



**Svensk Djupstabilisering**  
Swedish Deep Stabilization Research Centre

## Rapport 9

# Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering

Mårten Janz  
Sven-Erik Johansson

## **Svensk Djupstabilisering**

Svensk Djupstabilisering (SD) är ett centrum för forskning och utveckling inom djupstabilisering med kalk-cementpelare. Verksamheten syftar till att initiera och bedriva en branschsamordnad forsknings- och utvecklingsverksamhet, som ger säkerhetsmässiga, funktionsmässiga och ekonomiska vinster som tillgodoser svenska intressen hos samhället och industrin. Verksamheten baseras på en FoU-plan för åren 1996 – 2000. Medlemmar är myndigheter, kalk- och cementleverantörer, entreprenörer, konsulter, forskningsinstitut och högskolor.

Verksamheten finansieras av medlemmarna samt genom anslag från Byggforskningsrådet, Svenska byggbranschens utvecklingsfond och Kommunikationsforskningsberedningen.

Svensk Djupstabilisering har sitt säte vid Statens geotekniska institut (SGI) och leds av en styrgrupp med representanter för medlemmarna.

Ytterligare upplysningar om verksamheten lämnas av SD:s projektledare Göran Holm, tel: 013-20 18 61, 070-521 09 39, fax: 013-20 19 14, e-post: [goran.holm@swedgeo.se](mailto:goran.holm@swedgeo.se)

## **Swedish Deep Stabilization Research Centre**

The Swedish Deep Stabilization Research Centre coordinates research and development activities in deep stabilization of soft soils with lime-cement columns. A joint research programme based on the needs stated by the authorities and the industry is being conducted during the period 1996 – 2000. Members of the Centre include authorities, lime and cement manufactures, contractors, consultants, research institutes and universities.

The work of the Swedish Deep Stabilization Research Centre is financed by its members and by research grants.

The Swedish Deep Stabilization Research Centre is located at the Swedish Geotechnical Institute and has a Steering Committee with representatives chosen from among its members.

Further information on the Swedish Deep Stabilization Research Centre can be obtained from the Project Manager, Mr G Holm, tel: +46 13 20 18 61, fax: +46 13 20 19 14 or e-mail: [goran.holm@swedgeo.se](mailto:goran.holm@swedgeo.se)



**Svensk Djupstabilisering**  
Swedish Deep Stabilization Research Centre

## **Report 9E**

# Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering

Mårten Janz  
Sven-Erik Johansson

Linköping 2002

<b>Rapport</b>	Svensk Djupestabilisering c/o Statens geotekniska institut 581 93 Linköping
Beställning	Tel: 013-20 18 42 Fax: 013-20 19 14 E-post: birgitta.sahlin@swedgeo.se
ISSN	1402-2036
ISRN	SD-R--01/9--SE
Upplaga	200
Tryckeri	Roland Offset AB, Linköping, sep. 2001

# Förord

Svensk Djupstabilisering (SD) anordnade hösten 1999 en kurs i jord- och bindemedelskemi för att öka och sprida kunskapen om grundläggande kemi vid djupstabilisering. Föreliggande rapport är en dokumentation av kursmaterialet och allmän beskrivning av teorier för olika bindemedels funktion vid djupstabilisering. Inom SD pågår omfattande forskning inom området ”Stabiliserad jords egenskaper” exempelvis angående inverkan parametrar och stabiliseringseffekten av olika bindemedel i typiska svenska lösa jordar samt påverkan på miljön. Resultaten av denna forskning kommer att publiceras senare av SD varvid också bindemedels funktion kommer att behandlas.

Författare till rapporten är Mårten Janz, Cement och Betonginstitutet (tidigare Lunds Tekniska Högskola, avd. Byggnadsmaterial) och Sven-Erik Johansson, Cementa AB.

Linköping i juni 2001

Göran Holm  
Projektledare för SD



# Innehåll

## Förord

<b>Sammanfattning</b> .....	7
<b>I Inledning</b> .....	10
<b>2 Cement-, kalk- och puzzolanreaktioner</b> .....	12
2.1 Portlandcement .....	13
2.1.1 Hydratation av kalciumsilikat ( $C_3S$ , $C_2S$ ) .....	17
2.1.2 Hydratation av trikalciumpulver ( $C_3A$ ) .....	18
2.1.3 Hydratation av ferrit ( $C_4AF$ ) .....	19
2.2 Bränd kalk .....	19
2.3 Latent hydrauliska samt puzzolana tillsatsmaterial .....	22
2.3.1 Granulerad masugnslagg .....	24
2.3.2 Flygaska från kolpulvereldade kraftverk och värmeverk .....	25
2.3.3 Kiselstoff .....	28
<b>3 Bindemedlets funktion i jord</b> .....	29
3.1 Jordens puzzolanreaktion med $Ca(OH)_2$ .....	32
3.2 Stabilisering av lera via jonbyte .....	34
3.3 Lera och silt .....	35
3.3.1 Stabilisering med cement .....	35
3.3.2 Stabilisering med bränd kalk .....	36
3.3.3 Stabilisering med en blandning av cement och bränd kalk .....	37
3.3.4 Stabilisering med latent hydrauliska samt puzzolana tillsatsmaterial .....	37
3.4 Gyttja och torv .....	37
3.4.1 Stabilisering med cement .....	38
3.4.2 Stabilisering med bränd kalk .....	38
3.4.3 Stabilisering med en blandning av cement och bränd kalk .....	38
3.4.4 Stabilisering med latent hydrauliska samt puzzolana tillsatsmaterial .....	39
3.4.5 Tillsatsfiller .....	39

<b>4</b>	<b>Tolkning av laboratorieresultat</b> .....	40
4.1	Det laborativa arbetsutförandets inverkan på slutresultatet .....	40
4.2	Temperaturens inverkan på slutresultatet .....	41
<b>5</b>	<b>Tillverkning av pelare i fält</b> .....	42
<b>6</b>	<b>Långtidsegenskaper (beständighet)</b> .....	44
<b>7</b>	<b>Andra möjliga bindemedel och kombinationer av bindemedel</b> ..	46
7.1	Aluminatcement .....	46
7.2	Övriga slagger .....	47
7.3	Bioaska och sopaska .....	47
7.4	Gips .....	48
7.5	Släckt kalk .....	48
<b>8</b>	<b>Val av stabiliseringsmedel</b> .....	49
<b>9</b>	<b>Referenser</b> .....	51



# Sammanfattning

Kunskap om de kemiska reaktioner som ger bindemedlen dess hållfasthet är viktiga för att förstå varför ett visst bindemedel kan ge en god stabilisering i vissa jordar medan det fungerar dåligt i en annan jord. De bindemedel som idag vanligtvis används är cement och bränd kalk. En viss användning av masugnslagg och flygaskor har även förekommit. Dessa bindemedel reagerar på lite olika sätt och kräver olika betingelser för att fungera, men den reaktionsprodukten som bildas är snarlik för dem alla. Eftersom cementliknande material har använts under mycket lång tid är reaktionsprodukternas egenskaper väl kända och utredda.

I lera och silt har det visat sig att en blandning mellan cement och bränd kalk ofta ger en stabilisering med hög hållfasthet och med god samverkan med omgivande mark. Cementet reagerar med vattnet i jorden och ger en snabb hållfasthetstillväxt. Även kalken reagerar med vattnet och bildar då kalciumhydroxid. Denna reaktion ger ingen kemisk hållfasthetstillväxt, men då stora mängder vatten konsumeras kan denna reaktion ge en tillfällig positiv effekt på stabiliteten. Det är reaktionsprodukterna från en långsam sekundär reaktion mellan kalciumhydroxiden och mineral i jorden med puzzolana egenskaper som ger en varaktig hållfasthetstillväxt när kalk används som stabiliseringsmedel. I dispergerade leror med låg plasticitet kan kalciumhydroxiden även ge en stabiliserande effekt genom att ett jonbyte sker mellan positiva joner på lerkornens ytor och kalciumjoner.

Har jorden puzzolana egenskaper är det olämpligt att använda latent hydrauliska samt puzzolana tillsatsmaterial eftersom dessa konsumerar  $\text{Ca(OH)}_2$  som annars skulle reagerat med jordens puzzolana mineral. Jordens puzzolana egenskaper utnyttjas därmed inte fullt ut varvid viktmässigt mindre reaktionsprodukter kan bildas.

I jordar med mycket organiskt material ger cement eller en kombination av cement och latent hydrauliska eller puzzolana tillsatsmaterial bäst resultat. Anledningen till att bränd kalk fungerar dåligt är att puzzolanreaktionerna mellan

kalciumpoxid och puzzolana mineral förhindras av de humussyror som ofta förekommer i organiska jordar. Dessutom innehåller dessa jordar vanligtvis få puzzolana mineral med vilka kalciumpoxiden kan reagera. Humussyror påverkar även cementreaktionen negativt genom att reaktionen fördröjs.

Förutsatt att det valda stabiliseringsmedlet har önskad funktion i aktuell jord så bestäms slutresultatet av kvoten mellan markens vattenhalt och mängden tillsatt bindemedel, dvs av vattenbindemedelstalet, *vbt*. En jord med hög vattenhalt kräver således mer bindemedel än en jord med låg vattenhalt för att samma *vbt* och stabiliseringseffekt skall uppnås. Detta gäller speciellt cementbaserade bindemedel. Används bränd kalk som bindemedel ökar hållfastheten med ökad mängd kalk så länge det finns puzzolana mineral kvar i marken. En större mängd kalk medför inte en hållfasthetstillväxt om all puzzolana i jorden har konsumerats av reaktionen med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Generellt kan man säga att reaktiviteten hos stabiliseringsmedel till stor del bestäms av dess finhet, som normalt anges genom den specifika ytan. Ju högre specifik yta desto snabbare reagerar materialet. För latent hydrauliskt eller puzzolanskt tillsatsmaterial är även glasigheten av största betydelse för reaktiviteten. Är materialet glasigt (amorf) har det hög reaktivitet medan kristallina tillsatsmaterial helt kan sakna reaktivitet.

Temperaturen är av största betydelse för reaktionshastigheten och slutresultatet. Speciellt påverkas puzzolanreaktionen negativt av en låg temperatur. Om en teknisk förundersökning utförs en i laboratoriemiljö vid 20 °C finns det därför en risk att puzzolanreaktionerna bidrar till hållfasthetstillväxten i mycket större omfattning än vad som blir fallet i fält. Laboratorieprovning ger på så vis missvisande resultat. Det är därför av största vikt att tekniska förundersökningar utförs vid samma temperatur som är att förvänta i marken som skall stabiliseras.

En annan faktor som kan ge missvisande resultat vid laboratorieprovning är tillfört blandningsarbete. Det laborativa arbetsutförandet vid homogenisering och inblandning är vanligen betydligt effektivare än i fält. Även detta bör beaktas när resultat från förundersökningar skall tolkas.

Restmaterial från industrin och värmeverk såsom förbränningsaskor kan vara reaktiva och på så sätt vara användbara vid jordstabilisering. Det kan vara ekonomiskt lönsamt att delvis ersätta andra bindemedel med dessa restmaterial om stabiliseringen skall ske nära produktionsplatsen. Ökade transporter gör normalt alternativet olönsamt. När det gäller miljöpåverkan av olika material är det vik-

tigt att inse att alla produkter som används genom sin sammansättning påverkar sin omgivning. Restmaterial kan ha mycket varierande kvalitet varför dess kemiska sammansättning och lakbarhet alltid bör testas. Det som kan motivera en användning av restmaterial är om alternativa användningar eller deponi medför en större miljöpåverkan.

# Inledning

## Syfte

För att välja rätt bindemedel vid djupstabilisering är det viktigt att förstå de kemiska och fysikaliska reaktioner som ger stabiliseringen dess förhöjda hållfasthet. Syftet med denna rapport är att förmedla kunskaper om dessa reaktioner, så att bindemedlet väljs utifrån dess stabiliserande effekt i aktuell jord.

## Bakgrund

Sedan 1970-talet har lösa ler- och siltjordar stabiliserats i Sverige med pelarstabilisering, främst vid väg och järnvägsbyggen, men även vid byggnation av lätta byggnader, ledningsgravar, släntstabilisering etc. Till en början användes endast kalk som bindemedel, men från 1980-talets mitt har cement haft en stor användning. Det har visat sig att väsentligt högre hållfastheter uppnås när cement används ensamt eller tillsammans med kalk (Åhnberg et al. 1995). I och med att cement infördes har det även blivit möjligt att stabilisera ”problemjordar” med stort organiskt inslag och med höga vattenkvoter. Försök har även utförts där en del av bindemedlet är ersatt av restprodukter från industrin. Axelsson et al. (2000) har t ex visat att finmald granulerad masugnslagg ger en positiv effekt vid stabilisering av torv.

Djupstabilisering är ofta ekonomiskt gynnsamt samtidigt som det kan ge en miljömässig vinst då alternativet kan vara att schakta bort det lösa jordlagret med ett stort transportarbete som följd. Hur stort transportarbete som krävs för att transportera bindemedlet till arbetsplatsen bestäms av avståndet till närmsta depå.

Finns det möjlighet att använda förbränningsaska, andra slaggar eller någon annan restprodukt från industrin, kan detta ge både miljömässiga som ekonomiska vinster då alternativet ofta är att deponera restprodukterna. För att användandet av dessa restprodukter skall ge en miljömässig vinst måste dock alternativa användningsområdena eller deponi medföra en större miljöpåverkan än stabilisering. Man måste säkerställa att bindemedlet inte innehåller tungmetaller

eller andra skadliga ämnen som kan lakas ut. En förutsättning för att det skall vara ekonomiskt lönsamt är normalt att stabiliseringen sker nära produktionsplatsen. Ett huvudvillkor för att restprodukterna över huvud taget skall komma ifråga är att de har önskad stabiliserande funktion. Restprodukter måste alltid testas i den aktuella jorden.

## 2. Cement-, kalk- och puzzolanreaktioner

Portlandcement, bränd kalk och material som är latent hydrauliska eller puzzolana reagerar under vissa betingelser med vatten och bildar likartade reaktionsprodukter med hög hållfasthet. Cement ger starka reaktionsprodukter direkt när det reagerar med vatten. Bränd kalk bildar vid reaktionen med vatten kalciumhydroxid som inte är lastbärande men som i en efterföljande reaktion med vissa puzzolana jordar eller tillsatsmaterial också ger hög hållfasthet. Latent hydrauliska material måste aktiveras med t ex kalciumhydroxid för att reagera medan puzzolana material måste ha tillgång till kalciumhydroxid under hela reaktionsförloppet. För cement, latent hydrauliska samt puzzolana material är det bl a förhållandet mellan kalk och kisel,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , som bestämmer hur reaktivt materialet är. Ju högre förhållande desto mer hydrauliskt är materialet. I Tabell 2.1 sammanfattas de reaktioner för cement, bränd kalk, granulerad masugnslag, flygaska från kolpulvereldade kraftverk och värmeverk samt kiselstoff som ger hållfasthet. Vid blandning av cement och bränd kalk erhålls alltså både en snabb initial hållfasthetstillväxt från cementreaktionen följt av en långsam puzzolan reaktion.

