadul, ill. elnyelődik akkor, ha a folyadékban ionokat, vagy molekulákat oldunk, ill. ha szilárd részecskéket megnedvesítünk. Ha pl. 1 pond bentonitot 0,3 pond vízzel megnedvesítünk, akkor



1. ábra. *a* — H_2O -molekula háromszög-alakja az oxigén-ion polarizálhatósága következtében; *b* — a kialakult dipólus, egyensúlyi helyzetben



2. ábra. Hidrogén kötések kialakulása orientált vízmolekulák között

kb. 20 kalória hő keletkezik, ami a kölcsönhatásban résztvevő víz egy moljára vonatkoztatva 1200 kalóriát jelent; ez a hidrogénkötés energiájának egy ötöde. Ilyen esetekben tehát csak a víz eredeti szerkezetének módosulásáról, ill. megzavarásáról beszélhetünk új szerkezet nem keletkezik.

Az 1. ábra mutatja a vízmolekula klasszikus modelljét. A potenciális energia legkisebb értéke mellett jön létre egyensúlyi helyzet; ekkor 2α értéke 100 és 110° között van. Ebben a szerkezetben a pozitív, nukleáris, és a negatív, elektronikus töltések középpontja nem esik egybe, így dipólus keletkezik. E dipólus-szerkezet teszi lehetővé, a 2. ábra szerint, hidrogénkötések létrejöttét. Mint látható, a kötések irányított szerkezetet hoznak létre. Már pedig ha valamely közegben a jelentős erőhatások meghatározott irányokban működnek, akkor a közeg sűrűsége kisebb lesz, mint akkor, ha az ilyen erők a térben egyenletesen eloszlanak; ezért azután a víz, melyben erős hidrogénkötések vannak, a rokonvegyületek között a legkisebb sűrűséggel rendelkezik. Így pl. a H_2O , SiO_2 és Al_2O_3 molekulák molekula-súlyai 18,02; 60,06 és 101,94; a sűrűségek pedig (jég—kvare—korund sorrendben) 0,917; 2,65 és 4,00. Ha a H^+ -, Si^{4+} - és Al^{3+} -ionok köbtartalmát elhanyagoljuk, akkor egy pond oxigénatom jég esetében 19,65, kvare esetében 11,35 és korund esetében 8,5 cm^3 térfogatot foglal el. Nyilvánvaló tehát, hogy a jégben s természetesen a vízben

is, az oxigén-ionok sokkal lazábban helyezkednek el, mint a kvarcban vagy korundban.

A vízmolekula geometriai és elektromos tulajdonságainak s hidrogén-kötések képzésére való alkalmasságának további következményeit az 1. táblázat mutatja. Ha a különböző vegyületekben az intermolekuláris erők kb. azonos nagyságrendűek, akkor az olvadási pont és a forráspont a molekuláris súly növekedésével nő. E szabályt a H_2S , H_2Se és H_2Te vegyületek követik is. A víz abnormális viselkedése annak következménye, hogy erős irányított intermolekuláris kötésekkel bír. Normális anyagok olvadáspontja növekvő nyomás mellett nő, míg a vízé egészen 2050 kp/cm^2 nyomásig csökken, azután nő. A normális anyagok olvadáskor kiterjednek, míg a jég térfogata a normális olvadásponton 10% -kal nagyobb, mint a folyadék térfogata. Azt mondhatjuk, hogy a víz csak akkor vesz fel „normális” tulajdonságokat, ha olyan nagy külső hidrosztatikus nyomásokat alkalmazunk, melyek képesek szétörni a molekulák közötti belső kötésekkel.

A vízmolekulák kölcsönös vonzását és lekötődését bizonyos szempontból úgy tekinthetjük, mintha a vízmolekulák néhány ezer atmoszféra belső nyomás alatt állnának. A hasonlat azonban nem teljes érvényű, mert hiszen a belső kötések irányítottak, a hidrosztatikus nyomás viszont minden pont-

1. táblázat

A víz és más hasonló kémiai szerkezetű anyagok néhány tulajdonsága

Anyag	Mol súly	Olvadáspont*	Forráspont*
H_2O	18,02	0,0	100
H_2S	34,08	-82,9	-61,8
H_2Se	80,98	-64	-42
H_2Te	129,63	-51	-4

* 1 atmoszféra nyomás mellett, C°

ban és irányban azonos feszültséget ébreszt. Ha külső nyomást alkalmazunk, akkor az nem egyszerűen szuperponálódik a számított belső nyomásra, hanem a nyomás növekedésével a molekulák egyre közelebb kerülnek, az irányított kötőerők viszont deformálódnak. E deformációk során a szerkezet tönkremegy, ill. átalakul: ez magyarázza meg viselkedését változó hőmérséklet és nyomás hatására.

A vízmolekulák tehát, elektromos dipólusnyomatékuk következtében elektromos térben irányítottan helyezkednek el. Ez a rendeződés a molekulák kinetikai energiájának hatása ellenében jön létre és így csökkenti a tér tényleges erejét, a térfogategységre jutó dipólusok erősségének és koncentrációjának, valamint az ezek ellen működő kinetikai energiának függvényében. E hatás mértéke a D dielektromos állandó: ha két egymástól r távolságra levő két pontszerű e_1 és e_2 töltés közé D dielektromos állandójú anyagot helyezünk, akkor a töltések közötti erő e_1e_2/r^2 -ről e_1e_2/Dr^2 értékre csökken.

A víz dielektromos állandója $18^\circ C$ -on 81; értéke növekvő hőmérséklet mellett csökken. Ez a nagy érték az oka annak, hogy a víz erős elektroliteket jól oldani képes: hisz két ion között vákuumban érvényesülő vonzóerő víz-

ben $1/\epsilon_0$ részre csökken; ez a redukció pedig már elegendő ahhoz, hogy a kinetikus molekuláris energia diszpergáló tendenciája jusson túlsúlyba. A vízbe jutott ionok körül vízmolekulák fognak irányítottan elhelyezkedni: ennek a következménye aztán az ionok hidratálásának, vagy szolvatálásának nevezett jelenség: a szolvens bizonyos molekuláinak bizonyos száma kapcsolódik, vagy lekötődik a disszolvált ionokhoz. A kapcsolódó molekulák száma az ionok nagyságának, alakjának és elektromos tulajdonságainak, továbbá a szolvens molekuláknak és a hőmérsékletnek a függvénye.

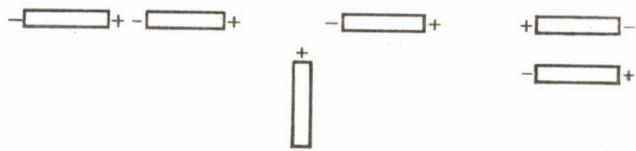
A vízmolekulák orientált lekötődése az ionok körül, továbbá az ilyen ionok fizikai jelenléte által okozott zavaró hatás megváltoztatja a víz szerkezetét. A vízmolekula belső szerkezete, a H^+ és O^{2-} komponensek kölcsönös kapcsolata eléggé laza ahhoz, hogy azok minden irányban szabadon oszcilláljanak s így felhasználják a 6 kalória/pond atom/ C° hőenergiát. Ha a vízmolekulák ionokhoz, vagy elektromos töltésű felületekre kötődnek, akkor ez a szabad oszcilláció megszűnik s így a rendszerben tárolt hőenergia felszabadul. Ez a hőmennyiség az ún. nedvesítési hő, mely szilárd részecskék diszpergálása során tapasztalható. A felszabaduló hőmennyiség egy bizonyos nedvességtartalom elérésig növekszik, a víztartalomnak azonos mértékű növekedéséhez tartozó felszabaduló hőmennyiség viszont annál kisebb, minél nedvesebb a talaj. Fizikai megfontolások alapján kiszámítható volt, hogy a szilárd szemcsék felületén lekötődő hidratációs víz első molekuláslorát 2500 kp/cm² nyomást előidéző erők rögzítik. A víz a hatalmas feszültségek mellett szilárd testként viselkedik, több különböző típusú, stabil „jég” keletkezik.

Ha száraz talajszemcséken kicsiny relatív légnedvesség mellett vízgőz kötődik le, akkor a szilárd részecskék aktív felületén a H_2O monomer oldata — egy szilárd oldat — keletkezik. A másik extrém esetben, vizes szuszpenziókban, a diszpergált részecskék felületét körülvevő hidroszférában kicserélhető ionok oldata van jelen. A két szélsőséges eset között két jól megkülönböztethető állapot jelentkezik. Az első esetben a kicserélhető ionok túlnyomó többsége az ásványi felületeken kívül van, s a felület az erősen lekötött hidratációs vizen kívül egymást éppen érintő, rögzített vízmolekulákból álló kalickákat tartalmaz. A másik esetben a víztartalom éppen megfelel a kicserélhető ionok által hidratálható vízmennyiségnek. Ezek az állapotok határozottan jelentkeznek akkor, ha a rendszer víztartalma csökken; akkor többé-kevésbé folyamatos az átmenet az összefüggő vízfilmmel rendelkező állapot határáig. Ha a talaj ugyanazt a víztartalmat nedvesedés révén éri el, akkor a vízfilm nem lesz folytonos, vagy nem egyes szemcséket, hanem szemcsehalmazokat vesz körül. Ennek a körülménynek kötött talajok tömörítése kérdésében fontos szerepe van.

Mint ismeretes, az atomokat molekulákká s a molekulákat szerkezetű egyesítő belső kötő erők elsődleges és másodlagos erőkre oszthatók fel. Eltekintve most az ionos és kovalens kötések kérdésétől, vizsgáljuk meg a másodlagos kötéseket. Ezek szintén kétfélek: van der Waals erők és a már említett hidrogén-kötések. A van der Waals erőket három különböző jelenség eredményének szokás tulajdonítani; ezek közül döntő (77%-ot kitevő) a vízmolekulák orientációja. A vízmolekulák aszimmetrikusak, így sokféle orientáció lehetséges, három esetet a 3. ábra mutat be.

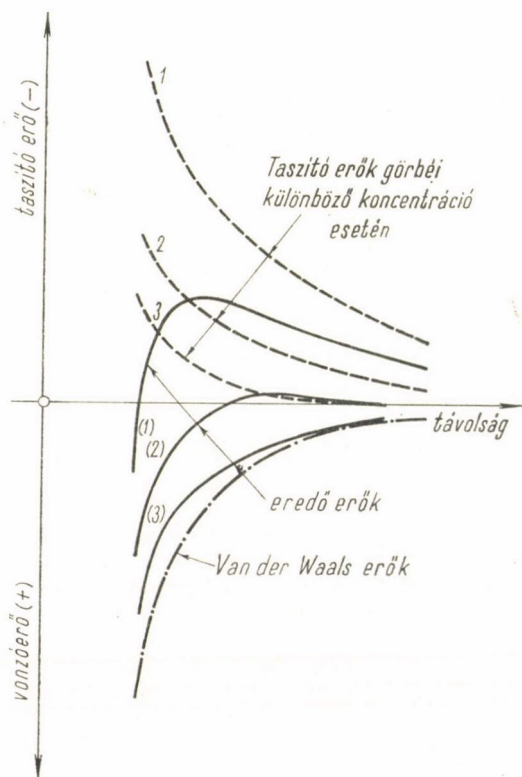
A töltéssel bíró szilárd részecskék, a körülöttük kialakult erőterek, a víz és az asszociált ionok határozzák meg a finomszemcsés talajok tulajdonságait. Megváltoztatva e tényezőket, az ionok típusát, koncentrációját, a

vőmérsékletet, a folyadékot stb. a talajtulajdonságokat is nagymértékben háltoztatni tudjuk. A fellépő erőhatások törvényszerűségei a következők. Két elektromos töltéssel rendelkező szemese felület között elektromos potenciál van. Ez azt vonja maga után, hogy két szomszédos sík felületet közelítve



3. ábra. Dipólusok orientációjának három esete

egymáshoz, munkát kell végezni. Ez a munka a taszítást legyőző erőnek és a távolság csökkenésének szorzata. Két párhuzamos felület között, valamely elektrolitban működő taszítóerő tehát a távolság függvénye. Az eredőerő a taszító- és a vonzóerők algebrai összege lesz. A vonzóerő a van der Waals hatásból adódik; az eredőerő változását a két felület távolságának függvényében a 4. ábra mutatja, különböző ion-koncentrációk esetére. Ha vala-

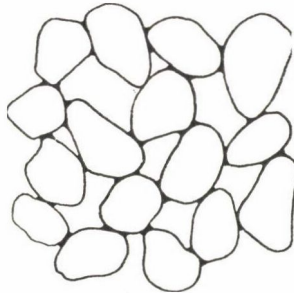


4. ábra. Két felület között működő vonzó, taszító és eredő erők változása a felületek távolságának és az oldott elektrolit koncentrációjának függvényében

mely oldathan két finom szemcse, akár a Brown-féle mozgás, akár áramlás hatására közel került egymáshoz, akkor a részecskék viselkedése attól fog függeni, hogy mekkora és milyen értelmű az eredő erő. Ha ez taszítás, akkor a részecskék diszpergálódnak. Ez akkor áll elő, ha az elektrolit koncentrációja nagyon kicsiny (4. ábra, 1 görbe). Ha az elektrolit koncentrációját növeljük (ekkor a taszító erőt a távolság függvényében a 2 és 3 jelű görbék adják meg), akkor előállhat az a helyzet, hogy az eredőerő bármely távolság mellett vonzás. Ha a részecskék ilyen körülmények között kerülnek közel egymáshoz, akkor összetapadnak, koagulálnak. Az összetapadt szemcsék gyorsabban ülepednek s pehelyszerkezetet alkotnak, nagy hézagtényezővel. A kialakult szerkezet a talaj műszaki tulajdonságait is nagymértékben befolyásolja. Megváltoztatva a kémiai adottságokat, a talaj tulajdonságai is megváltoztathatók.

A cementstabilizáció fiziko-kémiai alapjai

A talajstabilizáció egyik legrégebb, általában jól bevált s a hazai alkalmazás szempontjából is nagyon fontos módszere a talajok cementtel való kezelése. A cementtel való stabilizálás porított talaj, cement és víz összekeverését és tömörítését jelenti. E műveletek révén új építőanyag, ún. *cement-*



5. ábra. Cementáló hatás a durva szemcsék érintkezési pontjai körül

talaj jön létre, mely szilárdsága, kedvező alakváltozási tulajdonságai, víz-, hő-, fagy- stb. hatásoknak való ellenállása révén útburkolatként, út- és épületalapként, csatornaburkolatként stb. használható fel.

A cement és a talaj kölcsönhatását legegyszerűbben a következőképpen szokás leírni.

Finomszemcsés iszapban és agyagban a cement hidratációja erős kötésekkel létesít az ásványi anyagok között s egy mátrixot alkot; ez hatásosan közbezárja azokat a talajszemcséket, melyek nem kötődnek le. A mátrix sejtszerű szerkezetet alakít ki; ennek szilárdságától függ az egész szerkezet szilárdsága, mert a mátrixon belüli agyagrészecskék szilárdsága kicsiny. A mátrix rögzíti a szemcséket, így a cement egyrészt csökkenti a képlékenységet, másrészt növeli a nyírószilárdságot. A cement felületi kémiai hatása csökkenti az anyag víz-affinitását s így az agyagok víztartó-képességét. A szilárdság növelésével együtt ez azt eredményezi, hogy a nagyobb, nyers szemcseaggregátumok bezárva maradnak, ezért nem duzzadnak s a fagy-nak jobban ellenállnak.

Szemcsés talajokban a cementáló hatás a betonban játszott szerephez hasonló, azzal a különbséggel, hogy a cementpép nem tölti ki az adalék hézagait, az adalék csak az érintkezési pontokban cementálódik. („Ponthegesztés”; l. 5. ábra.) Így nem keletkezik folytonos mátrix; a törés módja attól fog függeni, hogy vajon a szemcsék közötti kötésnek, vagy maguknak a szemcséknek a saját szilárdsága a nagyobb. Minél jobban graduált egy talaj szemeloszlása, minél kisebbek a hézagok, s minél több és nagyobb a szemcsék közötti érintkezési felület, annál erősebb a cementáló hatás.

Ez a magyarázat, bár meglehetősen durva, a viszonyokat többé-kevésbé helyesen rögzíti le. A kötött talajokra vonatkozó előbbi megállapítások viszont a kérdésnek csak egyik oldalát fedik föl. Hogy a probléma lényegéhez közelebb jussunk, foglalkozzunk először a tiszta cementpép szilárdulási folyamatával.

A száraz portlandcement részecske heterogén anyag, kicsiny C_3S , C_2S , C_3A kristályokat és egy szilárd oldatot tartalmaz, amit C_4AF -ként szokás leírni.* A cement hidratálása alatt a komponensek vízzel jönnek reakcióba. Hidrált szilikátok, hidrált aluminátok és kalcium-hidroxid keletkezik. *Taylor* (1961) és *Brunauer* (1964) szerint a szilikát és aluminát fázisok bensőleg vegyítettek s valószínűleg egyik sem teljesen kristályos állapotú. A $Ca(OH)_2$ egy része ugyancsak vegyített lehet más hidrált fázisokkal és csak részben kristályos.

A hidrált cement összetétele kémiai képletekkel nincs egyértelműen definiálva, jelentős változások lehetségesek. A kalciumszilikát-hidrátban például (CSH), mely a C_3S -ből keletkezik s a legfontosabb vegyület a szilárdság létrehozása szempontjából — a Ca : Si arány 0,8—1,33 között változik. A CSH típusú vegyületek hasonlítanak a természetes tobermorit-ásványhoz. *Taylor* (1961) vizsgálatokat végzett CSH vegyületekkel, s azokat vízzel és mészoldatokkal kezelte. Mészdús oldatok jelenlétében a CSH mésztartalma nőtt, az oldat kis mésztartalma esetén viszont csökkent. Ezért azután a pórusvíz a hidratáló cementből meszet képes kivonni akkor, ha annak mésztartalma az agyaggal való reakció miatt kicsiny.

Brunauer és *Copeland* (1964) nyomán a portlandcementben előforduló vegyületek víz hozzáadásakor a következőképpen alakulnak át.

$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ trikalcium-szilikát	+ 6 H_2O víz	= $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ tobermorit-gél	+ 3 Ca(OH)_2 kalcium-hidroxid
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ bikalcium-szilikát	+ 4 H_2O víz	= $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ tobermorit-gél	+ Ca(OH)_2 kalcium-hidroxid
$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ tetrakalcium-alumino-ferrit	+ 10 H_2O víz	+ 2Ca(OH)_2 kalcium-hidroxid	= $6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ kalciumaluminoferrit-hidrát
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ trikalcium-aluminát	+ 12 H_2O víz	+ Ca(OH)_2 kalcium-hidroxid	= $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca(OH)}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ tetrakalciumaluminát-hidrát
$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ trikalcium-aluminát	+ 10 H_2O víz	+ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ gipsz	= $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ kalciummonoszulfo-aluminát

* A cementkémiaiában használt írásmód szerint: C = CaO; S = SiO_2 ; A = Al_2O_3 ; F = Fe_2O_3 ; H = H_2O .

A két felső sor — az itt felsorolt anyagok teszik ki a portlandcement 75%-át — azt mutatja, hogy a kétféle kalcium-szilikát hidrálása során új vegyületek keletkeznek: a mész és a tobermorit-gél. A szilárdulás szempontjából a legfontosabb szerepet ez utóbbi játsza; a kötést, a szilárdságot és a térfogatváltozást főként ez határozza meg.

A hidrált kalcium-szilikátok összetételében való változások nem feltétlenül járnak együtt röntgen-képük változásával. A CSH Ca : Si arányától függetlenül a röntgen-kép hasonlít a tobermorit képezéhez.