**Tabell 2.1** Reaktioner som ger hållfasthet.

Bindemedel	Reaktion	Annat som behövs	"Hållfasthetstillväxt"
Cement	Hydraulisk	Vatten	Dagar
Bränd kalk	Puzzolan <sup>1)</sup>	Vatten + puzzolan jord eller puzzolan tillsatsmaterial	Månader
Granulerad masugnslag	Latent hydraulisk	Vatten + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ från t ex cement eller bränd kalk	Veckor
Flygaska <sup>2)</sup> och kiselstoff	Puzzolan	Vatten + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ från t ex cement eller bränd kalk	Månader

1) Reagerar först hydrauliskt och bildar  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  som i sin tur reagerar i en puzzolan reaktion. Det är reaktionsprodukterna från den sekundära puzzolana reaktionen som ger hållfasthet.

2) Avser flygaska från kolpulvereldade kraftverk och värmeverk.

Gemensamt för cement, bränd kalk och material som är latent hydrauliska eller puzzolana är att reaktionshastigheten till stor del bestäms av hur stor yta av materialet som är exponerat mot vattnet. Är kornstorleken liten blir proportionellt sett en större yta av materialet exponerat. Ett mått på finheten är specifika ytan [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]. Ju högre specifik yta desto snabbare reaktionsförlopp erhålls.

Reaktionsprodukterna från cement-, kalk och puzzolanreaktionerna är likartade och består till största del av kalcium- och kiselföreningar med inslag av bl a aluminium och järn. Eftersom cementliknande material har använts från antiken och framåt är egenskaperna för dessa reaktionsprodukter väl kända och undersökta.

## 2.1 PORTLANDCEMENT

Portlandcement är ett hydrauliskt bindemedel, dvs det reagerar med vatten och bildar en hård massa. För att tillverka ett portlandcement blandas portlandklinker med ca 5 % gips och mals till en kornstorlek av 1 – 100  $\mu\text{m}$  och med en specifik yta av ca 300 – 550  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

Genom att mala in olika tillsatsmaterial kan cementet egenskaper modifieras. Svensk standard SS 113 42 01 delar in cementen i 5 klasser, cement typ I – V. Cement typ I är ett rent portlandcement utan tillsatsmaterial medan cement typ V innehåller relativt stora mängder tillsatsmaterial. I Sverige saluförs främst cement typ I som är ett rent portlandcement samt cement typ II/A-LL som är modifierat kalkstensfiller ( $\text{CaCO}_3$ ). De vanligaste typ I cementen i Sverige är SH-cement och Anläggningcement och det typ II cement som saluförs är Byggcement som innehåller ca 15 % kalkstensfiller. Byggcementet har ersatt Std-cementet som salufördes tidigare. Std-cementet var ett rent portlandcement, dvs ett typ I cement. Hållfasthetsutvecklingen för Byggcement och Std-cement är likartad.

Som råmaterial till tillverkningen av portlandklinkern används vanligen lera och kalksten. Även andra råmaterial med motsvarande kemiska komponenter kan användas. Råmaterialet mals och blandas varefter det bränns vid ca 1450 °C i en roterugn. Vid bränningen drivs koldioxid ut och råmaterialet sintras samman. Efter ugnen kyls materialet snabbt. Produkten som bildats är i form av kulor och benämns portlandklinker.

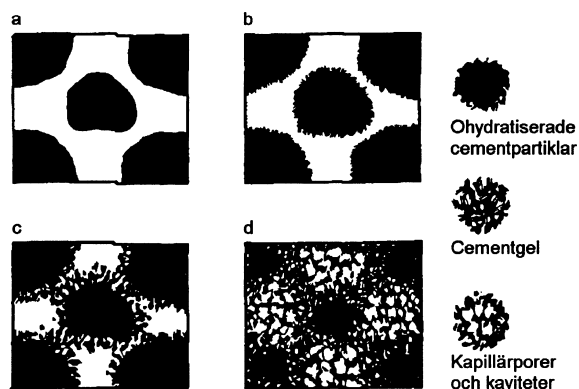
En typisk kemisk sammansättning för portlandcement framgår av Tabell 2.2. Den kemiska sammansättningen uttrycks som oxider. I verkligheten förekommer ämnena i olika kemiska föreningar som kallas klinkermineral. Utöver vad

**Tabell 2.2 Typisk sammansättning för portlandcement. (Johansson 1994A)**

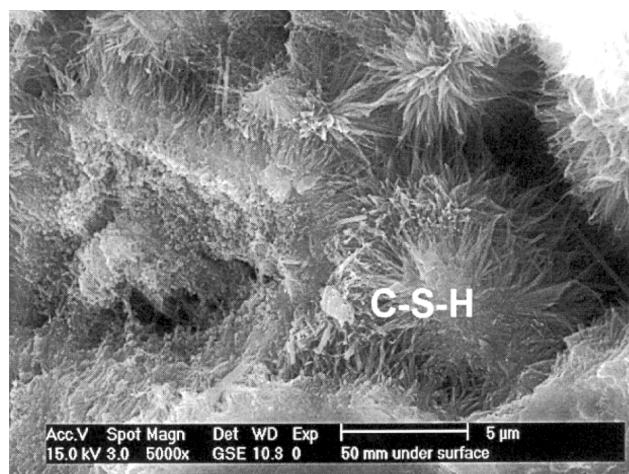
Oxid	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Andel [%]	60–70	17–25	2–8	0–6	0–6	1–4	0,2–1,5	0,2–1,5

som framgår av tabellen kan även mindre mängder av TiO<sub>2</sub>, MnO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> och Cl<sup>-</sup> förekomma.

När cement blandas med vatten startar en kemisk process (hydratation) som bildar en hård *cementpasta*. När det enskilda cementkornet hydratiserar bildas en extremt finporös *cementgel* som omger cementkornens yta. En schematisk bild av cementpastans strukturutveckling när fem cementkorn reagerar med vatten framgår av Figur 2.1. I Figur 2.2 visas ett foto av gelstrukturen i cementpasta. Likheten med Figur 2.1 är slående. Reaktionsprodukterna som utgör ce-



**Figur 2.1**  
**Strukturutveckling hos cementpasta.**  
a) Direkt efter blandning.  
b) Efter några minuter.  
c) Vid bindning.  
d) Efter några månader (Fagerlund 1994).



**Figur 2.2**  
**ESEM-bild av cementgel innehållande kristaller av CSH.**  
Foto: Finger Institute, Universitetet i Weimar.



mentgelen består bland annat av CSH-gel, ettringit samt monosulfat och beskrivs utförligt nedan. Eftersom cementgelen är porös och innehåller kemiskt bundet vatten (kristallvatten), kommer dess volym att vara större än den volym av cementkornet som reagerat. När reaktionen mellan cement och vatten fortgår fylls på så vis alltmer av det ursprungliga utrymmet mellan cementkornen ut av cementgel. Detta medför samtidigt att cementpastan blir allt tätare och starkare.

Hållfastheten hos den bildade cementpastan beror till stor del av dess porositet. Stort avstånd mellan kornen medför att porositeten ökar och därmed minskar hållfastheten. Ett mått på cementinnehållet och därmed även avståndet mellan cementkornen ges av vattencementtalet,  $vct$ .

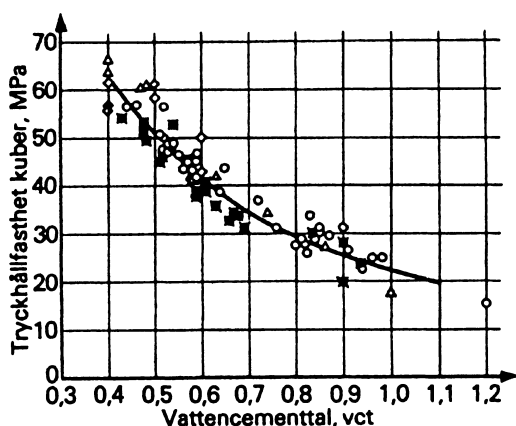
$$vct = \frac{W}{C} \quad (1)$$

där  $W$  är mängden blandningsvatten [kg] och  $C$  är mängden cement [kg]. Ett högt  $vct$  ger ett stort avstånd mellan cementkornen, vilket i sin tur medför hög porositet och låg hållfasthet. Vattencementtalet är en av de viktigaste kvalitetssparametrarna när cement ingår som bindemedel. Ett exempel på samband mellan kvalitet och  $vct$  visas i Figur 2.3 som visar hur hållfastheten för en betong ökar med sänkt  $vct$ .

Det är alltså de kemiska reaktioner som sker när cement hydratiserar som minskar porositeten och ger en hållfasthetstillväxt. Inom cementkemin brukar ett förkortat skrivsätt användas för de i cementet ingående oxiderna:

$\text{CaO} = \text{C}$ ;  $\text{SiO}_2 = \text{S}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$ ;  $\text{SO}_3 = \bar{\text{S}}$ ;  $\text{MgO} = \text{M}$  och  $\text{H}_2\text{O} = \text{H}$ .

I Tabell 2.3 framgår de i portlandcement viktigaste klinkermineralen.



**Figur 2.3**  
Samband mellan  $vct$  och tryckhållfasthet. Sambandet gäller för betong, men motsvarande samband finns även vid markstabilisering. (Ysberg 1979)

**Tabell 2.3 De viktigaste klinkermineralen.**

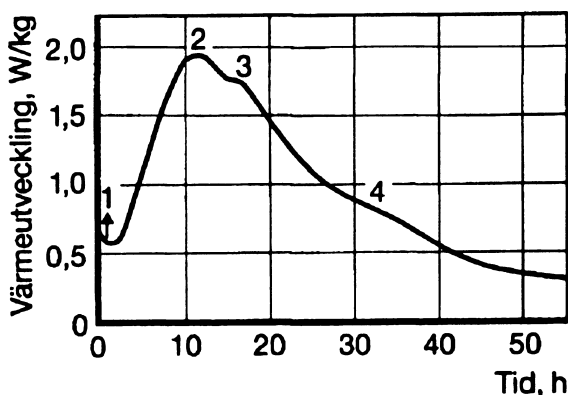
Namn	Kemisk beteckning <sup>1)</sup>	Förkortat skrivsätt
Trialkciumsilikat	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Dikalciamsilikat	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Trialkciumaluminat	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Tetralciumaluminatferrit (Ferrit)	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}^{2)}$

1) Även om t ex trialkciumsilikat skrivs som  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  betyder detta inte att oxiderna förekommer separat. Den verkliga kemiska beteckningen är  $\text{C}_3\text{SiO}_5$ .

2) Tetralciumaluminatferrit förekommer inom intervallet  $\text{C}_6\text{A}_2\text{F}$  till  $\text{C}_6\text{AF}_2$  med ett medelvärde nära  $\text{C}_4\text{AF}$ .

I portlandklinker förekommer inte de rena klinkermineralen  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$  och  $\text{C}_3\text{A}$  utan de är alltid delvis förorenade. Den förorenade formen av  $\text{C}_3\text{S}$  benämns alit,  $\text{C}_2\text{S}$  belit och  $\text{C}_3\text{A}$  aluminat. Hydratationen av  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  och  $\text{C}_4\text{AF}$  beskrivs var för sig nedan i avsnitt 2.1.1 till 2.1.3.

I ett portlandcement där samtliga klinkermineralen ingår pågår de i avsnitt 2.1.1 till 2.1.3 beskrivna reaktionerna samtidigt. Figur 2.4 kan illustrera reaktionsförloppet för ett portlandcement: Första toppen (1) beror på att lättlösliga ämnen löses ut ur cementet och av de första silikatreaktionerna (ekvation 2 och 3) samt av bildningen av ettringit (ekvation 4). Dessa reaktioner sker de första minuterna.



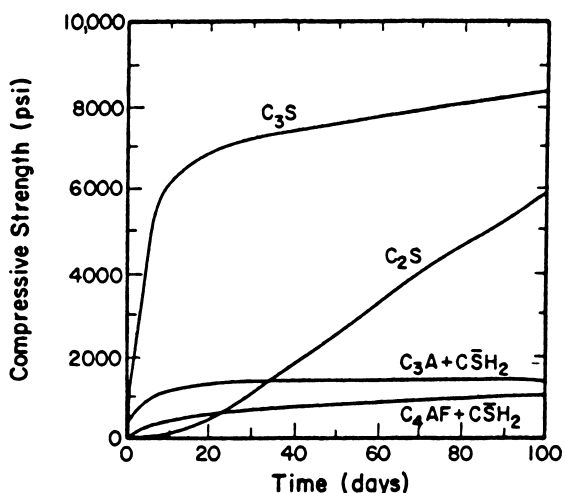
**Figur 2.4 Värmeutveckling för ett typiskt portlandcement vid 20 °C. (Taylor 1990)**

När cementet börjar binda ökar värmeutvecklingen åter. Värmeutvecklingen, som når sitt maximum efter ca 10 – 20 h (2), beror främst av aluminat och silikatreaktionerna som beskrivs i avsnitt 2.1.1 och avsnitt 2.1.2. Efter det att toppen passerats får vattnet svårare att tränga in till cementkornet och reaktionen och värmeutvecklingen avstannar (processen blir diffusionsstörd). Vid (3) sker fortsatt bildning av ettringit och vid (4) omvandlas ettringit till monosulfat, se ekvation 5. Den totala värmeutvecklingen för ett normalt portlandcement är ca 450 kJ/kg enligt Taylor 1990).

Efter ca 3 dygn har normalt hälften av cementet reagerat, efter 7 dygn ca 60 % och efter 3 månader ca 90 %. Reaktionshastigheten och därmed hållfasthetsutvecklingen styrs främst av förhållandet mellan  $C_3S$  och  $C_2S$  ( $C_3S$  ger ett snabbt cement medan  $C_2S$  ger ett cement som reagerar långsamt), finmalningsgrad och temperaturen.