Ahhoz, hogy a cement—agyag keverékben járulékos kötőerők lépjenek fel, az is szükséges, hogy az agyagban levő szilikátok és alumínátok oldhatók legyenek. Az agyagásványok oldhatósága nem olyan egyértelműen definiált folyamat, mint azt egyéb kémiai vegyületekkel kapcsolatban ismerjük. A jelenlevő szennyeződések, az anyagok kristályosodási foka, a szemcsék nagysága stb. mind kihat az oldhatóságra. Általában a savak alumínium- és egyéb fém-oxidokat választanak le az agyagásványokról, míg a lúgok főként a szilikátokat oldják, bár az alumínátokat a nagy pH-jú környezet is kikezdi. *Correns* (1961) észlelte, hogy kis mennyiségű, montmorillonitból és kaolinitből származó A_2O_3 és SiO_2 desztillált vízben is oldódott. *Hashimoto* és *Jackson* (1960) megfigyelték, hogy kályhában szárított kaolinitből 3%, montmorillonitból 8% SiO_2 oldódott 0,5 N Na(OH)-ban való forralás során. Várható, hogy az agyagásványok annál jobban oldódnak, minél kisebb a szemcsenagyság és minél kisebb a kristályosodási fok. A háromrétegű ásványok, amilyen pl. a montmorillonit, jobban oldódnak, mint a kétrétegűek, amilyen pl. a kaolinit, mert az előbbieket fajlagos felülete nagyobb s mert a kationoknak a rétegek közé való behatolásával szemben kisebb az ellenállása. Ha a qáziscserélő képesség nagy, akkor egyes kationok, melyek különben cementáló anyagot alkottak volna, lekötődnek az ásvány felületén. Az agyagásványok mellett jelenlevő egyéb talajalkotók, különösen a finom eloszlású amorf szilikátok és alumínátok, kémiai hatásoknak kevésbé állnak ellen s cementáló anyagokat szolgáltathatnak. Az ilyen komponensek a cementstabilizációban fontos szerepet játszhatnak.

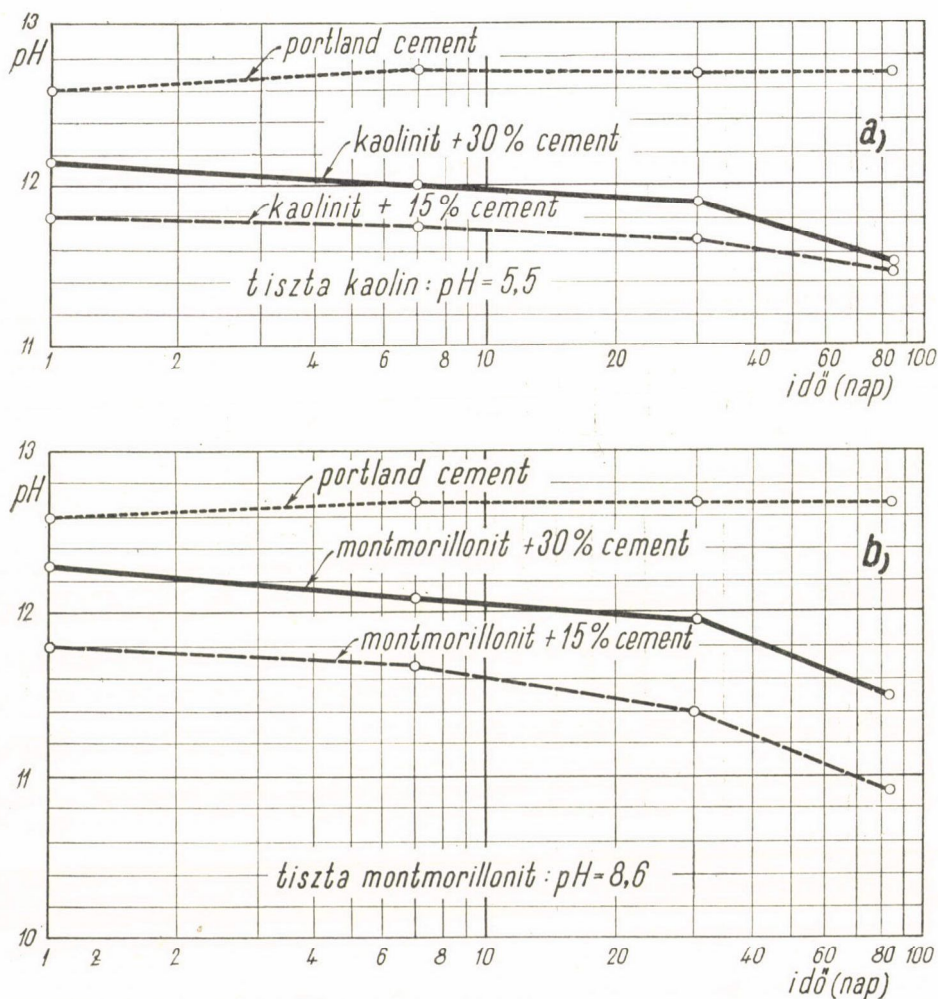
A portlandcement hidratálása során mész keletkezik, ezért várható, hogy a mész és az agyagásványok közötti kölcsönhatás is szerepet játszik a cement és agyag kölcsönhatásának folyamatában. Az agyagásványok és a mész közötti reakciók két típusba sorolhatók: gyorsan lezajlókra (ioncsere és pelyhesedés) és lassú folyamatokra (karbonatizáció, puzzolános reakció és új anyagok képződése). E reakciókkal a mész-stabilizáció tárgyalása során foglalkozunk részletesebben, itt csak annyit jegyzünk meg, hogy a pelyhesedés és az ioncsere gyors lezajlása után, az agyag csereképeségének kielégítése után fennmaradó mész reakcióba képes lépni az agyagásványokkal. A reakció termékei amorfak, de később kristályos formát öltenek. A mész jobban megtámadja a montmorillonitot, mint a kaolinitot.

A fenti kutatási eredmények alapján már kidolgozható az agyag és cement kölcsönhatásának hipotézise. Először is az agyag—cement keverék szilárdulásában különböztessünk meg elsődleges és másodlagos folyamatokat. Elsődleges folyamatnak tekinthető a hidrolízis és a cement hidratációja. Ezek során a szokásos hidratációs termékek keletkeznek s megnő a víz pH-értéke. Az ebben a periódusban („in statu nascendi”) képződő kalcium-hidroxid hevesebb reakciókra képes, mint a közönséges mész.

Az agyag a másodlagos folyamatokban játszik szerepet. A cement

hidratációja során képződő kalcium-ionok, az agyagot először *kalcium-agyaggá* változtatják és növelik annak a pelyhesedésnek az intenzitását, amit a teljes elektrolit-tartalomnak a cement-adagolás miatt fellépő megnövekedése indított el. A kalcium-hidroxid azonkívül megtámadja az agyagrészecskéket és az amorf elegyrészeket. A pórusvízben oldott szilikátok és aluminátok vegyülnek a kalcium-ionokkal és járulékos cementáló anyag csapódik ki. Ami kalcium-hidroxid így a másodlagos folyamatok során elhasználódik, az bizonyos mértékig pótlódik a cement hidratálása során fellépő mészből; így tehát az elsődleges reakciók termékei anyagot szolgáltatnak ahhoz, hogy a másodlagos folyamatok folytatódhassanak.

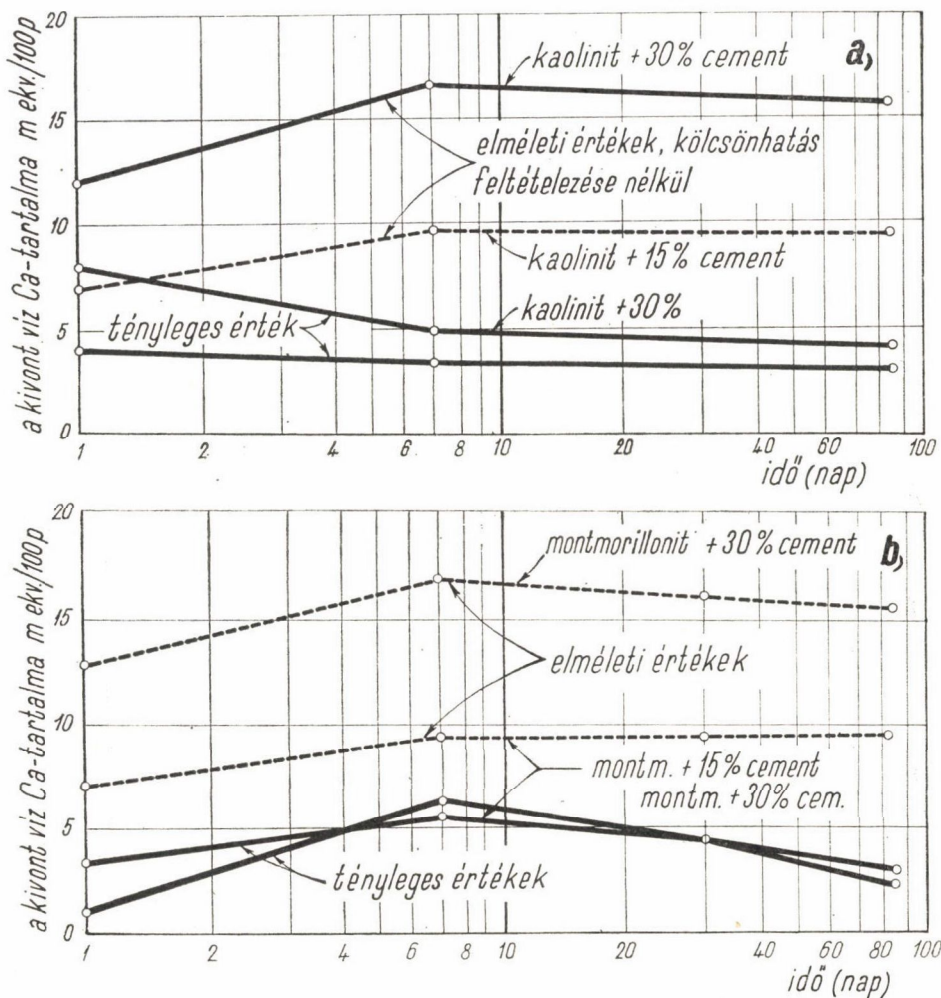
A másodlagos folyamatok során a cementáló anyag az agyagszemcsék felületén, vagy annak közvetlen közelében képződik, ezért a pelyhes agyag-



6. ábra. Agyagásványok és portlandcement keverékének pH-értéke a kezelési idő függvényében. a — kísérletek kaolinnal; b — kísérletek montmorillonittal

részecskéket az érintkezési pontokon köti, ill. „ragasztja” össze. Még erősebb kötések keletkezhetnek a hidratáló cementpép és a cementszemcsék bevonó agyagrészecskék között. Az is lehetséges, hogy az agyagásványok és egyes cement-hidratációs termékek azonos szerkezete következtében a részecskék „összeépülnek” (epitaxia).

A finom talajszemcséket – agyagot – tartalmazó cementtalajban tehát „elsődleges” és „másodlagos” cementáló anyagok képződnek. Az elsődleges termékek nagy szilárdságú adalékokká szilárdulnak és a normális, betonban vagy habarcsban hidratált cementtől csak kisebb mésztartalmukban különböznek. A másodlagos fázisok a cementtalaj tartósságát és szilárdságát járulékos cementáló anyag létrehozása révén növelik, mely a szemcsék közötti kötés szilárdságát fokozza.



7. ábra. Agyagásványok és portlandcement keverékének kalciumtartalma a kezelési idő függvényében. a — kaolinnal; b — montmorillonittal végzett kísérletek

A bemutatott hipotézist jól igazolják *Herzog és Mitchell* (1963) részletes kísérletei. Ezek közül mutatunk be néhány eredményt.

A 6. ábrán a pH-érték változását látjuk a szilárdulási folyamat során. Hidratáló cementet tartalmazó minták nagy pH-értéke annak tulajdonítható, hogy a hidratálás során képződő $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -ből OH^- -ionok disszociálnak. A tiszta portlandcement, a C_3S alkotó és a tiszta agyag pH-értéke időben változatlan maradt, viszont a cementtalaj pH-értéke csökkent. Ez arra utal, hogy a szilárdulás során az OH^- -ionok mennyiségét fogyasztó folyamat megy végbe.

Meghatározva cement—talaj keverékek szabad kalcium-hidroxid tartalmát, a 7. ábrán feltüntetett eredményeket kapták. Az ábra egyrészt feltünteti azokat az elméleti értékeket, melyek hidratáló cementpépeken végzett mérések alapján azzal a feltételezéssel számíthatók, hogy a cement és az agyag között kölcsönhatás nem lép fel. A tényleges mérések ennél jóval kisebb értékeket mutattak; joggal feltételezhető, hogy a hidratáció során létrejött, de a cementtalajból „hiányzó” mész az agyaggal puzzolános reakcióba lépett; a mész és az agyagásványok között kölcsönhatás keletkezett.

A különböző kísérletek eredményei alapján a cementtalaj szerkezete a következőképpen képzelhető el. Minthogy a cement-részecskék az agyagszemcsékhez viszonyítva nagyon nagyok, az a valószínű, hogy kialakul egy agyagcement vázszerkezet és egy agyag-mátrix. A vázszerkezet egységei egy hidrált cementgélből álló magot tartalmaznak, ehhez módosult agyagrészecskékből álló rétegek kapcsolódnak. Az agyag-részecskék módosulását az agyagrészecskékből és az amorf alkatrészekből származó szilikátok és alumínátok oldódása okozza, a nagy pH-val rendelkező környezetben, amit az erősen reakcióképes $\text{Ca}(\text{OH})_2$ idéz elő. Az oldott anyag kalcium-ionokkal társul és járulékos cementáló anyagot hoz létre, mely összeköti a szomszédos agyagrészecskéket. A cement-részecskék szomszédságában levő anyag olyan halmazokat alkot, mely a szemcsék közötti térbe kisebb mértékben módosult agyagot zár be. Montmorillonit esetében a megváltozott agyag-részecskék elvesztik térfogatváltozó jellegzetességüket.

A cementtalajban végbemenő folyamatok ismeretében levonhatjuk azt a következtetést is, hogy minél nagyobb egy talaj fajlagos felülete, annál több cementre van szükség adott szilárdság eléréséhez.

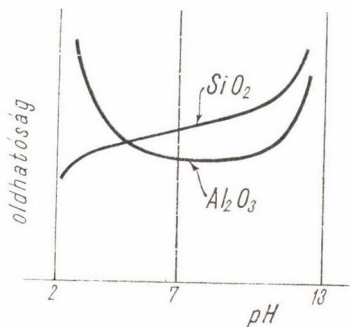
A mész fizikai és kémiai hatásának mechanizmusa

Talajok mésszel való stabilizálásán méssznek talajjal való összekeverését és a keveréknek a legkedvezőbb víztartalom melletti betömörítését értjük. A mésszagolás csökkenti a talaj képlékenységet, növeli szilárdságát és tartósságát, csökkenti a talaj vízfelvevő képességét és duzzadását. A stabilizáló hatás nem mechanikai szilárdítás, hanem kémiai folyamatok miatt következik be.

A mész talajjal való összekeverése után lejátszódó folyamatokról a következő felfogás alakult ki.

Az összekeverés után azonnal jelentkezik a talajszerkezet megváltozása: pelyhesedés, koaguláció lép fel. Az agyagszemcsék jóval nagyobb, iszap-homokliszt frakcióba tartozó részecskékké állnak össze. Ez megváltoztatja a konszisztencia-határokat és a tömörítéssel kapcsolatos tulajdonságokat, s ez

gyakorlatilag azzal jár, hogy a talaj a földmunka során sokkal könnyebben kezelhető lesz. A pelyhesedés okául rendszerint az *ioncsere*t szokás megjelölni: a disszociáló kalcium-ionok elfoglalják egyéb, rendszerint nátrium-ionok helyét az agyagásványok adszorpciós komplexumában. Az ioncsere azonban nem tekinthető az említett változások egyetlen okának, hisz e változások olyan talajokban is jelentkeznek, melyek már a mészhidrát adagolása előtt is kalcium-ionokkal telítve voltak. Ugyancsak nem kielégítő a lassú reakciók során fellépő folyamatok magyarázata. A létrejövő karbonatizáció során kalcium-karbonát keletkezik s ez gyenge cementáló hatást fejt ki. További hatás az ún. *puzzolános* reakció, melynek eredménye a tömörített talaj—mész keverék lassú cementálódása. Ennek okai nem teljesen tisztázottak, az oltott-



8. ábra. Szilikát és aluminát oldhatósága a környezet pH-értékének függvényében

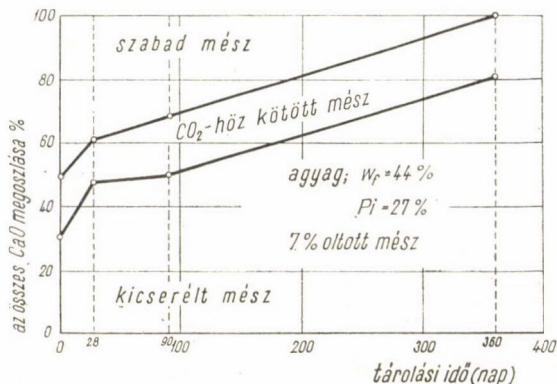
mész és a talaj szilikát- és aluminát-ásványai közötti nedvesség jelenlétében létrejövő kölcsönhatás hozza létre. A puzzolános reakcióban valószínűleg az is szerepet játszik, hogy az agyagásványokból aluminát- és szilikát-elemek válnak le, ezeknek oldhatósága pedig a pH-érték függvénye. A mész hozzáadása megnöveli a talaj víztartalmának pH-értékét, s ezzel az oldhatóság a 8. ábrán közölt diagramnak megfelelően megnő. Az oldás révén azután e vegyületek átrendeződhetnek.

Mindezen jelenségeket eddig legrészletesebben *W. Brand* (1962) vette vizsgálat alá. Mikroszkópos, röntgenográfiai, elektronmikroszkópos és kémiai vizsgálatokat végzett és kimutatta, hogy a kalcium-hidroxid és a talaj elemi részecskéi között reakciók lépnek fel és új ásványok alakulnak ki. A reakciókban elsősorban az agyagásványok vesznek részt; valószínűleg kristályrácsaikban gyakran előforduló hibás helyek alkotják a reakciók kiindulópontját. A reakció sebességét és intenzitását a mészadagolás következtében kialakuló nagy pH-érték jelentősen előmozdítja. A reakció egyes termékeit vékony csiszolatok segítségével azonosítani lehetett s mód nyílt a reakció-mechanizmus megismerésére. Az egyes stádiumok a következőképpen követik egymást.

A *kezdeti stádiumot* az adagolt Ca(OH)_2 Ca^{++} -és OH^- -ionokra való disszociációja indítja el; s ez megváltoztatja az agyagásványok elektromos felületi erőt. Az adagolt Ca(OH)_2 jórészt felveszti kristályos alakját; röntgenvizsgálattal már nem mutatható ki. Amorf alakot vesz fel és átmenetet alkot így a gél-stádiumba. A legfinomabb talajrészecskék koagulálnak s ezért megváltozik a talaj szerkezete és konszisztenciája.

A gél-stádium a szilárdság szempontjából a legfontosabb. A gél-anyag összeköti és összeragasztja az ásványi szemcséket s megváltoztatja a pórus-szerkezetet. Nagyon valószínű, hogy a gél-stádium az oka a mészhidráttal stabilizált talaj csökkent vízfelvételének és nagyobb vízellenálló képességének. A gél-stádiumot mikroszkóppal világosan fel lehetett ismerni; vegyi és kristályos összetétele azonban nem volt megállapítható. Valószínűleg tobermorit-szerű kalciumszilikát-hidrátokból áll.

A gél anyagából lassan mikroszkóppal látható kristályok, „neolit”-ok kristályosodnak ki és ezek alkotják a „neolit”-stádiumot, mely a szilárdulás döntő részét jelenti. A víz hatásának viszont ebben a stádiumában valamivel gyengébben áll ellen a talaj, mint a gél-stádiumban.