### 2.1.1 Hydratation av kalciumsilikat ( $C_3S$ , $C_2S$ )

När  $C_3S$  blandas med vatten löses kalcium och hydroxidjoner snabbt ut varvid pH på några minuter stiger till över 12. Då kalcium och hydroxidjonerna når ett visst tröskelvärde kristalliseras kalciumhydroxid (CH) i lösningen samtidigt som kalciumsilikathydrat (CSH) växer på  $C_3S$ -kornets yta. När CSH lagret växer bildas en barriär som vattnet måste passera för att nå ohydratiserad  $C_3S$  och genom vilken joner måste diffundera. Hydratationen blir därmed diffusionsstörd och närmar sig 100 % asymptotiskt. Speciellt till en början innan reaktionsprocessen blir diffusionsstörd är hydratationshastigheten temperaturberoende. När hydratationen väl är diffusionsstörd minskar temperaturberoendet.



$C_2S$  hydratiserar på samma sätt men långsammare på grund av dess mindre reaktivitet, se Figur 2.5. I figuren framgår det även att det är reaktionsprodukterna av  $C_3S$  och  $C_2S$  som ger den största hållfastheten.

Figur 2.5  
De rena klinkermineralens  
hållfasthetsutveckling.  
(Young 1985)

Reaktionerna av  $C_3S$  och  $C_2S$  kan skrivas:

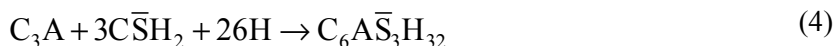


där  $C_3S_2H_4$  är CSH gelen. Det är CSH som har den högsta hållfastheten medan CH endast i liten mån bidrar till hållfasthetsutvecklingen.

Värmeutvecklingen vid fullständig hydrataion är enligt Bogue (1955) 500 kJ/kg för  $C_3S$  och 260 kJ/kg för  $C_2S$ .

### 2.1.2 Hydrataion av trikalcialuminat ( $C_3A$ )

Om cementet inte innehåller något gips, och därmed inte heller något sulfat, bildas omedelbart kalcialuminathydrat (CAH) när  $C_3A$  reagerar med vatten. Cementet binder då direkt. Gips tillsätts alltså för att reglera denna reaktion och därmed fördröja cementets bindning. När gips ( $C\bar{S}H_2$ ) finns närvarande reagerar  $C_3A$  med vatten och gips och bildar så kallad ettringit ( $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ ).

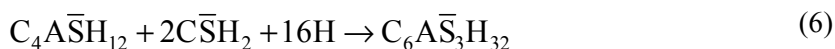


Inom några minuter har en liten del av  $C_3A$  reagerat och belagt cementkornet med ettringit som därmed bildar en diffusionsbarriär. Reaktionen blir diffusionsstyrd och sker långsamt. Ettringiten är bara stabil så länge det finns en stor mängd sulfat att tillgå, vilket brukar vara fallet det första dygnet. När koncentrationen sulfat minskar ombildas ettringiten till monosulfat. Reaktion sker åter snabbt då diffusionsbarriären har brutits ner:



Värmeutvecklingen vid fullständig hydrataion av  $C_3A$  är 870 kJ/kg enligt Bogue (1955).

Om monosulfaten efter en tid utsätts för en ny källa av sulfatjoner kan ettringit åter bildas:

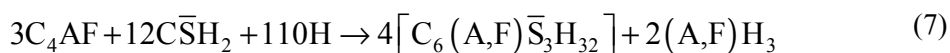


Eftersom ettringit har en betydligt lägre densitet än monosulfat återbildas ettringiten under en volymexpansion. Bildas ettringit i en stelnad betong finns det

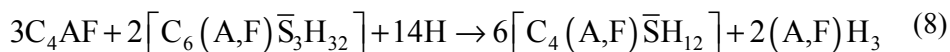
därför risk för sprickbildning. Av denna anledning används sulfatbeständigt cement med en låg andel  $C_3A$  (Anläggningscement) vid byggnation i miljöer med yttre källor av sulfat. Det är tveksamt om försenad ettringitbildning orsakar några problem vid djupstabilisering då porositeten hos den stabiliserade jorden är så hög att ettringiten troligen kan bildas utan att förorsaka någon nedsatt funktion i stabiliseringen.

### 2.1.3 Hydratation av ferrit ( $C_4AF$ )

Hydratationen av ferrit liknar hydratationen av  $C_3A$ , med är långsammare och det bildas mindre värme (420 kJ/kg enligt Bogue 1955). När gips finns närvarande bildas först sulfatrika ettringitliknande föreningar:



När sulfathalten minskar bildas sulfatfattigare föreningar:



## 2.2 BRÄND KALK

Den brända kalk som används vid djupstabilisering tillverkas av kalksten, som i huvudsak består av kalciumkarbonat ( $CaCO_3$ ). Kalkstenen krossas och upphetas vid en temperatur något över 1000 °C varvid koldioxid drivs ut. Den slutprodukt som bildas är i huvudsak kalciumoxid ( $CaO$ ), så kallad *bränd kalk* eller *osläckt kalk*. Processen vid bränningen beskrivs av ekvation 9.



Bränd kalk brukar karakteriseras med bränningsgrad och kornstorlek. Bränningsgraden anger hur väl koldioxiden ( $CO_2$ ) har drivits ut ur kalkstenen. Som är ett mått på bränningsgraden brukar *rest- $CO_2$*  mätas vid produktionskontrollen (Pihl och Kuusipuro 1997). Man brukar skilja på hårdbränd och lösbränd kalk. Begreppen är relativa och det finns ingen etablerad definition på hård- respektive lösbränd kalk. Hårdbränd kalk har högre densitet och därmed lägre porositet och specifik yta jämförd med lösbränd kalk. Detta medför att hårdbränd kalk har lägre reaktivitet än lösbränd. Även kornstorleken påverkar kalkens reaktivitet. Finmald kalk reagerar snabbare än grovmald.

Reaktiviteten hos kalk brukar mätas som den värmeutveckling som avges då 150 g bränd kalk blandas med 600 ml vatten (SS 13 40 03). Ju snabbare och högre värmeutveckling blir, desto reaktivare kalk. Figur 2.6 visar exempel på s k släckningskurvor uppmätta på olika kalk.

En typisk sammansättning för bränd kalk framgår av Tabell 2.4. Utöver vad som anges i tabellen kan det även finnas små mängder av t ex  $\text{TiO}_2$ , P, S,  $\text{Cl}^-$  och  $\text{CO}_2$ .

**Tabell 2.4 Exempel på sammansättning för bränd kalk.  
(Produktspecifikation, Nordkalk QL 0.0.1 LA, augusti 1998)**

Komponent	CaO-total	CaO-aktiv	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	MgO	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$
Andel [%]	94	90	1,5	0,8	0,4	1,7	0,1	0,05

När den släckta kalken blandas med vatten bildas så kallad *släckt kalk*,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :



Släckning av kalk sker under mycket stor värmeutveckling. Den totala värmeutvecklingen är enligt Boynton (1980) 1163 kJ/kg. Reaktionen medför även att pH ökar till ca 12,5, vilket är en förutsättning för att efterföljande puzzolanreaktioner skall kunna äga rum. Vid markstabilisering ger släckning en uttorkning av jorden som snabbt ger en ökad stabilitet. Denna stabilitet försvinner dock om jorden fuktas upp igen. Återuppfuktningen sker dock vanligen så långsamt att andra reaktioner då har stabiliserat marken.

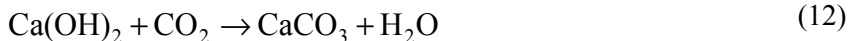
Den släckta kalken ger alltså ingen bindning och därmed inte heller någon hållfasthetstillväxt. För att hållfastheten skall öka vid jordstabilisering med kalk krävs det att det sker efterföljande puzzolanreaktioner med tillsatsmaterial eller omgivande jord:



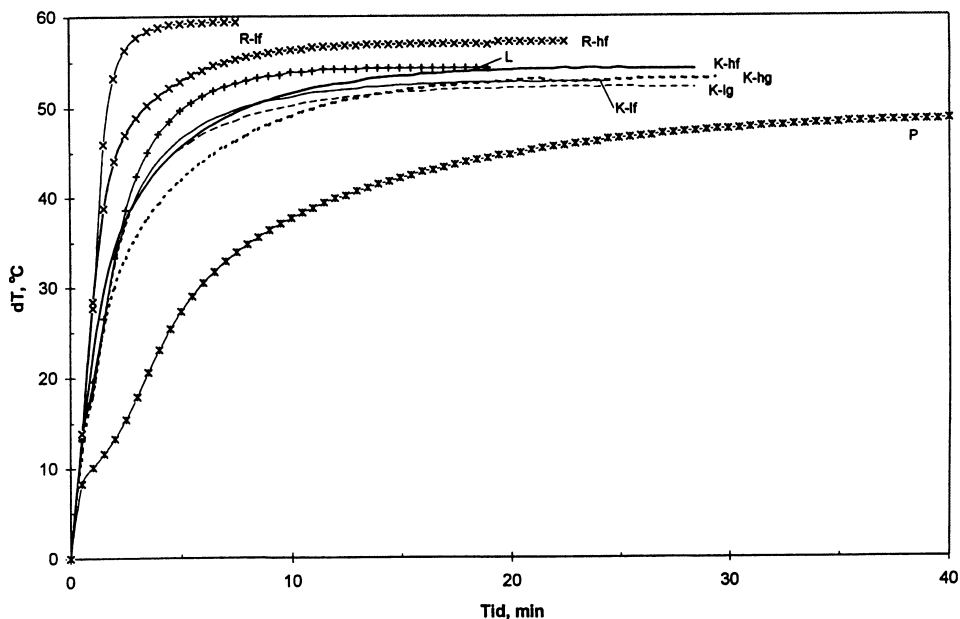
eller att jonbyte sker, se avsnitt 3.2. CASH, s k kalciumaluminatsilikathydrat, är ett mineral som är snarlikt CSH, men som även innehåller aluminium.

Kommer den släckta kalken ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) i kontakt med luft sker dock en hållfasthetstillväxt utan puzzolanreaktioner genom att kalciumhydroxiden karbona-

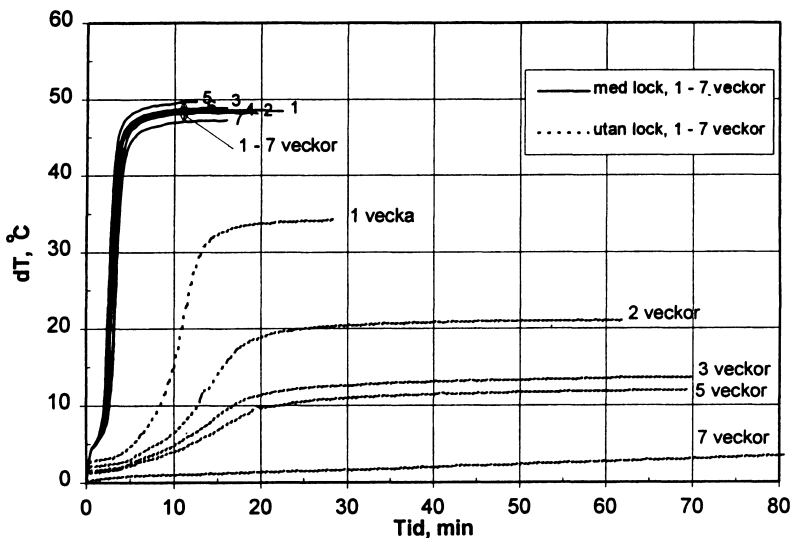
tiserar och åter bildar kalciumkarbonat. Det är denna hållfasthetsbyggande reaktion som ofta utnyttjas i t ex mur- och putsbruk.



Bränd kalk är känslig för fukt och koldioxid i luften. Anledningen till att släckningskurvan littererad P i Figur 2.6 är lägre beror troligen på att den påverkats av kontakt med luft. Luftfuktigheten medför att kalken till viss del släcks och bildar  $\text{Ca(OH)}_2$ , se ekvation 10. Den släckta kalken kan därefter reagera med koldioxiden och bilda kalciumkarbonat, se ekvation 12. Detta ställer krav på transporter och lagerhållning. Åhnberg och Pihl (1997) visar att en betydlig försämring av reaktiviteten skett då kalken förvarats i kontakt med luft, se Figur 2.7. Försämringen av kalkens reaktivitet är betydande redan efter en vecka.



**Figur 2.6** Exempel på släckningskurvor (Åhnberg och Pihl 1997)



Figur 2.7 Exempel på släckningsförlopp uppmätt på kalk förvarad i halvfyllda behållare med respektive utan lock (Åhnberg och Pihl 1997).

### 2.3 LATENT HYDRAULISKA SAMT PUZZOLANA TILLSATSMATERIAL

Som nämnts tidigare brukar man skilja på hydrauliska, latent hydrauliska samt puzzolanska material. Avgörande för vilken grupp ett material tillhör är dess förhållande mellan kalk och kisel,  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ . Ju högre förhållandet är desto mer hydrauliskt är materialet, se Tabell 2.5. Hydrauliska material, såsom t ex portlandcement, reagerar spontant med vatten och har behandlats ovan.

*Latent hydrauliska material* måste aktiveras för att en reaktion med vatten skall kunna ske med det egna kalkinnehållet. Det vanligast förekommande latent hydrauliska bindemedlet är mald granulerad masugnslagg som är en processad restprodukt från järnframställning.

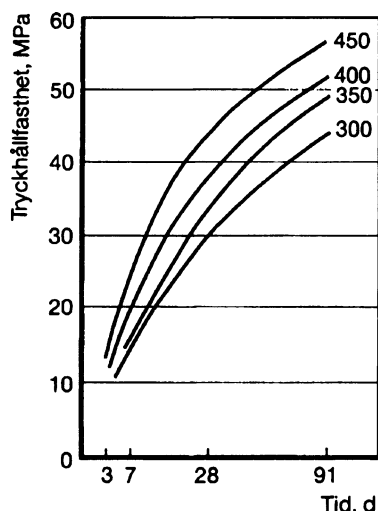
*Puzzolana material* innehåller så gott som ingen kalk men har ett högt kiselinnehåll. För att en puzzolan skall kunna reagera krävs det därför att kalk tillförs utifrån. Två vanligt förekommande puzzolaner är flygaska, som är en restprodukt från kolpulvereldade kraftverk och värmeverk, samt kiselstoff, som är en restprodukt från tillverkning av kiselmetall eller ferrokisel. Ordet puzzolan kommer från orten Pozzuoli vid Napolibukten där Romarna fann en kiselrik vulkanaska som blandades med bränd kalk för på så sätt skapa ett hydrauliskt bindemedel (Rutle 1958).



**Tabell 2.5 Egenskaper hos hydrauliska, latent hydrauliska samt puzzolanska material (Fagerlund 1983)**

Material	Kornstorlek [μm]	Struktur	$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$	Andel SiO <sub>2</sub> [%]	Specifik yta [m <sup>2</sup> /kg]
Portlandcement (hydrauliskt)	1–100	Kristallint	ca 3	ca 20	300–500
Mald granulerad masugnslagg (latent hydrauliskt)	1–100	Glasigt (amorft)	ca 1	ca 35	300–500
Flygaska (puzzolanskt)	1–100	Glasigt (amorft)	ca 0	50–60	300–500
Kiselstoft (puzzolanskt)	0,01–1	Glasigt (amorft)	ca 0	85–95	20 000

Reaktiviteten för latent hydrauliska och puzzolana tillsatsmaterial avgörs av dess *finhet* och *glasighet*. Finheten brukar normalt anges genom den specifika ytan [m<sup>2</sup>/kg]. Den avgörande skillnaden mellan kiselstoft och flygaska är just dess finhet. Kiselstoft är extremt finkornigt med en specifik yta på ca 20 000 m<sup>2</sup>/kg medan flygaska har en specifik yta på ca 300 – 500 m<sup>2</sup>/kg. På grund av kiselstoffets extrema finkornighet bidrar kiselstoffet i mycket större omfattning till hållfasthetstillväxten än flygaska. Figur 2.8 illustrerar finhetens inverkan på hållfasthetsutvecklingen. Figuren visar hållfasthetsutvecklingen för en slaggbetong där en stor del av portlandcementet är utbytt mot masugnslagg, men motsvarande samband mellan finhet och hållfasthet finns för samtliga bindemedel.



**Figur 2.8** Stabiliseringsmedlets finhet inverkar på hållfasthetsutvecklingen (här illustrerat av slaggcement). Inblandningen av slagg var 75 %. Slaggens specifika yta [m<sup>2</sup>/kg] har angetts vid kurvorna. (Schröder 1968)

För latent hydrauliska och puzzolana tillsatsmaterial är även glasigheten en viktig parameter. Är materialet glasigt (amorft) är reaktiviteten större än när det är i kristallin form, då det helt kan sakna reaktionsförmåga. Hög glasighet uppnås genom en snabb avkylning av det smälta materialet.

På samma sätt som när ren cementpasta bildas (se ovan) så beror hållfastheten hos den pasta som bildas av tillsatsmaterial till stor del av dess porositet, som i sin tur beror på avståndet mellan de suspenderade kornen. Som ett mått på innehållet av tillsatsmaterial, och därmed även avståndet mellan kornen, används vattenbindemedelstalet,  $vbt$  (jämför med  $vct$  i ekvation 1):

$$vbt = \frac{W}{C + D} \quad (13)$$

där  $W$ ,  $C$  och  $D$  är mängden blandningsvatten, cement respektive tillsatsmaterial [kg]. Ju lägre  $vbt$ , desto tätare pasta och högre hållfasthet.

### 2.3.1 Granulerad masugnslagg

Granulerad masugnslagg är en restprodukt från tackjärnframställning i masugn. Slaggens reaktivitet beror på hur snabbt den kyls när den lämnar ugnen. Snabb kylning ger slaggen en hög glashalt vilket i sin tur medför en hög reaktivitet. Långsam kylning medför en kristallin oreaktiv slagg, som inte lämpar sig som tillsatsmaterial vid djupstabilisering. Innan ett slagg används som tillsatsmaterial bör därför dess reaktivitet uppmätas eller kontrolleras med tillverkaren. Glashalten skall enligt BS 6699 vara större än 85 % på ett reaktivt slagg.

Även finheten påverkar slaggens reaktivitet. Normalt mals slaggen till ungefär samma finhet som cement. Kvalitetskrav på finheten går att finna i BS 6699, som fordrar en specifik yta större än 275 m<sup>2</sup>/kg, samt i ASTM C 989 som tillåter högst 20 % siktrest på 45 mm sikten.

Förutom CaO och SiO<sub>2</sub> innehåller granulerad masugnslagg även större mängder Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> och MgO och mindre mängder av andra mineral. Tabell 2.6 visar ett exempel på mineralinnehållet i masugnslagg.

**Tabell 2.6 Exempel på sammansättning av granulerad masugnslagg. (Produktblad Merit 5000, SSAB Merox AB)**

Mineral	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	S	FeO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Andel [%]	36	36	10	13	1	0,4	0,4	0,6

För att granulerad masugnslagg skall reagera krävs det att den aktiveras, t ex med hjälp av  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . I reaktionsprodukterna från kalk och portlandcement återfinns  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  vilket medför att kalk och cement är utmärkta aktivatörer för slaggen. Aktivering med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  från kalken eller cementet ger en latent hydraulisk reaktion. Efter det att slaggen aktiverats sker reaktionen till stor del spontant med det egna kalkinnehållet. Det är även möjligt att aktivera slagg med alkalier och sulfater, men de ger andra reaktioner, andra reaktionsprodukter och egenskaper varför de behandlas i avsnitt 7.2.

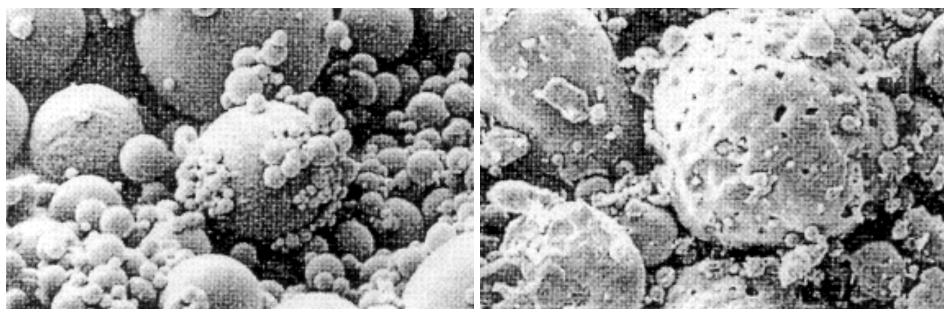
Den hållfasthetsuppbyggande reaktionsprodukten är främst en CSH-gel av samma typ som för portlandcement, men förhållandet  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  är lägre och den bildade gelen innehåller mer aluminium- och magnesiumoxid. Aluminiumoxider reagerar med kalk och gips eller kalciumhydroxid och bildar kristaller som liknar ettringit och monosulfat (Johansson 1994B).

Reaktionen är i likhet med cementreaktionen exoterm men sker långsammare än för cement och ger därför i jämförelse med cement en långsammare hållfasthetsstillväxt med lägre värmeutveckling. Långtidshållfastheten kan dock bli högre genom en slagginblandning.

Reaktionshastigheten är mycket temperaturkänslig. Ökar temperaturen ökar även reaktionshastigheten, vilket medför att hållfasthetsstillväxten påskyndas. På samma sätt minskar hållfasthetsstillväxten vid låga temperaturer. Ett sätt att höja temperaturen och därmed även påskynda hållfasthetsutvecklingen är att blanda in cement och eventuellt bränd kalk.

### **2.3.2 Flygaska från kolpulvereldade kraftverk och värmeverk**

Flygaska från kolpulvereldade kraftverk och värmeverk är ett filterdamm som avskiljs från rökgaserna. Egenskaperna hos flygaskan varierar kraftigt mellan olika förbränningsprocesser och kolsorter. Stenkol ger en flygaska med lägre halt  $\text{CaO}$  än brunkol, men det är även stora variationer mellan olika stenkolsorter och brunkolsorter. Ett byte av kol vid ett kraftverk kan alltså medföra en flygaska med helt andra egenskaper. Vid vissa kraftverk/värmeverk är förbränningsprocessen och filtreringen sådan att askan helt saknar puzzolanska egenskaper och lämpar sig därför inte som stabiliseringsmedel. Hög förbrännings-temperatur (1500 – 1700 °C) och en snabb avkyllning ger en flygaska med rundare kornform och hög glashalt som lämpar sig som stabiliseringsmedel, se Figur 2.9. En kvalitetsgranskning måste alltid utföras före det att ett parti flygaska används vid djupstabilisering.



**Figur 2.9** Exempel på flygaskor från olika förbränningsprocesser. Till vänster en fullgod aska med runda, hela korn. Till höger en aska med stora kantiga och porösa korn som absorberar vatten. (Johansson 1994B)

De väsentligaste egenskaperna för flygaska är finheten, glashalten och glödför-lusten (ett mått på mängden oförbränd kol). Glashalter mellan 60 och 90 % är normala, men en så hög glashalt som möjligt bör eftersträvas. Är askan kristal-lin är den helt inert. BBK 94 ger flera krav på flygaska som skall användas vid betongtillverkning. Vid djupstabilisering behöver inte lika hårda krav ställas på flygaskor som BBK 94 föreskriver för betongkonstruktioner.

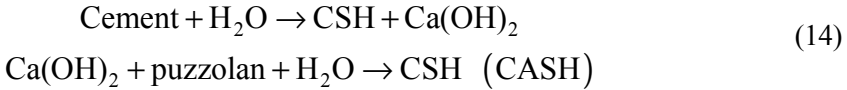
Sammansättningen på flygaska kan som sagt variera kraftigt. Tabell 2.7 visar ett exempel på kemisk sammansättning. Utöver vad som framgår av Tabell 2.7 ingår ett 50-tal spårmetaller med halter upp till 0.05 %. Vissa flygaskor kan dessutom innehålla radioaktiva ämnen.

**Tabell 2.7** Exempel på kemisk sammansättning av flygaska (Johansson 1994B).

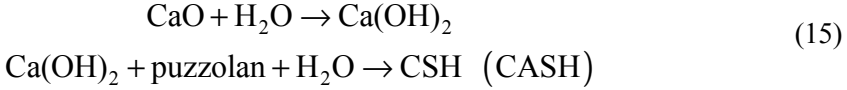
Mineral	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Andel [%]	40–55	20–30	5–10	3–7	1–4	0,4–2	2	1

För att en puzzolan som flygaska över huvud taget skall reagera med vatten krävs det att kalk tillförs utifrån, t ex i form av portlandcement eller bränd kalk. Då cement eller bränd kalk reagerar med vatten bildas kalciumhydroxid, Ca(OH)<sub>2</sub>, som i sin tur antingen kan bilda en hållfasthetsuppbyggande CSH-gel av samma typ som för portlandcement men med reducerat CaO/SiO<sub>2</sub> förhållan-de, eller s k kalciumaluminatsilikathydrat (CASH) som är snarlikt CSH men innehåller aluminium. Reaktionen medger att maximalt 150 g CSH-gel eller CASH-gel kan bildas från 100 g puzzolan. Vid reaktionen sänks pH i porvattnet på grund av att hydroxidjoner (OH<sup>-</sup>) konsumeras.

Reaktionen med cement kan kortfattat beskrivas på följande sätt:

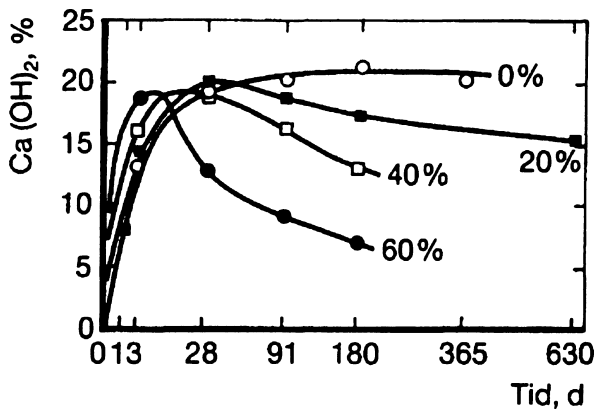


och reaktionen med bränd kalk (CaO) kan kortfattat beskrivas som:



Puzzolanreaktionen är långsam och fördröjs ytterligare då ett skal av CSH-gel bildas runt flygaskans korn. Reaktionshastigheten och hållfasthetstillväxten är proportionell mot förbrukningen av Ca(OH)<sub>2</sub> som illustreras av Figur 2.10. Hållfasthetstillväxten är således mycket långsam, men puzzolanreaktionernas effekt på långtidhållfastheten kan vara avsevärd.

På samma sätt som för granulerad masugnslagg är reaktionshastigheten temperaturkänslig. En förhöjd temperatur påskyndar således hållfasthetstillväxten.



**Figur 2.10** Hållfasthetstillväxten förpuzzolanreaktionen är proportionell mot förbrukningen av Ca(OH)<sub>2</sub>. I denna figur illustreras detta av kalciumhydroxidinnehållet vid olika tidpunkter i cementpasta med olika mängd flygaska. Procentsatsen anger mängden flygaska. Sänkningen av halten Ca(OH)<sub>2</sub> härrör sig från puzzolanreaktionen (Taylor 1990).

### 2.3.3 Kiselstoff

Vid tillverkning av kiselmetall eller legeringsämnet ferrokisel bildas rökgaser som innehåller extremt små partiklar av kiseldioxid,  $\text{SiO}_2$ . Rökgaserna renas i filter och filterdammet, kiselstoffet, kan användas som ett tillsatsmaterial. Vid betongframställning har kiselstoff fått en bred användning som ett tillsatsmaterial de senaste decennierna. Normalt används ca 1 – 5 % kiselstoff baserat på cementvikten.

Kiselstoff har en betydligt jämnare kvalitet än flygaska. I likhet med flygaskor innehåller även kiselstoff oförbränd kol och fri CaO. Kvalitetskrav på kiselstoff finns beskrivet i BBK 94. I BBK 94 anges även ett krav på reaktiviteten.

Den kemiska sammansättningen skiljer sig åt beroende på om kiselstoffet härrör från tillverkning av kiselmetall eller ferrokisel, se Tabell 2.8. Den dominerande mineralkomponenten är för båda fallen kiseldioxid ( $\text{SiO}_2$ ).

**Tabell 2.8 Kemisk sammansättning hos kiselstoff från tillverkning av kiselmetall och ferrokisel. (Hjort 1982)**

Mineralkomponent	Andel [%]	
	Från framställning av kiselmetall	Från framställning av ferrokisel
$\text{SiO}_2$	94–98	86–90
C	0,2–1,3	0,8–2,3
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,02–0,15	0,3–1,0
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,1–0,4	0,2–0,6
CaO	0,08–0,3	0,2–0,6
MgO	0,3–0,9	1,0–3,5
$\text{Na}_2\text{O}$	0,1–0,4	0,8–1,8
$\text{K}_2\text{O}$	0,2–0,7	1,5–3,5
S	0,1–0,3	0,2–0,4
Glödförlust	0,8–1,5	2,0–4,0

Samma puzzolanreaktion sker för kiselstoff som för flygaska, se ovan. Hållfasthetstillväxten är snabbare än för flygaska men långsammare än för cement. Puzzolanreaktionen är mycket temperaturkänslig vilket medför att korttidshållfastheten minskar vid låga temperaturer. Då en viss mängd cement ersätts med kiselstoff ökar dock långtidshållfastheten.