9. ábra. A talajban levő CaO lekötési módjának változása az idő függvényében

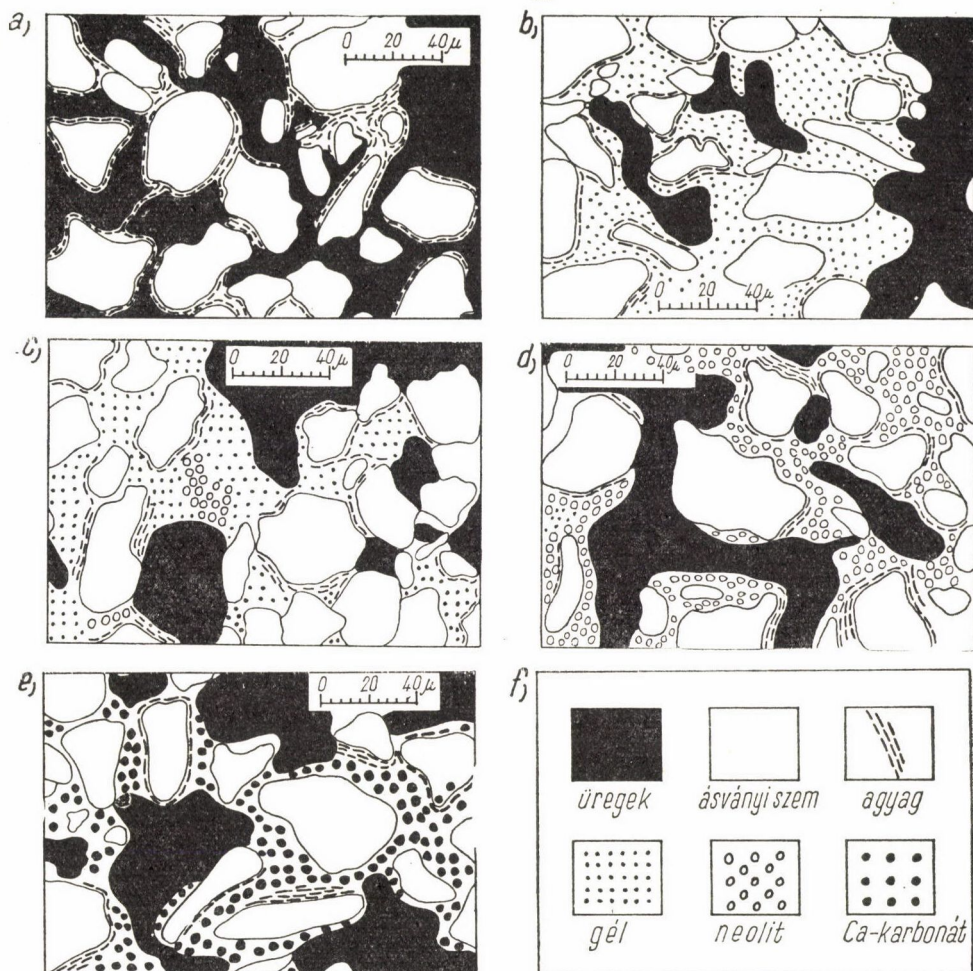
A karbonát-stádium kialakulása csak levegőn tárolt mintákon volt megfigyelhető. A levegő hatására a felszínen szferolitikus kalcium-karbonátok alakulnak ki s ezek az ásványi szemcsék között tömött „kristályos habarcsot” alkotnak. Gyakorlati szempontból nincs jelentősége, mert a mésszel stabilizált út-talaj felszínét légmentesen le szokás zárni.

A leírt folyamat során jellegzetes változást mutat a talajban levő CaO megoszlása. Egy példát a 9. ábra mutat: világosan kiténik, hogy a mészhidrát és a talaj között reakciók következnek be.

Brand a szilárduló talajból vékony csiszolatokat készített s ezeket polarizációs mikroszkópban vizsgálta meg. A felvételekről ügyes sematikus rajzokat állított elő, melyek a leírt folyamatot nagyon világosan szemléltetik. Egy sorozatot e sematikus rajzokból — egy durva iszap szilárdulása során felvett képeket — a 10. ábrán mutatunk be; a felhasznált jelek magyarázatát az ábra jobb alsó része adja meg.

Az a ábra az eredeti talaj finom vázszerkezetét mutatja, a durva iszap-szemcsék körül elhelyezkedő lekötött agyag-részecskéekkel. A b ábrán a gél-stádium kifejlődését látjuk. Az a ábrán látott váz szemcséit kocsonyaszerű anyag ragasztja össze. Mésszadalolás: 7%.

A c ábrán már megindult „neolit”-képződést látunk. Egyes szemcséket már kristályszerű „neolit-hidak” kötnek össze. A neolitok a d ábrán már erősen kifejezték s a gél-anyaghoz hasonlóan összefüggő tömeget alkotnak.



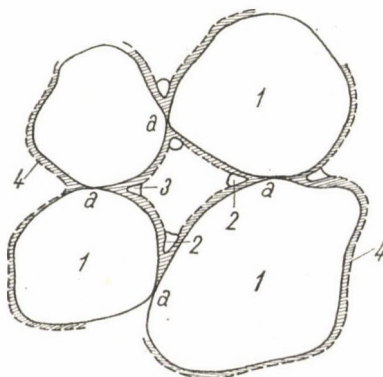
10. ábra. Szilárduló mésztalaj vékony csiszolatainak mikroszkópi képei alapján készített szematikus ábrák, a szilárdulási folyamat jellemzésére. *a* – eredeti talaj; *b* – gél stádium; *c* – a neolit-képződés megindulása; *d* – kifejlett neolit-stádium; *e* – karbonát-stádium; *f* – az ábrákon használt jelek magyarázata

Ez már a neolit-stádium. Végül az *e* ábrán a karbonát-stádium kialakulását látjuk: a finom váz jól kifejlődött finoman kristályos karbonát-burokkal van összeragasztva. A pórusok legömbölyödtek.

A bitumenes stabilizáció fiziko-kémiai vonatkozásai

Valamely szemcseshalmaz, víz és bitumen keverésekor bonyolult fizikai és kémiai folyamatok indulnak meg. A stabilizációs eljárásnak, legalábbis kohézió nélküli szemcsés talajban, az a célja, hogy az egyes szemcsék bitumen-hártyával vonódjanak be, mely egyrészt elég vékony ahhoz, hogy az egyes

szemcsék elmozdulásakor jelentkező súrlódást ne csökkentse döntő mértékben, másrészt pedig elég vastag ahhoz, hogy a ragasztó hatás az egyes szemcsék között érvényesülni tudjon. Ez a helyzet akkor fog előállni, ha a szemcsehalmazra tartósan működő feszültség elegendő ahhoz, hogy a bitumennel bevont szemcsék érintkezési pontja körüli területről a bitumen lassan kinyomódjék s a vékony bitumenhártya két vagy több szemcsét a 11. ábrán bemutatott módon egységesen fogjon körül, miközben a szilárd szemcsék többé-kevésbé közvetlenül érintkeznek. Ha nyírófeszültségek működnek az



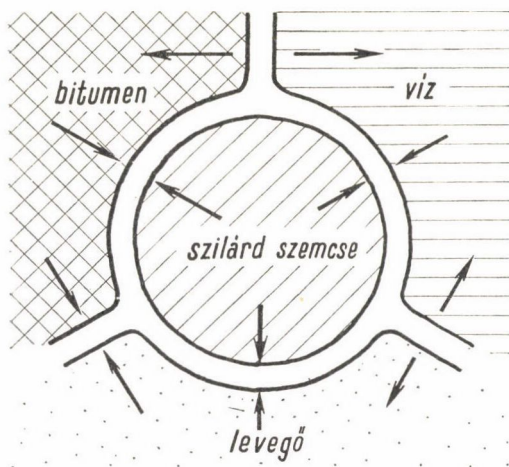
11. ábra. A bitumenes kötőanyag elhelyezkedése homokban. 1 — szilárd szemese; 2 — légbuborék; 3 — pórusvíz; 4 — bitumenhártya; a — szilárd szemcsék érintkezési pontjai

ilyen rendszerre, akkor a bitumenhártya a normál és tangenciális feszültségek egyidejű működésének hatására számos szemcse érintkezési pontjában felszakad és érvényesülnek a jelentős súrlódási ellenállások. A felszakadt bitumenhártya azután újból kialakul és helyreáll, mihelyt a mozgás megszűnt. Minthogy az érintkezési pont környékét a bitumen jelentős tapadása révén mintegy „megvédi”, oda víz nem jut be s így a ragasztó hatás újból helyre tud állni.

A bitumenhártyával bevont szemcsék között helyezkedik el azután a víz és a levegő. E két anyag elhelyezkedésének — legalábbis minőségi — vizsgálatához vegyük figyelembe azt a gyakorlati tapasztalatot (l. *Cságoty-Buócz*, 1961), hogy a teljesen száraz, vagy néhány tized százalék vizet tartalmazó ásványi szemcsehalmaz bitumennel nehezen, lassan keveredik. A nagy víztartalmú keverékek is nehezen, vagy egyáltalán nem keverednek, viszont a közepes víztartalmú, 4–12% vizet tartalmazó szemcsehalmazok jól és könnyen keverhetők s a szemcsék egyenletesen bitumennel vonódnak be.

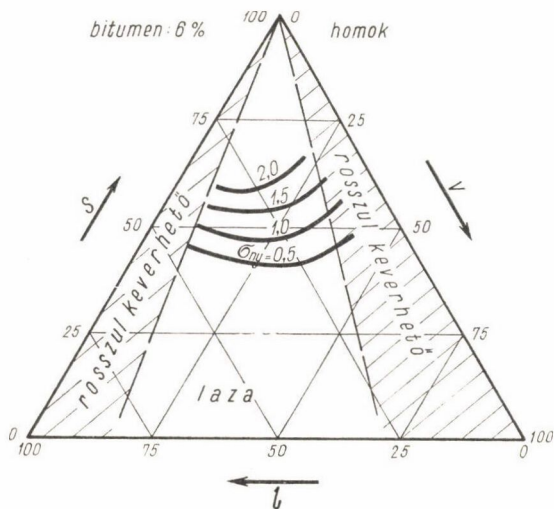
A leírt jelenség magyarázata az egyes elegyrészek közötti felületi feszültségi értékekben és a nedvesítési energiában rejlik. Bármely anyagról is van szó, ha azzal valamely más anyagot be akarunk vonni, az csak akkor fog sikerülni, ha a két anyag közötti adhézió nagyobb, mint az egyik anyag kohéziója. Az adhéziók nagyságát a stabilizációban résztvevő anyagok között — normál, kb. 20° C-os hőmérséklet mellett — a 12. ábra érzékelteti. Ennek alapján nyilvánvaló, hogy ha a szemcsés anyag száraz, akkor a szemcsék túlnyomó részét levegő veszi körül, a víz csak egyes szegletekben, mint szeglet-

víz tárolódik. Ez a helyzet az előbb említett, néhány tized %-os víztartalom mellett. A levegő gázai viszont a szilárd szemcse felületén erősen megtapadnak, ezért azután, ha ehhez a száraz talajhoz hígított bitumént adagolunk, az nem lesz képes a lekötött levegőt teljes mértékben kiszorítani (ennek a



12. ábra. Adhézió fajlagos értéke a bitumenes talajstabilizáció anyagai között

bitumen belső nyírási ellenállása szab határt), s így a szemcsefelületnek csak kicsiny részén lesz közvetlen érintkezés, tapadás és bitumennel való bevonódás. Ha viszont sok a víz, az nem csupán a szemcsék között, vagy azok körül mint szegletvíz, vagy filmvíz lesz jelen, hanem víz fogja kitölteni a



13. ábra. Bitumennel stabilizált talaj szilárdsága a fázisok szerinti összetétel függvényében

szemcsék közötti nagyobb hézagokat is. Ahhoz, hogy a bitumen és a talajszemese között a tapadás létrejöhessen, először ki kellene szorítani a hézagokból ezt a vizet, utána pedig le kellene választani a szemcsék felületéről a filmvizet, ez viszont az adhéziókban jelentkező különbségek miatt nem lesz lehetséges. Ha viszont a víz és levegő térfogata a szemcsék közötti hézagokban az említett kedvező arányú, akkor a víz és levegő közötti taszító hatás következtében azok határfelülete mentén a bitumen utat tud találni a szemese felületéhez és ott erős adhéziója révén lekötődik s létrehozza a kívánt ragasztó hatást. A folyamat sebessége egyrészt az eredő fajlagos vonzóerő nagyságával, másrészt pedig — legalábbis egy bizonyos határig — a szemese-halmaz felületétől függ.