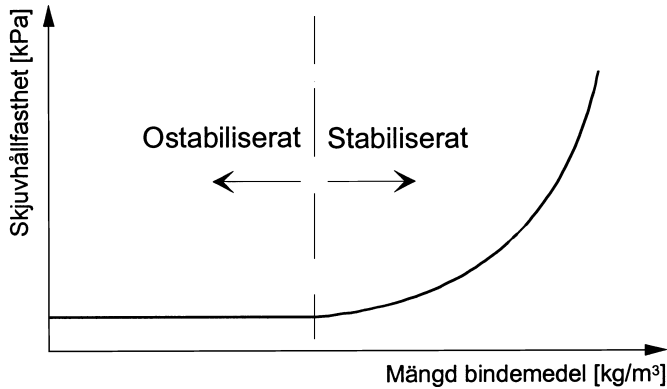
### 3. Bindemedlets funktion i jord

De reaktioner som kan ge en stabiliserande effekt i jord är dels (i) cementets reaktion med vatten i jorden, (ii) puzzolanreaktioner mellan  $\text{Ca(OH)}_2$  från bränd kalk eller cement och puzzolana mineral i jorden eller puzzolana tillsatsmaterial samt (iii) jonbyte mellan kalciumjoner från kalken eller cementet och joner i leran. Cementreaktionen beskrivs i ovan avsnitt 2.1, jordens puzzolana reaktion med  $\text{Ca(OH)}_2$  beskrivs nedan i avsnitt 3.1 och stabilisering via jonbyte beskrivs i avsnitt 3.2. En tillfällig stabiliserande effekt kan även uppnås från den uttorkning som sker när bindemedlen konsumerar vatten. Denna stabiliserande effekt försvinner dock när marken återfuktas.

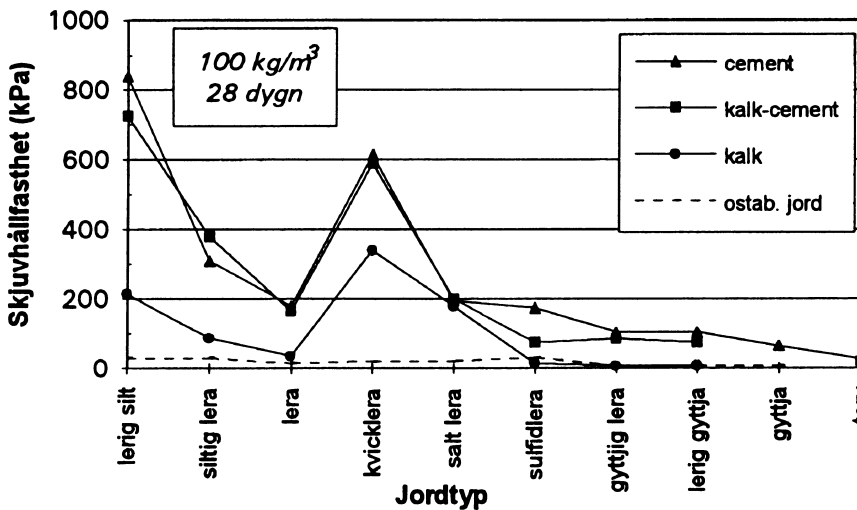
Under förutsättning av att det använda bindemedlet har önskad funktion i den aktuella jorden och att blandningen har utförts på ett korrekt sätt bestäms slutresultatet av mängden tillsatt bindemedel, dvs *vbt*, jämför Figur 2.3. För bränd kalk gäller det dock att det finns tillräckligt med puzzolan som  $\text{Ca(OH)}_2$  kan reagera med. Har all puzzolan i jorden konsumerats medför inte en större mängd kalk att hållfastheten ökar.

Minimikravet är att bindemedlet tillsätts i sådan mängd att det kan bygga upp ett lastbärande skelett. Underskrids detta minimikrav erhålls ingen stabiliserande effekt, se Figur 3.1. I en porös vattenrik jord som torv eller gyttna måste således mer bindemedel av samma typ tillsättas än i en tätare packad jord.

Figur 3.2 visar skjuvhållfastheten hos olika stabiliserade jordar. Som framgår av figuren uppnås de lägsta hållfastheterna för torv och gyttna, vilka även är de mest "porösa" jordarna (innehåller minst fast material). I Figur 3.3 har *vbt* beräknats för de i Figur 3.2 ingående jordarna. Trots att de i Figur 3.3 redovisade skjuvhållfastheterna härrör sig från helt olika typer av jordar framgår det tydligt att ökande *vbt* medför sjunkande hållfasthet. För en och samma jordart är sambandet mellan *vbt* och skjuvhållfasthet än mer entydigt, se Figur 3.4.

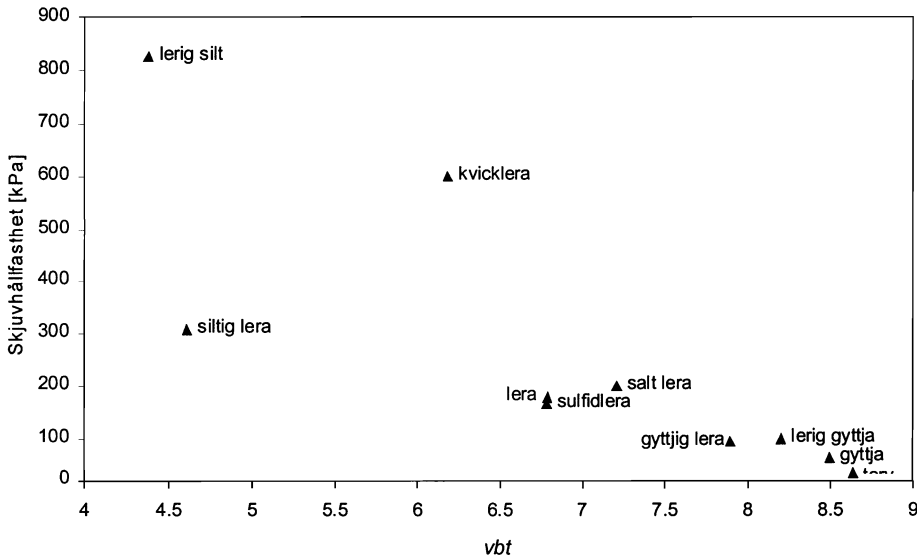


Figur 3.1 Principiellt samband mellan mängd bindemedel och skjuvhållfasthet.

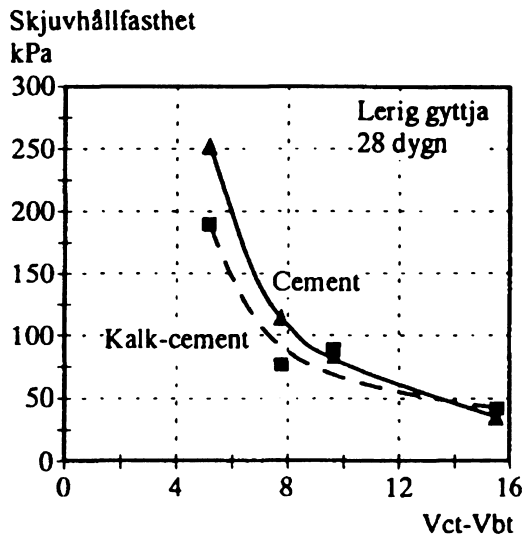


Figur 3.2 Utvärderad skjuvhållfasthet hos olika stabiliserade jordar 28 dygn efter inblandning, samt skjuvhållfastheten hos respektive jord i ostabiliserad, "ostört", tillstånd. Stabilisering och hållfasthetsprovningen är utförd i laboratorium. (Åhnberg et al. 1995)





**Figur 3.3** Utvärderad skjuvhållfasthet som funktion av vbt hos cementstabiliserade jordar 28 dygn efter inblandning. Stabilisering och hållfasthetsprovningen är utförd i laboratorium. Värdena i figuren är hämtade från Åhnberg et al. (1995).



**Figur 3.4** Samband mellan vbt och skjuvhållfasthet för cement- och kalkstabiliserad lerig gyttja 28 dygn efter inblandning. Stabilisering och hållfasthetsprovningen är utförd i laboratorium. (Åhnberg et al. 1995)

### 3.1 JORDENS PUZZOLANREAKTION MED $\text{Ca}(\text{OH})_2$

I marken, speciellt i lera och silt, finns det vanligen både aluminium- och kiselhaltiga mineral. Vissa av dessa har puzzolana egenskaper, dvs de kan under vissa förutsättningar reagera med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  och bilda reaktionsprodukter som ger hållfasthet. Puzzolanreaktionen liknar den som sker mellan flygaska samt kiselstoff och  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se ekvation 14 och 15. Jorden kan även innehålla större mängd aluminiummineral som deltar i reaktionen. Reaktionsprodukten blir således inte en CSH-gel, utan ett snarligt mineral som även innehåller aluminium, s k kalci-umaluminatsilikathydrat (CASH). Aluminiumfattig lera och silt bildar på samma sätt som i ekvation 14 och 15 CSH-gel. Reaktionen kan schematiskt skrivas som:



Beroende på vilka puzzolana mineral som finns i jorden kan sammansättningen av CASH-gelen variera. Några varianter av CASH är mineralerna  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  (strätlingit),  $\text{C}_4\text{AH}_x$  samt serien från  $\text{C}_3\text{AH}_6$  till  $\text{C}_3\text{ASH}_2$  (hydrogarnet).

Kalciumhydroxiden kan härstamma från antingen reaktionen mellan cement och vatten eller från reaktionen mellan kalk och vatten, se avsnitt 2.1 respektive 2.2. Cement och kalkreaktionerna medför även att pH i marken blir högt, vilket är en förutsättning för de efterföljande puzzolanreaktionerna. Puzzolanreaktionen påverkas kraftigt av temperaturen. Låg temperatur ger även en långsam hållfasthetstillväxt. Vid cementhydratationen men framförallt vid släckningen av bränd kalk utvecklas värme som är viktig för att få igång puzzolanreaktionerna.

När 100 g cement reagerar med 25 g vatten bildas 100 g CSH och 25 g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Kalkreaktionen bildar betydligt mer  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ; 100 g CaO reagerar med 32 g vatten och bildar därmed 132 g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  eftersom detta är den enda reaktionsprodukten. Om strätlingit bildas vid puzzolanreaktionen mellan jord och  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ger 100 g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  282 g strätlingit. Eftersom jorden används i puzzolanreaktionen erhålls alltså viktmässigt mer reaktionsprodukter med hållfasthet än tillsatt bindemedel. Detta illustreras i Tabell 3.1.

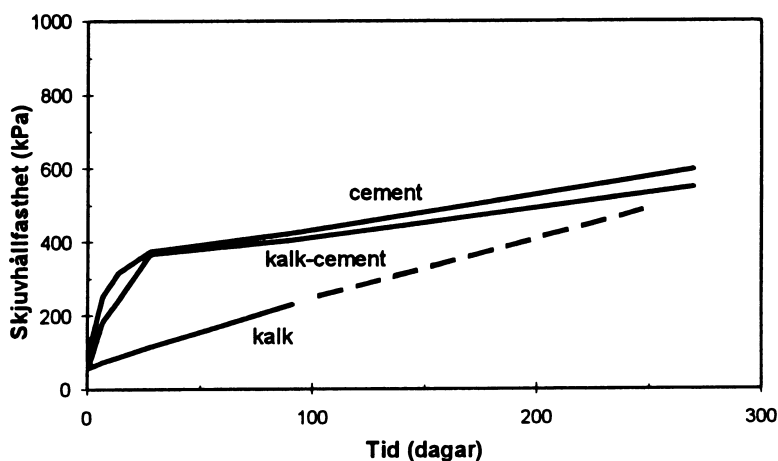
Ovanstående resonemang förutsätter att det finns tillgång till puzzolana mineral i jorden så att all  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kan bilda strätlingit. Mättas jorden av  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ger CaO mindre reaktionsprodukter med hållfasthet än var Tabell 3.1 redovisar. Bränd kalk kan totalt sett bilda mer reaktionsprodukter än cement och kan för vissa jordar med hög halt puzzolana mineral därför ge en högre sluthållfasthet. Puzzolanreaktionerna är dock långsamma vilket medför att det tar extremt lång

**Tabell 3.1** Mängd stabiliserande reaktionsprodukter av 100 g bindemedel vid fullständig reaktion.

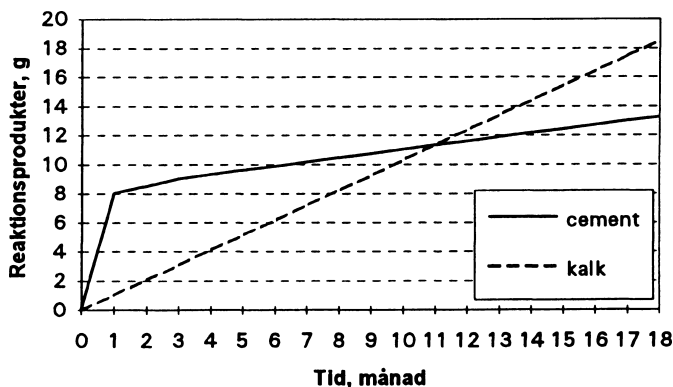
	Reaktionsprodukter med hållfasthet [g]		
	reaktion med vatten	puzzolanreaktion	totalt
100 g cement ger	100	71	171
100 g CaO ger	0	373	373

tid innan all  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  reagerat och bildat CASH. Hastigheten med vilken puzzolanreaktionen sker beror dels av temperaturen och dels av jordens kontaktyta mot  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , dvs jordens specifika yta och det utförda blandningsarbetet. För att påskynda reaktionen skall så mycket som möjligt av den puzzolana jorden exponeras mot  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . I Figur 3.5 redovisas laboratoriemätningar av hållfasthetsutvecklingen för jordar med puzzolana mineral stabiliserade med kalk-, kalk-cement- och cement. Lagringstemperaturen var 8 °C vid stabilisering med cement och kalk-cement och 20 °C vid stabilisering med kalk.

Med cementet som stabiliseringsmedel erhålls snabbt en hög hållfasthet eftersom CSH börjar bildas inom några timmar efter det att vatten tillsatts. Figur 3.6 visar en principfigur för hur mängden reaktionsprodukter utvecklas för bränd kalk respektive cement när tillgången på puzzolana mineral är större än vad puzzolanreaktionen kräver.



**Figur 3.5** Medelvärde av uppmätt hållfasthetsutveckling för kalk-, kalk-cement- och cementstabiliserad jord. Lagringstemperaturen var 8 °C vid stabilisering med cement och kalk-cement och 20 °C vid stabilisering med kalk (Åhnberg et al. 1995).



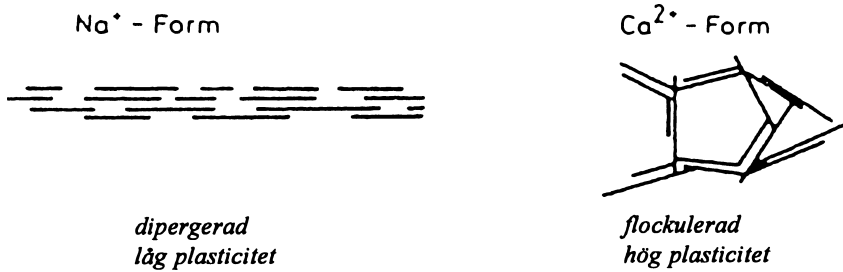
**Figur 3.6** Principfigur över mängd bildade reaktionsprodukter med 10 g stabiliseringsmedel per 100 g torrt material då tillgången på puzzolana mineral är större än vad puzzolanreaktionen kräver (Åhnberg et al. 1995).

Mängden reaktionsprodukter är dock endast ett mått på den stabiliserade jordens hållfasthet. Hur stor hållfasthet en viss mängd reaktionsprodukter verkligen ger beror på hur väl jordens partiklar binds samman av reaktionsprodukterna och hur väl hålrum fylls ut och ”förtätar” jorden.

### 3.2 STABILISERING AV LERA VIA JONBYTE

I leror kan det även ske en strukturförändring på grund av jonbyte som stabiliserar jorden. Dispergerade leror med låg plasticitet kan via jonbyte omvandlas till en flockulerad form med hög plasticitet, se Figur 3.7. En dispergerad lera består av platta korn som är separerade av tunna vattenskikt. På kornens ytor finns det en anrikning av positiva joner (katjoner), vanligen kalium eller natrium. När ett bindemedel blandas in i jorden tillförs nya joner (mestadels kalciumjoner) med annan laddning och storlek än lerans katjoner. Ett jonbyte kan ske mellan joner. Kalciumjonerna stör strukturen i leran varvid den flockulerar och storleksfördelningen ändras skenbart. Enligt Assarsson (1977) motsvaras behovet av kalciumjoner av ca 0,1 g Ca(OH)<sub>2</sub> per kg lera.

Hur stor effekt jonbytet har beror på lerans jonbyteskapacitet, som i sin tur beror på partiklarnas totala yta och lerans geologiska ursprung (Åhnberg et al. 1995). Vidare har cement lägre jonbyteskapacitet än bränd kalk då höga halter av kalium- och natriumjoner löses ut ur cementet när detta reagerar med vatten. Eftersom vattenfasen då redan innehåller kalium- och natriumjoner minskar eller förhindras jonbytet med lerans kalium- och natriumjoner.



Figur 3.7 Effekten av jonbyte. Illit och kaolinit (Müller-Vonmoos 1983).

### 3.3 LERA OCH SILT

#### 3.3.1 Stabilisering med cement

När cementet kommer i kontakt med jordens vatten påbörjas genast en hydrata-tion av cementet som ger en snabb hållfasthetstillväxt. Redan efter ca 3 dygn har hälften av cementet reagerat, efter 7 dygn ca 60 % och efter 3 månader ca 90 %. Reaktionsprodukterna är dels CSH-gel, som är den reaktionsprodukt som ger hållfasthetstillväxten, dels kalciumhydroxid,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Cementets hy-dratation beskrivs i avsnitt 2.1.

I lera och silt med puzzolana egenskaper kan även en efterföljande reaktion mellan jorden och den bildade  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ske som bidrar till hållfasthetstillväx-ten, se avsnitt 3.1. Denna reaktion är dock betydligt långsammare än cementets hydrata-tion.

Cementet reagerar långsammare när temperaturen är låg. I Sverige håller mar-ken normalt en temperatur av ca 8 °C, vilket medför att cementreaktionen blir relativt långsam. Cementreaktionen är exoterm, dvs värme avges. Enligt Åhn-berg et al. (1995) kan cementreaktionen höja markens temperatur med ca 5 – 10 °C. Den förhöjda temperaturen är bara tillfällig, när cementreaktionen av-stannar minskar åter markens temperatur. De efterföljande puzzolanreaktioner-na är dock mycket temperaturkänsliga och den tillfälligt förhöjda temperaturen medför att puzzolanreaktionerna får en ökad möjlighet att komma igång.

Organiska ämnen påverkar stabiliseringseffekten negativt. Humussyror och andra syragrupper reagerar med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  och bildar svårslösliga reaktionspro-dukter. Syrorna medför även att pH sänks, vilket medför att hållfasthetsutveck-lingen blir långsammare. I lera och silt är dock vanligtvis halten organiska äm-nen så låga att stabiliseringseffekten med cement inte påverkas.

Cementets stabiliserande effekt i marken bygger till stor del på CSH-gelens hållfasthet. CSH-gelen växer ut från cementkornen, se Figur 2.1. För att hållfastheten i den stabiliserade marken skall bli jämn krävs det därför att cementet blandas in på ett sådant sätt att cementkornen sprids så jämt som möjligt.

Vid pelarstabilisering av leror med cement har det ibland uppkommit ett tunt skikt av lösare lera i en gränzonen mellan den stabiliserade leran i pelaren och den omgivande ostabiliserade leran. Denna gränzonen medför att pelaren och omgivande jord inte samverkar på önskat sätt. Orsaken till att denna gränzonen bildas är ej klarlagd. En förklaring som föreslagits är att pelaren krymper när cementet hydratiserar, vilket då kan medföra att en tunn vattenspalt bildas mellan pelaren och omgivande lera. En annan förklaring är att leror blir lösare när de avsaltas. Nära cementstabiliserade pelare har Åhnberg et al. (1995) uppmätt en minskad Cl-halt, vilket alltså kan ge en lösare lera i gränzonen. När cementet blandas med bränd kalk minskar vanligen gränzonsproblematiken.

### 3.3.2 Stabilisering med bränd kalk

Den brända kalken reagerar (släcks) mycket snabbt när den kommer i kontakt med vattnet i jorden. Vid släckningen bildas  $\text{Ca(OH)}_2$  under stor värmeutveckling, se avsnitt 2.2. Reaktionen medför inte någon hållfasthetstillväxt utan endast en avvattning och en kraftigt förhöjd temperatur. Hållfasthetstillväxten sker i sekundära puzzolana reaktioner mellan aluminium- och kiselföreningar i jorden och den  $\text{Ca(OH)}_2$  som bildas vid släckningen (se avsnitt 3.1) samt i lera även via jonbyte (se avsnitt 3.2)

Avvattningen kan ge en tillfällig stabiliserande effekt, men denna är inte varaktig då vattenhalten i jorden åter kommer att stiga när reaktionen avstannat. Den kraftiga värmeutvecklingen som släckningen medför kan tillfälligt höja temperaturen med 40 – 50 °C, lokalt upp emot 100 °C (Åhnberg et al. 1995). Denna temperaturhöjning är viktig för att få igång den efterföljande puzzolanreaktionen, se avsnitt 3.1. Puzzolanreaktionen är mycket temperaturberoende varvid hållfasthetstillväxten sjunker när temperaturen återgår till normalvärdet, vilket är ca 8 °C i Sverige. På grund av den mycket stora värmemängd som frigörs vid släckningen kan det dock ta avsevärd tid för marktemperaturen att återgå till normalvärdet.

Stabilisering med bränd kalk är mer känslig för organiska ämnen i jorden än stabilisering med cement. Eftersom humussyror reagerar med  $\text{Ca(OH)}_2$  och bildar svårslösliga reaktionsprodukter som faller ut på partiklarna förhindras hållfasthetstillväxten via puzzolana reaktioner.

### 3.3.3 Stabilisering med en blandning av cement och bränd kalk

Det är ofta fördelaktigt att kombinera cement och kalk. Cement ger via sin hydratation en snabb hållfasthetstillväxt medan kalk genererar värme som påskyndar cementreaktionen och puzzolanreaktionen. Från släckningen av den brända kalken erhålls även stora mängder  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  som behövs för de långsamma puzzolanreaktionerna samt för jonbyte i leror, se avsnitt 3.1 och 3.2.

Kalken bör inte tillsättas i större mängd än att det finns tillgång till puzzolana mineral som kan reagera med den bildade  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . När all puzzolan har konsumerats bidrar inte kalken länge till någon hållfasthetstillväxt via puzzolanreaktioner. För att få hög hållfasthet inom kort tid efter pelarstabiliseringen bedömer Åhnberg et al. (1995) att den optimala blandningen ligger i intervallet 60 – 90 % cement och 40 – 10 % bränd kalk.

### 3.3.4 Stabilisering med latent hydrauliska samt puzzolana tillsatsmaterial

Masugnslagg, som är ett latent hydrauliska tillsatsmaterial, måste aktiveras av t ex  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  varefter reaktionen kan fortgå spontant. För att puzzolana tillsatsmaterial som flygaska och kiselstoft skall reagera krävs det att  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tillförs utifrån, se avsnitt 2.3. Kalciumhydroxiden kan tillföras via cementshydratation eller via släckning av kalk. Detta betyder att latent hydrauliska samt puzzolana tillsatsmaterial aldrig kan användas ensamma utan endast som ett tillsatsmaterial till cement och kalk.

Eftersom den puzzolana reaktionen som sker med tillsatsmaterialen konsumerar  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  minskar möjligheten för lera eller silten att bilda CASH, se avsnitt 3.1. Används latent hydrauliska samt puzzolana tillsatsmaterial kan alltså inte jorden utnyttjas fullt ut i puzzolanreaktionen varvid viktmässigt mindre reaktionsprodukter bildas. I lera och silt med puzzolana egenskaper är det därför i princip onödigt att tillsätta latent hydrauliska samt puzzolana tillsatsmaterial.

## 3.4 GYTTJA OCH TORV

Gyttja och torv kräver större mängds stabiliseringsmedel än lera och silt. Detta beror på att gyttjan och torven innehåller få fasta partiklar att stabilisera. Det behövs därför mer stabiliseringsmedel för att ”sammanfoga” dessa. Gyttja och torv har dessutom betydligt högre porositet och vattenkvot. Den höga vattenkvoten medför att *vbt* blir lågt vilket i sin tur ger låg hållfasthet. För att öka *vbt*, och därmed hållfastheten, måste mer stabiliseringsmedel tillsättas.

Enligt Axelsson et al. (2000) finns det indikationer på att det i jordar med höga halter av organiskt material krävs att mängden bindemedel överstiger ett visst ”gränsvärde” för att erhålla en stabiliserande effekt. En tänkbar orsak till detta gränsvärde kan enligt Axelsson et al. vara att bindemedel måste tillsättas i sådan mängd att det neutraliserar humussyrorna. Även Pousette (2001) har funnit att humussyrorna spelar en avgörande roll vad gäller bindemedlets förmåga att stabilisera jord. Hon uppmätte en skillnad i skjuvhållfasthet på upp till 6 gånger mellan stabiliserade torvprover med låghumifierad vitmosstorf respektive höghumifierad starrtorv. Höghumifierad starrtorv kräver enligt Pousette en betydligt större mängd stabiliseringsmedel för att stabiliseras.

### **3.4.1 Stabilisering med cement**

Cementet hydratiserar när det kommer i kontakt med vattnet i gyttja eller torven och bildar därmed CSH-gel och  $\text{Ca(OH)}_2$ , se avsnitt 2.1. Till skillnad från lera och silt innehåller gyttja och torv betydligt lägre andel lerpartiklar med vilka puzzolanreaktioner kan ske. Detta medför att den efterföljande puzzolana reaktionen mellan  $\text{Ca(OH)}_2$  och jorden blir ringa och bidrar därmed inte nämnvärt till hållfasthetstillväxten.

Gyttja och torv innehåller höga halter av organiskt material, som i sin tur kan innehålla humus och humussyror. Humussyror reagerar med  $\text{Ca(OH)}_2$  och bildar svårlösliga reaktionsprodukter som faller ut på lerpartiklarna, vilket ytterligare försvårar puzzolanreaktionerna. Syrorna medför även att pH sänks, vilket ger en långsammare hållfasthetsutveckling. Cement är dock mindre känsligt för humussyror än kalk beroende på att CSH-gelen kan bildas även om humussyrorna reagerar med  $\text{Ca(OH)}_2$ .

### **3.4.2 Stabilisering med bränd kalk**

I gyttja och torv har bränd kalk normalt mycket liten stabiliseringseffekt. Detta beror på att hållfasthetstillväxten i kalkstabiliserade jordar främst beror på puzzolanreaktioner med mineral i jorden. Organiska jordar som gyttja och torv innehåller vanligen få lerpartiklar med puzzolana egenskaper som kalken kan reagera med. Puzzolanreaktionen hämmas även av inverkan av humussyror, se ovan.

### **3.4.3 Stabilisering med en blandning av cement och bränd kalk**

Eftersom hållfastheten vid stabilisering med bränd kalk främst byggs upp via puzzolana reaktionen mellan  $\text{Ca(OH)}_2$  och jorden, och att dessa blir ringa i organiska jordar, bidrar kalken till mycket liten del till hållfasthetstillväxten när



blandningar mellan cement och bränd kalk används. Detta har även visats i försök. Axelsson et al. (2000) har visat att blandningar med 50 % snabbcement (SH) och 50 % bränd kalk ger låg skjuvhållfasthet i jämförelse med stabilisering med endast snabbcement.

#### **3.4.4 Stabilisering med latent hydrauliska samt puzzolana tillsatsmaterial**

Puzzolana reaktioner i organiska jordar blir möjliga i större omfattning när tillsatsmaterial används. Tillsatsmaterial kan därför ha en positiv effekt på stabiliseringen (tillsatsmaterialens reaktioner och hållfasthetstillväxt beskrivs i avsnitt 2.3). De organiska jordarnas egna partiklar med puzzolana egenskaper räcker ofta inte till för att förbruka all  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  som bildas när cement hydratiserar.