A fentiekből következik, hogy a bitumenes stabilizáció szempontjából a talaj fázisok szerinti összetételének — az s , v , l értékhármasnak — van egy optimuma, amely mellett egyrészt a keverés a leghatásosabban végrehajtható, másrészt pedig, ennek következményeként, a keverék szilárdsága a legnagyobb lesz. Ezt számos mérési eredmény igazolja.

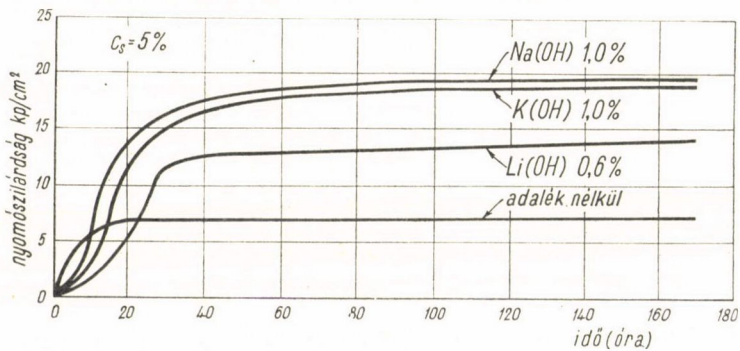
Sajnos, még nem rendelkezünk elegendő adattal ahhoz, hogy az optimális tartományokat legalábbis egyes jellegzetes talajféleségekre le tudnánk határolni, ezért a 13. ábra háromszögdiagramja is csak becslésszerű tájékoztatást nyújthat, az ábrán feltüntetett laboratóriumi kísérleti eredmények nem általánosíthatók.

Adalékok hatása stabilizált talajok tulajdonságaira

Az említett fő stabilizáló anyagok mellett újabban kísérleteket végeztek azzal a céllal, hogy egyes járulékos — tehát az alapvető stabilizáló anyag mellett adagolt — anyagoknak a stabilizált talajra való hatását megvizsgálják. E kis mennyiségű adalékok sok esetben igen kedvezően javítanak egyes talajtulajdonságokat, így pl. használatukkal jelentősen nagyobb szilárdság érhető el, vagy pedig az előírt szilárdság gazdaságosabban, kisebb mennyiségű stabilizátorral érhető el.

A következőkben bemutatunk néhány kísérleti eredményt a kis mennyiségű adagolt kémikáliák hatásáról.

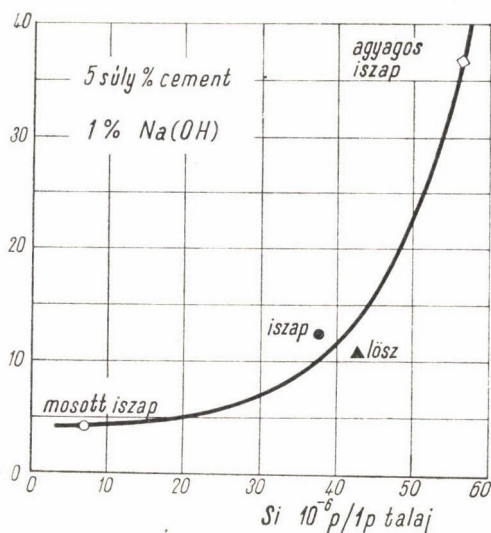
Cementtalajok szilárdságának és egyéb tulajdonságainak javítása végett már kezdettől fogva alkalmaztak kis mennyiségben különféle vegyületeket.



14. ábra. Alkáli fém-hidroxidok hatása cementtel stabilizált iszap nyomószilárdságára

Nagyon kedvező tapasztalatokat szereztek *alkáli fémek* — nátrium, kálium, lítium — egyes vegyületeinek adagolásával, de más anyagok alkalmazására is folytak kísérletek.

Alkáli fémek hidroxidjainak és számos sójának 1–4 súly%-ban való adagolása a cementtalajok nyomószilárdságát a 14. ábrán feltüntetett módon növeli. Általában annál kisebb a hatás, minél nagyobb a talaj plasztikus indexe, vagy a szervesanyag-tartalom. Iszapokban a nátriumvegyületek hatása a következő sorrend szerint csökken: szulfát — alumínát — metaszilikát —



15. ábra. A kivonható szilikáttartalom hatása az 1% nátrium-hidroxiddal kezelt talaj-cement nyomószilárdságára (kp/cm²)

karbonát — hidroxid — szulfid; az optimális koncentráció az alkáli 1.0 normál értéke a keverővízben. Nagyobb koncentrációk azonos végső szilárdságot adnak ugyan, de lassítják a szilárdulást. Az adalékok hatásossága a talajban levő reakcióképes szilikátok mennyiségétől függ. (L. 15. ábra.)

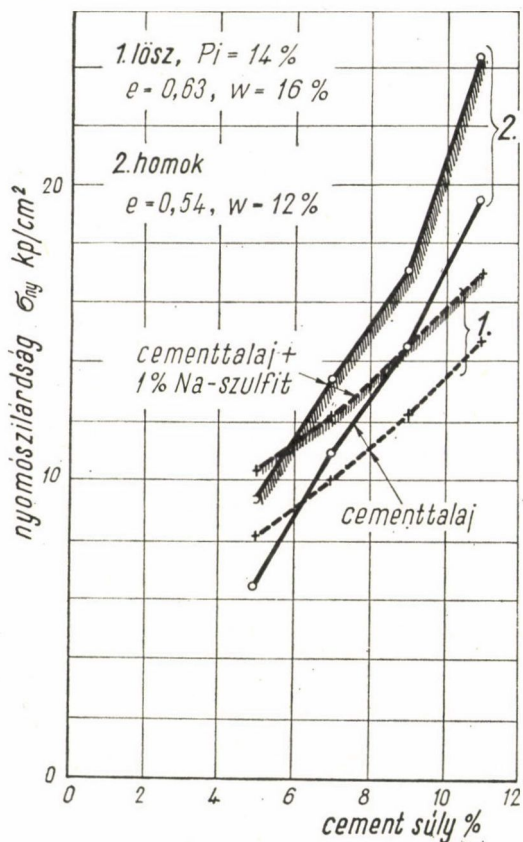
A kedvező hatások a következőképpen magyarázhatók.

Ha cementet talajjal és vízzel keverünk, akkor a cement hidratálása során kezdetben mészhidroxid, kalcium-szilikát és kalcium-alumínát keletkezik. A mészhidroxid a talaj reakcióképes szilikátjaival és alumínátjaival való reakciója azt eredményezi, hogy járulékos kalcium-szilikát és -alumínát jön létre és a pH-érték csökken. A talaj és a cement reakciójának végtermékei hidrált alumínátok és egy kalcium-szilikát gél.

Ha a kötési folyamat során valamilyen alkáli fémvegyület, pl. kausztikus szóda, nátrium-szulfid van jelen, akkor az oldatban a kalcium-ion koncentráció erősen csökken, részben a közönséges ionsere, részben pedig a kausztikus reakció révén.



Ezzel egyidejűleg a hidroxil-ion koncentráció — vagyis a pH-érték — jelentősen nő. A kalcium-koncentráció csökkenése késlelteti az oldhatatlan kalcium-szilikát gél kicsapódását, a pH-érték növekedése pedig meggyorsítja oldható alkáli-szilikátok és -aluminátok képződését. Az alkáli-szilikátok a pórusvíz révén az egész talajtömegben egyenletesen jelen vannak; így a szabad alkálinak a talajjal való reakciója csökkenti a pH-értéket s ezért a



16. ábra. Nátrium-szulfát hatása cementtalaj szilárdságára

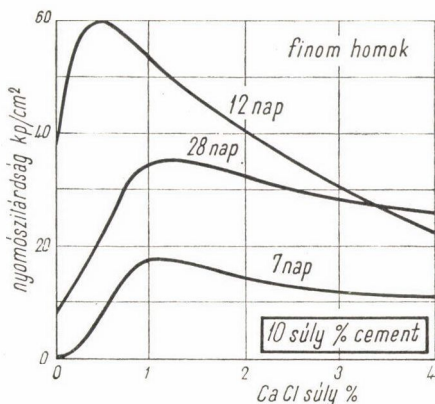
kalcium-ion is oldatba tud jutni. A kalciumnak a pórusvízben egyenletesen eloszlott alkáli-szilikátokkal és -aluminátokkal való reakciója vegyes kalcium-nátrium-szilikát képződéséhez és gél-kialakulásához vezet; ennek mennyisége viszont meghaladja a csak cement esetén képződni képes mennyiséget, s ez ad végül magyarázatot az alkáli fém-vegyületek kedvező hatására.

A 16. ábrán néhány saját kísérleti eredmény illusztrálja a nátrium-szulfid szilárdság-növelő hatását.

A cementtalaj adalékok között megemlíthető még a kalcium-klorid, a bitumen és a bitumen-emulzió.

Kalcium-klorid adagolása egy bizonyos határig szintén növelni képes a nyomószilárdság értékét, mint azt a 17. ábra mutatja. Az adagolás optimális mennyisége 0,6% körül van, ha mind az azonnali, mind a hosszabb időben érvényesülő hatást szem előtt tartjuk. Sok talajban a kalcium-kloridnak nincs meg ez a hatása; mindössze meggyorsítja a cement kötését.