Axelsson et al. (2000) har visat att blandningar med tillsatsmaterial gav lägre skjuvhållfasthet än ren cement efter 14 och 26 dygn när dessa testades i två olika gyttejor. Det kan dock tänkas att skillnaden minskar med tiden då puzzolanreaktionerna mellan tillsatsmaterial och  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  är långsamma och inte fullt utvecklade efter 26 dygn.

#### **3.4.5 Tillsatsfiller**

Tillsatsfiller i form av t ex fin sand eller kalkstensfiller (inert kalciumkarbonat,  $\text{CaCO}_3$ ) kan användas för att öka antalet partiklar i jorden. Tillsatsfillern reagerar inte kemiskt men ökar hållfastheten genom att öka antalet partiklar som bindemedlet kan ”sammanfoga” och bygga en hållfast struktur runt. Dessutom torde fillern fylla ut eventuella hålrum som uppkommit vid stabiliseringen.

Eftersom ingen filler är helt inert kan det tänkas att puzzolana reaktioner kan uppkomma med fillern. T ex har kiselrik sand möjlighet att reagera med  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  och bidra till hållfasthetstillväxten. Men eftersom sandkornen är förhållandevis stora och därmed har en liten specifik yta, är endast en relativt liten yta exponerad mot kalciumhydroxiden och tillgänglig till puzzolanreaktionen. Effekten av puzzolana reaktioner med tillsatsfillern är därför försumbar.

Genom att till viss del ersätta bindemedlet med filler kan kostnaderna för stabiliseringen, åtminstone i teorin, minska.

## 4. Tolkning av laboratorieresultat

Djupstabilisering skall alltid föregås av laborativa försök där bindemedlets tekniska funktion kontrolleras i den aktuella jorden. För att tolka resultaten av sådana försök korrekt måste effekten av arbetsutförandet och eventuell skillnad i temperatur beaktas. Eftersom bl a blandningsarbetet skiljer sig kraftigt åt, behöver det inte vara så att det bindemedel som ger bäst stabiliserande effekt vid laboratorieprovningen ger bäst effekt i fält.

### 4.1 DET LABORATIVA ARBETSUTFÖRANDETS INVERKAN PÅ SLUTRESULTATET

Det förekommer flera metoder att homogenisera jorden och blanda in stabiliseringsmedlet. Vanligen brukar homogeniseringen utföras i någon form av köksmixer eller bruksblandare. Homogeniseringen pågår normalt i 2 till 6 minuter och utförs normalt dagen innan inblandningen med stabiliseringsmedlet. Stabiliseringsmedlet blandas in med samma utrustning som används vid homogeniseringen. Inblandningen tar normalt 4 till 10 minuter (Edstam 2000).

Därefter formas provkropparna och packas i hylsor. Även detta utförs med flera olika metoder. Det förekommer både statisk och dynamisk packning.

För torv finns det speciella metoder utvecklade för inblandning och preparering av provkroppar, se Andersson et al. (2001).

Skillnaden i arbetsutförande mellan olika laboratorier medför att uppmätt skjuvhållfasthet kan skilja. Edstam (2000) rapporterar en avvikelse på 22 % jämfört med medelhållfastheten inom olika laboratorier medan avvikelsen uppgår till 53 % mellan laboratorierna.

Olika bindemedel stabiliserar jorden på olika sätt. För cement växer reaktionsprodukterna som binder samman partiklarna i jorden på cementkornens yta. Detta medför att det är viktigt att cementet fördelas jämnt i jorden. Bränd kalk reagerar genom att i ett första steg bilda kalciumhydroxid som i en sekundär

reaktion reagerar med mineral i jorden och ger stabiliseringen dess hållfasthet. Eftersom kalciumhydroxiden är löslig är det inte lika viktigt att kalken fördelas jämnt i jorden. En ojämn inblandning får på så vis en större negativ effekt på cement än kalk.

I laboratorium bereds provkroppar vanligen med fullt uppbruten jord och proven blandas betydligt mer än i fält. Detta medför att laboratorieprovning ger högre hållfasthet än vad som kan förväntas i fält. Från laboratorieprovningen kan man därför inte dra några säkra slutsatser om hur tillverkningen av pelarna bör utföras.

## **4.2 TEMPERATURENS INVERKAN PÅ SLUTRESULTATET**

Temperaturen är av största betydelse för reaktionshastigheten och slutresultatet. Speciellt påverkas puzzolanreaktionerna av temperaturen. Utförs laboratorieprovningen vid 20 °C sker därför puzzolanreaktionerna betydligt snabbare än i marken, som i Sverige normalt har en temperatur av ca 8 °C. Bränd kalk och blandningar med puzzolana tillsatsmedel kan därför uppvisa en betydligt snabbare hållfasthetstillväxt vid laboratorieprovningar som utförs vid 20 °C än vad som kan förväntas i fält. Även cement uppvisar en snabbare hållfasthetstillväxt vid förhöjda temperaturer, men temperaturpåverkan är betydligt mindre på cementhydratationen jämfört med puzzolanreaktionerna.

Även provens storlek och utformning har stor betydelse för reaktionshastigheten och slutresultatet. Små oisolerade provkroppar som lagras kallt (t ex vid 8 °C) kyls snabbt varvid reaktionshastigheten minskar. I fält värms stora volymer av marken upp av cementreaktionen och, i ännu större omfattning, av kalkreaktionen. Det tar därför betydligt längre tid för marken att svalna i fält än vid laboratorieprovning med små prov som lagras vid 8 °C. Den positiva effekt som bindemedlens värmeutveckling har på hållfasthetsutvecklingen kan på så vis bli mindre vid en förundersökning i laboratoriemiljö än i fält.

För att få en korrekt jämförelse av effektiviteten mellan olika bindemedel vore det önskvärt att laboratorieprovningen sker så att miljön i marken efterliknas så långt som möjligt.

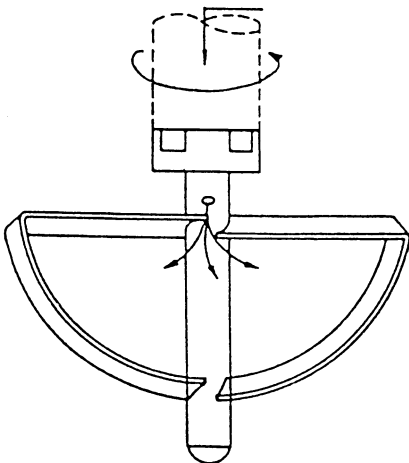
## 5. Tillverkning av pelare i fält

Vid pelarstabilisering eftersträvas att fördela bindemedlet så att de kemiska reaktionerna kan ske under så goda förutsättningar som möjligt så att likformiga pelare erhålls. Pelarnas egenskaper skall helst inte variera mellan olika pelare eller i pelarens längsled och tvärsnitt. Jordar har dock mycket komplexa reologiska egenskaper som gör inblandningen svår. Rörelser som skapas av ett blandningsredskap dör snabbt ut.

Pelarstabilisering utförs i Sverige via en metod där bindemedlet blandas in i torrt tillstånd via tryckluft. Denna metod kan enligt Larsson (2000) delas in i tre delmoment: (i) neddrivningen av inblandningsverktyget, (ii) dispergering av bindemedlet i jorden och (iii) molekylär diffusion.

Vid *neddrivningen* roterar blandningsverktyget samtidigt som det förs ner till önskat djup. Under detta moment kan jordens struktur brytas ned så att lermine-ralen blir mer åtkomlig för kemiska reaktioner. De blandningsredskap som används idag drivs normalt ner med 100 mm/varv och har vinklade paddlar som förenklar neddrivningen av redskapet, se Figur 5.1. Detta medför att relativt lite energi tillförs nedbrytningsprocessen av jorden och det är tveksamt om dess

struktur påverkas nämnvärt. För att åstadkomma de skjuvkrafter som erfordras för att bryta ner jordens struktur kan man enligt Larsson (2000) öka paddlarnas vinkel, höja rotationshastigheten eller öka antalet skjuvzoner. Antalet skjuvzoner kan ökas genom att t ex borra hål i paddlarna, använda fler paddlar, skränka bla-



**Figur 5.1**  
**Normalverktyget som vanligen används**  
**vid pelarstabilisering i Sverige.**  
**(Carlsten och Ekström 1995)**

den eller sätta tänder på bladen. En annan möjlighet att effektivisera och underlätta finfördelningen av jorden bör vara att blanda in ett peptiseringsmedel vid neddrivningen av blandningsredskapet.

Under *dispersionsprocessen* blandas och fördelas bindemedlet varefter de solida partiklarna väts. Slutligen sker en uppbrytning av agglomerat som distribueras ut i blandningen. Bindemedlet blåset först med tryckluft ut genom ett hål ovanför blandningsverktyget, se Figur 5.1. Inblandningen och fördelning av bindemedlet sker dels genom den energi som tryckluften tillför, dels genom blandningsverktygets rotation. För att undvika koncentrationsvariationer av bindemedlet över pelarens tvärsnitt måste därför blandningsredskapet vara rätt utformat. Därefter sker vätningen av bindemedlet. Bindemedelspartiklarna är för lätta att spontant sjunka ner i lersuspensionen, varvid vätningen har svårt att ske utan att arbete tillförs från blandningsverktyget. Vätningen gynnas därför av att blandningsverktyget skapar stora tryck och skjuvspänningar. För att förhindra koncentrationsvariationer måste därefter agglomerat brytas upp. Agglomerat förhindrar ett effektivt användande av bindemedlet då inte alla bindemedelspartiklar kommer att medverka till en jämn hållfasthetstillväxt i den stabiliserade volymen. Agglomeraten bryts upp genom stora tryck och skjuvkrafter som åstadkoms genom att jorden sätts i rörelse och ”knådas”. Enligt Larsson (2000) kan en knådande effekt skapas genom att använda paddlar med stor vinkel mot horisontalplanet (ca 45°). När agglomeraten brutits ner måste slutligen bindemedlet distribueras ut i blandningen såtillvida inte bindemedlet fördelats tillräckligt redan vid inblandningen. Distributionen underlättas om jorden är fullt uppbruten från neddrivningen av blandningsverktyget.

Med ett givet blandningsverktyg beror effektiviteten i dispersionsprocessen främst av lufttrycket vid inblåsningen samt stigningen per varv och rotationshastigheten hos blandningsverktyget. Det kan även tänkas att dispersionsprocessen kan effektiviseras genom att blanda in peptiseringsmedel i jorden som underlättar bildandet av ett finfördelat system.

När pelaren är installerad i marken fortsätter blandningsprocessen via den *molekylära diffusionen*. Denna process sker främst när bränd kalk används eftersom upplöst  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kan diffundera ut i jord som har en lägre koncentration  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  och reagera med puzzolana lermineral där. Cementets reaktionsprodukter bildas främst på cementkornets yta. Därför är det viktigare att dispersionsprocessen utförts på ett korrekt sätt när cement används som bindemedel.

## 6. Långtidsegenskaper (beständighet)

Cement-, kalk- och puzzolanreaktionerna ger likartade reaktionsprodukter (CSH- och CASH-gel). Eftersom material baserade på dessa reaktionsprodukterna har använts under mycket lång tid (med säkerhet av etruskerna i Italien redan för 2500 år sedan) är även reaktionsprodukternas egenskaper väl kända och utredda. Normalt har CSH- och CASH-gelen mycket god beständighet. Från Romartiden, då den antika betongen hade sin storhetstid, finns det fortfarande många byggnadsverk kvar. Vissa av dessa byggnader är till och med fortfarande i bruk. En av de mer kända byggnaderna är Pantheon i Rom som har en fribärande betongkupol med en spännvidd på 43 m. Pantheon uppfördes ca 120 e. Kr. och används idag som kyrka.

I vissa miljöer kan dock reaktionsprodukterna brytas ner relativt snabbt. För att en stabilisering skall ha den livslängd som krävs måste den därför vara beständig i den miljö den verkar i. Vid djupstabilisering kan både fysikaliska och kemiska nedbrytningsmekanismer påverka stabiliseringen. Några av dessa beskrivs kortfattat nedan.

I det jordlager som påverkas av tjäle kan man tänka sig att den utförda stabiliseringen kan påverkas av *frostangrepp*. När vattnet i stabiliseringen fryser till is sker detta under en volymökning med 9 %. Kan inte isen växa spänningsfritt finns det därmed risk för sprickbildning. Finns det däremot tillräckligt med luftvolym i vilken isen kan växa föreligger det ingen risk för frostangrepp. Det krävs alltså att vattenhalten överskrider en viss kritisk nivå för att sprickbildning skall kunna ske.

Vattnet i marken kan påverka stabiliseringen negativt. Är vattnet mjukt och/eller surt kan man tänka sig att löser ut kalken, s k *kalkurlakning*. Vattnet löser först kalciumhydroxiden och sedan även kalcium från CSH-gelen. För att denna process skall kunna fortgå och ge någon skada krävs det att nytt mjukt eller surt vatten tillförs kontinuerligt och att det kalkmättade vattnet förs bort. Marken måste alltså vara permeabel och det måste finnas ett vattenflöde genom densamma. I marker som djupstabiliseras är normalt permeabiliteten så låg att det inte

föreligger någon risk för urlakning. Det kan dock tänkas att pelaren passerar ett permeabelt sandstråk eller annat skikt med strömmande vatten.

Innehåller marken sulfater kan stabiliseringen utsättas för *sulfatangrepp*, s k *försenad ettringitbildning*. Som beskrevs i avsnitt 2.1.2 kan monosulfat under volymtillväxt bilda ettringit om sulfatjoner tillförs utifrån. Det är tveksamt om försenad ettringitbildning orsakar några problem vid djupstabilisering då porositeten hos den stabiliserade jorden är så hög att ettringiten troligen kan bildas utan att förorsaka någon nedsatt funktion i stabiliseringen.

Vissa salter, som ammoniumjoner och magnesiumjoner, reagerar med hydroxidjoner och sänker på så vis pH. Angreppet kan uppfattas som ett surt angrepp eftersom hydroxidjoner förbrukas.

För bindemedel eller bindemedelskombinationer som ger andra reaktionsprodukter än de som cement-, kalk- och puzzolanreaktionerna producerar erhålls beständighetsproblem som skiljer sig från de ovan redovisade. Vissa sådana bindemedel och bindemedelskombinationer behandlas i kapitel 7.