Bitumen-emulzió adagolásával Angliában kísérleteztek. Az emulzió, melyet külön erre a célra dolgoztak ki, finomszemcsés talajhoz keverve egy rövid ideig stabil marad, így a bitumen a talajban jól eloszolhat. Az ezután adagolt cementnek három funkciója van: megtöri az emulziót, hidratáció útján abszorbeálja a felszabaduló nedvességet egy részét és növeli a kezelt és



17. ábra. Kalcium-klorid hatása cementtel stabilizált szerves homok nyomószilárdságára

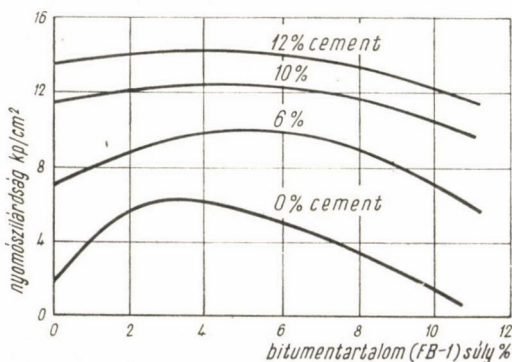
tömörített talaj szilárdságát. A tapasztalatok szerint kedvező hatás eléréséhez 5–7,5% emulzió és 3–5% cement adagolására volt szükség. A „végtermék” a cementtalaj és a bitumentalaj között foglal helyet; kissé merev és eléggé vízzáró.

Bitumen adagolásával a Szovjetunióban (*Bezruk—Knyazjuk*, 1951) és hazánkban (*Quirico*, 1954) folytak kísérletek. Ez utóbbi kísérletek azt mutatták, hogy folyékony bitumen adagolása max. 6% mennyiségig kedvező volt; a nyomószilárdság értéke a cement- és bitumen-adagolás függvényében a 18. ábra szerint alakult. A cement kötését tehát az adagolt bitumen nem gátolta meg.

A mésszel stabilizált talajok tulajdonságai kis mennyiségű adalékokkal szintén gazdaságosan javíthatók.

Bizonyos természetes anyagok, mint pl. vulkáni hamu, mészadagolásra jobban reagálnak, mint a közönséges talajok. Az ilyen anyagokat *puzzolánoknak* szokás nevezni. Főként vulkáni eredetűek; nem kristályosak, ionos szerkezetűek. Vulkáni hamu, vagy tufa, trasz (= szilikátos, trahitikus tufa) formájában fordulnak elő. Aktivitásuk annál nagyobb, minél kisebb a kristályosodás foka. Ha ilyen anyagot adagolunk a talajhoz, a mésszel való stabilizálás sokkal hatásosabb lehet. Természetes eredetű ilyen anyag adagolása nálunk nem volna viszont gazdaságos; vannak azonban hasonló hatású, mesterséges anyagok is. Ilyen elsősorban a *pernye*, mely főleg hőerőművek környékén nagy tömegekben gyűlik össze és jelent tárolási-szállítási problémát.

Anyaga zömében gömbalakú nem kristályos szilikát és aluminát részecskékből és mágneses vasoxid (Fe_3O_4) legömbölyödött részecskéiből áll. Kalciumoxid csak más anyagokkal kombinációban fordul elő, a szénben levő mészkő égetése következtében. Az el nem égett szénrészecskék mennyisége — ezek jelenléte mind a tüzelés, mind a pernye minősége szempontjából káros — erősen változó, a tüzelés hatásosságától függ. A szén hígítja a puzzolános szemcséket, növeli a vízszükségletet és csökkenti a stabilizált talaj legnagyobb száraz tömörségét. A pernye puzzolános aktivitása szemeloszlásának finomságától függ; durva pernye adagolása nem eredményes. A pernye minősége lényegesen javul ha megőröljük, ez azonban csak ritkán gazdaságos.



18. ábra. Löss egyirányú nyomószilárdságának változása a bitumen- és cementtartalom függvényében. $w = w_{opt} = 9\%$

Előfordulhat, hogy a pernye-szemcsék elektromos töltéssel bírnak, ami felhasználása, tömörítése szempontjából káros s a pernye felhasználását lehetetlenné teszi. Adott esetben módszert kell keresni az elektromos töltés kisütésére.

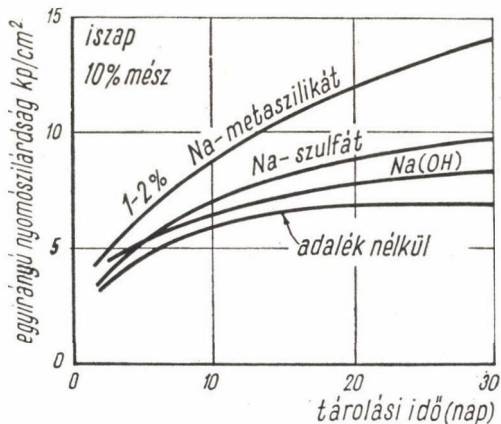
Pernye felhasználásának az a legnagyobb nehézsége, hogy minősége még egy és ugyanazon üzem esetén is erősen változó. Az eltüzelt szén összetétele, a tüzelés hőfoka és hatásossága, az időjárás a változásokat okozó tényezők, s ezek nem tehetők egyenletessé s így az állandó előnyös hatás nehezen érhető el.

A pernye hatása a stabilizáció szempontjából alapszabályban véve ugyanaz, mint a mészé, a reakciók ugyanazok. Voltaképpen a felsoroltak közül a puzzolános reakciót teszi erősebbé. A szilárdulás, az egyéb reakciók általában lassan mennek végbe, s vannak iszapok és agyagok, melyek mész + pernye adagolása esetén nem adnak jobb eredményt, mint tisztán mésszel való stabilizálás esetén. Sajnos, arra egyelőre nincs mód, hogy a pernye és a talaj külön való vizsgálata alapján a hatást előre megmondjuk.

A pernyén kívül nagyszámú különféle anyagot próbáltak ki a mésztalaj tulajdonságainak javítására. A kis mennyiségben adagolt anyagok célja vagy a szilárdság növelése, vagy a fő-stabilizátor szükséges mennyiségének a csökkentése. Ezek közül az anyagok közül csak kevés hozott olyan eredményt, mely egyúttal gazdaságilag is kedvező lehet; még leginkább itt is a Na-vegyületek váltak be. A szilárdság növekedését Na-vegyületek adagolása esetén a 19. ábra mutatja be egy iszap esetére.

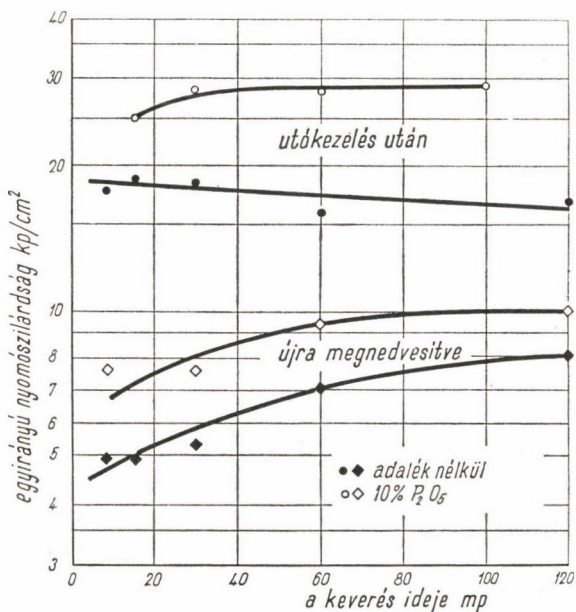
Legújabbán *Fülöp* (1967) végzett átfogó kísérletet a pernye stabilizáló hatásának megismerése céljából.

Az utóbbi években részletes vizsgálatok folytak (*Michaels* és *Puzinauskas*, 1956 és 1958) a bitumenes talajstabilizáció különböző adalékokkal való meg-



19. ábra. Mésszel stabilizált iszap nyomószilárdságának növekedése nátriumvegyületek adagolása esetén

javítására. A legtöbbet ígérő eredményeket foszforpentoxid (P_2O_5) adagolása szolgáltatta. Egy jellegzetes eredményt a 20. ábra mutat be, feltüntetve egy iszap egyirányú nyomószilárdságát a keverési idő függvényében, foszforpentoxid adagolásával és anélkül.

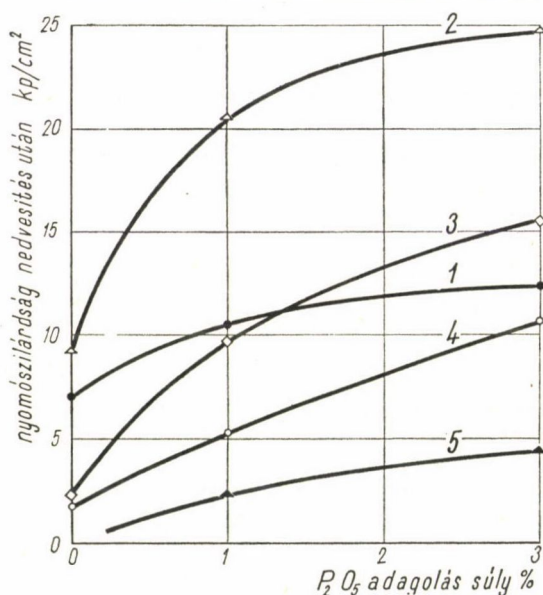


20. ábra. A keverési idő és a foszforpentoxid-adagolás hatása bitumennel stabilizált talaj szilárdságára

Egy részletesebb vizsgálati eredményt szolgáltat a 21. ábra, mely öt különböző talaj egyirányú nyomószilárdságát szemlélteti, 10% bitumen és különböző mennyiségű foszforpentoxid adagolása esetén. A hatás a viszonylag durvább szemcséjű talajok esetén nagyobb. Kedvező eredmények adódtak amin-vegyületek adagolásával is, de csak finomszemcséjű talajok esetében.

Michaels és Puzinauskas e jelentős szilárdságnövelő hatást a következőképpen magyarázzák.

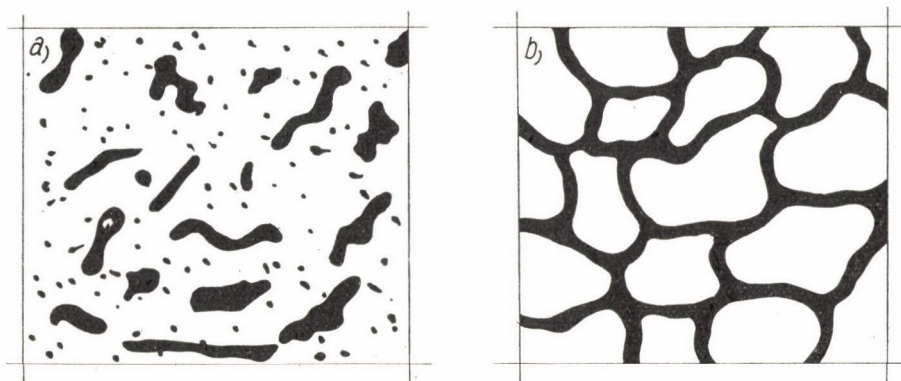
N ^o	Talajmegnevezés	W _p	P _i	W _{opt}	d < 0,1	d < 0,002
1	• homokos iszap	-	-	14	47	3
2	△ agyagos iszap	20	6	12	62	18
3	◇ homokos agyag	32	14	16	61	18
4	○ lösz	41	15	18	100	3
5	▲ agyag	60	32	22	100	35



21. ábra. Bitumennel stabilizált talajok nyomószilárdsága a foszforpentoxid-adagolás függvényében

Amikor valamely nedves, kötött talajt az általában szokásos mennyiségű hígított bitumennel keverünk, a talajban levő teljes folyadékmennyiség rendszerint több, mint amennyi a tömörített talaj hézagait ki tudja tölteni. A keverés során a nem nedvesítő bitumenes fázis kicsiny gömböcskék, vagy szálak alakjában diszpergálódik a talajszemcsék, vagy összetapadt szemcsehalmazok között; az elkeverődés foka (amit a gömböcskék átlagos átmérőjével és az eloszlás egyenletességével jellemezhetünk) és az összetapadt halmazok szét-töredezése a keverés időtartamától és hatásosságától függ. A keverék tömörítése során a szabad hézagtér csökken, az illóanyag (víz és hígító) egy része elpárolog; a diszpergált bitumen-részecskék pedig szálakká és lemezekké saj-

tolódnak össze s ezek a hézagter jó részét elfoglalják. A kapilláris erők következtében az aszfalt-fázis a nagyobb pórusokra és csatornákra korlátozódik, míg a víz a talajtömeg finom szövetének pórusait foglalja el. A keverék ebben a stádiumban szemcsék és szemcsecsomók tömör halmaza, melyeket víz nedvesít be s többé-kevésbé összefüggő bitumen-részecskék vesznek körül. (L. 22. ábra.) Ha a keverék kiszárad, a zsugorodás némi további diszperziót idézne ugyan elő, de ezt a viszkozitás egyidejű megnövekedése gátolja. Ha a talaj nem rendelkezik saját kohézióval, a bitumen adhéziója a talajszemcséhez a víz elpárolgása során a tömegben kohéziót idéz elő. A létrejött szilárdság durván a bitumennel kitöltött hézagoknak a teljes hézagterfoghathoz való



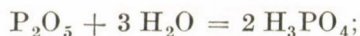
22. ábra. A bitumen elhelyezkedése a talajban. *a* — felületaktív adalékok nélkül; *b* — felületaktív adalékokkal

viszonyszámával lesz arányos. Ha viszont kötött talajhoz kevertünk bitumennel, akkor a bitumen, bár a szemcsék egy részéhez hozzátapad, de jelenléte a száradás során részben megakadályozza a talajszemcsék közötti kötések létrejöttét s minthogy e kötések szilárdsága jóval nagyobb, mint a bitumen és a szemcsék közötti adhézió, ezért azután a keverék száraz szilárdsága csökkenni fog.

Az előzőekben említett adalékanyagok hatása a következőképpen magyarázható. A bitumen adhéziója a szilárd talajszemcsék felületéhez viszonylag kicsiny. Ezek a talajszemcsék kötött talajban részben agyagásványok, melyeknek felületi aktivitása jelentős. E felületeken általában vízfilm kötődik le. Vannak olyan anyagok — ide tartoznak az említett amin-vegyületek —, melyeknek a szemcsfelülethez való vonzódása erősebb, mint a vízé, így molekulái onnan a vizet kiszorítják. Ha azután az agyagásvány így átalakult aktív felülete bitumennel szemben affin, akkor az jól rátapad a szemcsékre. Az adalékok szerepe tehát kettős: egyrészt a szemcsék felületét a bitumennel szemben nedvesíthetővé teszi, másrészt pedig a szemcsék koagulációját elősegítve nagyobb szemcséket hoznak létre, ezzel a fajlagos felület csökken, s így a bevonáshoz szükséges bitumenmennyiség kisebb lesz. Az első hatás a talajt valóban vízállóvá teszi, a bitumen nem cseppecskék alakjában oszlik el, hanem bevonja a szemcséket, ill. szemcsehalmazokat sokkal jobban, mint az adalékok nélkül. A stabilizált talaj szerkezete a 22. ábrán bemutatott szerint képzelhető el: egy csaknem teljesen folytonos lemezes bitumen-szerkezet veszi

körül a gyakorlatilag bitumen-mentes talajrögöcskéket, szemcsehalmazokat. Az ilyen szerkezetű stabilizált talaj sokkal vízállóbb, mint a módosító adalék nélküli.

Bitumennel stabilizált kötött talajok nyomószilárdságát elsősorban a bitumennel bevont talaj-morzsák, szemcsehalmazok szilárdsága határozza meg. Ezért minden olyan folyamat, vagy reakció, mely a talajon belül növelni képes e halmazok nedves állapotban érvényesülő szilárdságát, az egész stabilizált talaj szilárdságát is növelni fogja s egyúttal, az egyes részecskék elmozdulásainak meggátlása révén, a duzzadás mértékét is csökkenti. Foszfor-pentoxidot adagolva nedves talajhoz, az a vízzel foszforsavat alkot:



s az ilyen savas foszforvegyületek kötött talajokra szilárdító hatást fejtenek ki, így a szemcsehalmazok belső szilárdságát növelni képesek, ezért azután a stabilizált talaj szilárdsága is nagyobb lesz. Finomszemcséjű talajok bitumennel annál jobban stabilizálhatók, minél nagyobb a talaj „látszólagos” szemcsenagysága, vagyis minél több egyedi szemcse tapad, vagy cementálódik össze.

A bitumenes stabilizációt elősegítő adalékot sokfélétt javasoltak és használtak is; a fellépő mechanizmusról a fentiekben már volt szó. A legjobb eredményt természetesen akkor érjük el, ha a bitumenhez adagolt anyagok reakcióba lépnek az ásványi felületek szervesetlen vegyületeivel s ott víztaszító

2. táblázat

Adalékok kiválasztása különböző talajtípusok esetén

A belső talajfelület jellege	Járulékos adalékanyagok
1. Komplex Fe- és Al-szilikátok; a $SiO_2/Al_2O_3 + Fe_2O_3$ arány nagyobb, mint 2. Az agyagrezecskék döntő többsége negatív töltésű. (Podszolos talaj.)	Szerves kationok, melyek úgy jönnek létre, hogy az NH_4OH egy vagy több hidrogénjét szerves gyökökkel helyettesítjük.
2. Agyagásványok, ha $SiO_2/R_2O_3 < 2$; komplex Fe- és Alhidroxidokkal, vagy azok nélkül. Meleg és nedves klíma alatt tipikusak. Ha az Al_2O_3 és Fe_2O_3 mennyisége megnő, az agyagásványok felszínén a negatív töltés csökken, a pozitív töltés nő.	Az agyagásványok felszínének pozitív töltésű foltjai reakcióba tudnak lépni zsíros, gyantás vagy más nagymolekulájú szerves savakkal és szappanokkal.
3. Stabil másodlagos szemcseaggregátumok vannak jelen, melyeket ligninben, proteinben és viasz-szerű anyagokban dús humusz filmek vonnak be. Csernozjom-talajok és egyéb félárid területi talajok.	Olyan anyag adagolása célszerű, mely reakcióba képes lépni a talaj szervesanyag-talmával és így víztaszító szintetikus gyantákat alkotnak.
4. Sivatagi, sós, vagy alkáli talajok; tipikus az előfordulásuk ott, ahol a párolgás több, mint a csapadékmennyiség.	Két vagy több kémikáliát kell a talajhoz keverni, melyek erős és víztaszító filmet alkotnak a szemcséken, a rendszer pH-értékétől és sótartalmától függetlenül.

vegyületeket alkotnak, melyek elsődleges, erős kötésekkel kötődnek le. A reaktív adalék fajtájának kiválasztásához célszerű lehetőleg minél jobban ismernünk a talajt alkotó ásványok felszínének kémiai tulajdonságait, s elsősorban a negatív töltésű agyagásványokon lekötött kationokat. Az adalékok kiválasztásához a 2. sz. táblázat nyújt segítséget.

IRODALOM

- [1] *Brand, W.*: Der Einfluss von Kalziumhydroxid auf die Eigenschaften schluffiger Böden im Strassenbau. Dissertation; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen 1962.
- [2] *Brunauer, S.—Copeland, L. E.*: The chemistry of concrete. Scientific American, 1964. 4. sz.
- [3] *Buócz T.—Cságoly I.*: Talajstabilizáció hígított bitumennel. Mélyépítéstudományi Szemle, 1961. 6. sz.
- [4] *Correns, W. C.*: The experimental chemical weathering of silicates. Clay Minerals Bulletin, N. 4. no. 26. 1961.
- [5] *Hashimoto, I.—Jackson, M. L.*: Rapid dissolution of allophane and kaolinite-halloysite after dehydration. Proceedings, 7th Conference on Clays and Clay Minerals. London: Pergamon Press, 1960.
- [6] *Herzog, A.—Mitchell, J. K.*: Reactions accompanying the stabilization of clay with cement. Highway Research Board, Washington D. C., 1963.
- [7] *Taylor, H. F. W.*: The chemistry of cement hydration. Chapter in „Progress in ceramic science”, J. E. Burker, ed., London: Pergamon Press, 1961.
- [8] *Bezruk, V. M.—Knyazjuk, K. A.*: Usztrojsztvo cementnogruntovüh osznovanii epokritii. Dorizdat, Moszkva 1951.
- [9] *Fülöp I.*: Talajstabilizációs kísérletek bázikus hatású barnaszénpernyével. Mélyépítéstudományi Szemle, 1967. 9. sz.
- [10] *Michaels, A. S.—Puzinauskas, V.*: Additives as aids to asphalt stabilization of fine-grained soils. Highway Research Board, Bulletin 129. Washington D. C., 1956.
- [11] *Quirico D.*: A cementstabilizáció kivitelezésével kapcsolatos újabb kísérletek és tapasztalatok. Mélyépítéstudományi Szemle, 1954. 9. sz.