## 7. Andra möjliga bindemedel och kombinationer av bindemedel

Andra bindemedel kan vara lockande att använda i vissa sammanhang. Det kan t ex vara en aska från ett lokalt värmeverk eller industri. Fördelen med att använda en sådan lokalt producerad aska kan dels vara ekonomisk med låga transportkostnader och lågt pris, dels miljömässig då en restprodukt som vanligtvis kanske deponeras tas om hand. När det gäller miljöpåverkan av olika restmaterial är det viktigt att inse att nästan alla dessa produkter genom sin sammansättning ger en ökad miljöpåverkan på omgivningen. Det måste säkerställas att tillsatsmaterial inte innehåller tungmetaller eller andra ur miljöhänsyn farliga ämnen i skadliga nivåer. För att det skall vara miljömässigt motiverbart att använda ett restmaterial måste alternativa användningar eller deponi vara sämre ur miljösynpunkt.

En grundförutsättning för att materialet inte bara skall fungera som en fyller är att det är reaktivt och reaktionsprodukten skall höja jordens hållfasthet. Det är även viktigt att reaktionsprodukterna är beständiga.

### 7.1 ALUMINATCEMENT

Aluminatcement tillverkas av kalksten och bauxit och innehåller således i huvudsak kalciumaluminat. Tillverkningsprocessen gör att aluminatcement är flera gånger dyrare än portlandcement och dess begränsade användning ger även höga transportkostnader. Hydratationen är mycket snabb och det mesta av hållfastheten uppnås redan inom ett dygn då även den kemiska vattenbindningen sker. Mängden bundet vatten är även betydligt högre i aluminatcement än i portlandcement.

En av de viktigaste reaktionsprodukterna för aluminatcement är dikalciumaluminathydrat  $C_2AH_8$ , som är en instabil förening som har en benägenhet att övergå till trikalciumpulverhydrat  $C_3AH_6$ . Vid övergången från  $C_2AH_8$  till  $C_3AH_6$  blir massan porös vilket medför att det sker en hållfasthetsförlust. Vid betongframställning får aluminatcement därför ej användas i bärande konstruktioner. Omvandlingshastigheten från  $C_2AH_8$  till  $C_3AH_6$  är fukt- och temperaturkänslig och temperaturens ogynnsamma inflytande på hållfastheten är mest



märkbar om den tidiga hydratationen sker vid höga temperaturer. Beständigheten hos aluminatcement vid djupstabilisering bör undersökas vidare innan det används i fält.

Tillsätts gips till aluminatcement erhålls en mycket snabb hållfasthetstillväxt. Sulfater i gips aktiverar aluminatcementet varvid ettringit bildas. Ettringit bildas under volymexpansion vilket medför att dess hållfasthet är lägre än de reaktionsprodukter som bildas när aluminatcement reagerar med vatten utan gips tillsatt. Ettringit är endast stabilt vid pH över 10. Detta medför att kombinationen aluminatcement och gips ej bör användas i marker där ett lägre pH kan förväntas.

## 7.2 ÖVRIGA SLAGGER

Det finns flera olika slagger som härstammar från metallindustrin. Från färskningsprocessen i stålindustrin finns det t ex slaggt från LD- och Bessemerkonverter. Det finns även icke ferritiska slagger från andra metallindustrier, t ex kopparslaggt, zinkslaggt, fosforslaggt och nickelslaggt.

Till skillnad från masugnslaggt är dessa slagger vanligen kristallina och saknar därmed reaktiva egenskaper. Vid djupstabilisering kan de därför endast fylla en funktion som tillsatsfyller, se avsnitt 3.4.5. Om slaggt skall användas som fyller måste försiktighet iakttagas då vissa av dessa kan innehålla tungmetaller och andra miljöskadliga ämnen som kan lakas ut till omgivande mark.

Alkali- och sulfataktiverad slaggt är ett latent hydrauliskt slaggt som aktiverats med alkali och/eller sulfater. Alkali och sulfater är ett effektivt sätt att aktivera slaggt som t ex granulerad masugnslaggt. Hållfasthetstillväxten kan bli mycket snabb. Egenskaperna hos de reaktionsprodukterna som bildas skiljer sig åt beroende på bl a mängd och typ av aktivator som används. Kunskapen om alkali- och sulfataktiverad slaggt är bristfällig, varför de bör användas med stor försiktighet.

## 7.3 BIOASKA OCH SOPASKA

*Bioaska* härstammar från eldning av trä, torv, halm etc. På samma sätt som för flygaska från kolpulvereldade kraftverk kan bioaska ha puzzolanska egenskaper. Kvaliteten på askan beror dels på vad som har förbränts och dels på förbränningsprocessen. Innan en bioaska används måste dess reaktivitet och kemiska sammansättning testas. Om bränslet eller förbränningsprocessen ändras måste testen göras om.

*Sopaska* kommer från rökgasreningen vid förbränning av sopor och kan ha puzzolana egenskaper. Eftersom sopornas innehåll kan variera kraftigt kommer även askans egenskaper att variera. Det finns även risk för att det i askan finns miljöfarliga ämnen. Därför bör *sopaska* användas med stor försiktighet. Askkan måste kontinuerligt kontrolleras ur både tekniska som miljömässiga aspekter.

## 7.4 GIPS

När gips tillsammans med bränd kalk kommer i kontakt med lera och vatten bildas ettringit. Ettringiten har hög densitet och fyller ut hålrummen mellan lerpartiklarna. Holm et al. (1987) har i laboratorieförsök och fältförsök jämfört kalk-gips blandningar med rent kalk. Laboratorieförsöken visade en snabbare hållfasthetstillväxt när gips användes medan fältförsöken inte visade någon skillnad de första månaderna efter inblandning.

Sulfater i gips kan även utnyttjas för att aktivera aluminathaltiga produkter som flygaska, slagg och aluminatcement. Tillsätts gips till aluminatcement erhålls en mycket snabb hållfasthetstillväxt då ettringit bildas.

Beständigheten hos kalk-gips blandningar och andra kombinationer med gips är dåligt utredd. Men eftersom ettringit endast är stabilt vid pH över 10, är gipsinblandning olämpligt i marker där ett lägre pH kan förväntas. Utförs stabiliseringen i direkt anslutning till betongkonstruktioner kan en gipsinblandning dessutom förorsaka sulfatangrepp på betongen. Utredningen utförd av Holm et al. (1987) visar att gips kan vara tänkbart vid temporära förstärkningar, där en snabb hållfasthetstillväxt önskas och där beständigheten över lång tid inte behöver beaktas.

## 7.5 SLÄCKT KALK

Den bestående hållfasthetstillväxt som uppkommer när bränd kalk (CaO) används som stabiliseringsmedel kommer från puzzolana reaktioner mellan aluminium- och kiselföreningar i jorden och den släckta kalk (Ca(OH)<sub>2</sub>) som bildas när den brända kalken kommer i kontakt med vattnet i jorden (se avsnitt 3.1). I lera kan även en hållfasthetstillväxt erhållas via jonbyte (se avsnitt 3.2). Detta medför att även släckt kalk kan användas som stabiliseringsmedel. Man går dock miste om den stora värmeutveckling som släckningen medför. Eftersom puzzolanreaktionernas reaktionshastighet är starkt temperaturberoende kommer hållfasthetstillväxten därför att bli än långsammare när släckt kalk används. Släckt kalk ger inte heller någon temporär stabilisering på grund av avvattning som släckningen av bränd kalk medför, se avsnitt 2.2.

## 8. Val av stabiliseringsmedel

Valet av stabiliseringsmedel skall alltid grunda sig på de reaktioner som ger hållfasthetstillväxt. De önskade reaktionerna måste vara möjliga i aktuell jord. I t ex gyttja och torv har en inblandning av bränd kalk ingen eller dålig effekt på grund av att de puzzolana reaktionerna förhindras av humussyror och av att tillgången av mineraler med puzzolana egenskaper är begränsad. Kalk kan däremot ha god effekt i lera och silt utan organiskt inslag men med mineraler med puzzolana egenskaper.

I lera och silt har det erfarenhetsmässigt visat sig att en blandning av cement och kalk ofta ger en stabilisering med hög hållfasthet och med god samverkan med omgivande jord. Ju större andel organiskt inslag det finns i jorden och ju färre partiklar med puzzolana egenskaper jorden har, desto mer cement bör användas. För att få hög hållfasthet inom kort tid efter stabiliseringen av lera och silt bedömer Åhnberg et al. (1995) att den optimala blandningen ligger i intervallet 60 – 90 % cement och 40 – 10 % bränd kalk.

De reaktioner som ger latent hydrauliska och speciellt puzzolana tillsatsmaterialen dess hållfasthet konsumerar  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Detta medför att mindre reaktionsprodukter kan bildas mellan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  och jord, vilket i sin tur betyder att totalt sett mindre reaktionsprodukter kan bildas. Därför kan sådana tillsatsmaterial vara olämpliga att tillsätta i puzzolana jordar som lera och silt.

I Åhnberg et al. (1995) har försök utförts där flera olika jordar stabiliserats med 100 % kalk, en kombination av 25 % kalk och 75 % cement respektive 100 % cement. Utifrån dessa försök bedömdes stabiliseringseffekten, se Tabell 8.1.

Axelsson et al. (2000) har utfört en studie där stabiliseringseffekten för olika stabiliseringsmedel i gyttja och torv testats. Gyttja och torv är problemjordar med mycket organiskt material och med lite mineral med puzzolana egenskaper som är svåra att stabilisera. De stabiliseringsmedel som testades var olika sorters cement, bränd kalk, finmalld granulerad masugnslag, flygaska från två olika kolkraftverk samt bypassaska från cementindustrin. Baserat på resultat

**Tabell 8.1 Bedömd hållfasthetshöjande effekt av olika stabiliseringsmedel i jordar provade av Åhnberg et al. (1995).**

Stabiliseringsmedel	Jordar									
	lerig silt	siltig lera	lera	lera (kveck)	lera (salt-haltig)	lera (sulfid-haltig)	gyttjig lera	lerig gyttja	gyttja	torv
kalk	•	+	•	+	+	–	•	•	–	–
kalk-cement	+	+	+	+	+	+	+	•	•	•
cement	++	++	+	++	+	+	+	+	+	+

– ingen eller dålig effekt      • relativt god effekt      + god effekt      ++ mycket god effekt

från försöken samt författarnas erfarenheter föreslår Axelsson et al. (2000) att cement alternativt en blandning av cement och granulerad masugnslagg bör användas. De mängder bindemedel som föreslås är 100 – 200 kg/m<sup>3</sup> för gyttja, 150 – 250 kg/m<sup>3</sup> för torv samt 70 – 200 kg/m<sup>3</sup> för muddermassa.

Innan slutligt stabiliseringsmedel väljs måste alltid en teknisk förundersökning utföras där stabiliseringsmedlets egenskaper i aktuell jord testas. Skall tillsatsmaterial användas måste det även beaktas att dess egenskaper kan variera kraftigt mellan olika leveranser beroende på variationer i råmaterial och olika industriella process. Dessa material måste därför alltid granskas ur både teknisk och miljömässig aspekt innan de används.

# Referenser

- Andersson, R., Jacobsson, A. och Axelsson, K. (2001).** Referensmetod för inblandning och preparering av provkroppar, förvaring och undersökning av stabiliserade torvprover, Steg 1 – Insamling av erfarenheter. Arbetsrapport 18, Svensk Djupstabilisering, Linköping.
- Assarsson, K. G. (1977).** Stabilisering och jordmaterialförbättring med kalk. Kurs i jordstabilisering med cement och kalk, Cementa, Nov. 1977.
- Axelsson, K., Johansson, S.-E. och Andersson, R. (2000).** Stabilisering av organisk jord med cement- och puzzolanreaktioner – Förstudie. Rapport 3, Svensk Djupstabilisering, Linköping.
- BBK 94 (1994).** Boverkets handbok om betongkonstruktioner, Band 2, Material, Utförande, Kontroll. Boverket.
- Bogue, R. H. (1955).** The Chemistry of Portland Cements. 2<sup>nd</sup> ed., Reinhold Publishing, New York.
- Boynton, R. S. (1980).** Chemistry and Technology of Lime and Limestone. John Wiley & Sons.
- Carlsten, P. och Ekström, J. (1995).** Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll. SGF Rapport 4:95, Svenska geotekniska föreningen.
- Edstam, T. (2000).** Laboratorieinblandning för stabilisering av lera – Referensmetod. Arbetsrapport 16, Svensk Djupstabilisering, Linköping.
- Fagerlund, G. (1982).** Puzzolaner i betong. Särtryck från tidningen Cementa nr 2 och 3, Cementa AB, Danderyd.
- Fagerlund, G. (1994).** Struktur och strukturutveckling. Kap. 10 i Betonghandbok – Material, Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm.
- Hjort, L. (1982).** Microsilica in concrete. Nordic Concrete Research, No 1, pp 9.1 – 9.18, Oslo.

- Holm, G., Tränk, R. och Ekström, A. (1987).** Kalkpelare med gips som tillsatsmedel. Rapport No 30, Statens Geotekniska Institut, Linköping.
- Johansson, S.-E. (1994A).** Cement. Kap. 2 i Betonghandbok – Material, Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm.
- Johansson, S.-E. (1994B).** Tillsatsmaterial. Kap. 6 i Betonghandbok – Material, Svensk Byggtjänst och Cementa AB, Stockholm.
- Larsson, S. (2000).** Blandningsmekanismer och blandningsprocesser – med tillämpning på pelarstabilisering. Rapport 6, Svensk Djupstabilisering, Linköping.
- Müller-Vonmoos, M. (1983).** Die Bedeutung der Tonminerale für das bodenmechanische Verhalten. Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Studientag, 4. Nov., Fribourg.
- Pihl, H. och Kuusipuro, K. (1997).** Kalk och kalkstabilisering. Partek Nordkalk AB, Köping.
- Pousette, K. (2001).** Stabilisering av torv – Olika faktorerers inverkan på stabiliseringseffekten. Rapport 2001:06 (Licentiatuppsats), Avd. Geoteknik, Luleå tekniska universitet, Luleå.
- Rutle, J. (1958).** Cement – Fremstilling og egenskaper. Teknisk Ukeblad, Oslo.
- Schröder, F. (1968).** Blast furnace slags and slag cements. Proceedings of the 5<sup>th</sup> international symposium on the chemistry of cements, vol. IV, pp 149 – 199, Tokyo.
- Taylor, H. F. W. (1990).** Cement Chemistry, Academic Press, London.
- Young, J. F. (1985).** Hydration of Portland Cement. Part of Instructional Modules in Cement Science. Journal of Materials Education, The Pennsylvania State University.
- Ysberg, G. (1979).** Samband mellan vattencementtal/vattenluftcementtal och tryckhållfasthet. CBI rapport Ra 3:79, Stockholm.
- Åhnberg, H., Johansson, S.-E., Retelius, A., Ljungkrantz, C., Holmqvist, L. och Holm, G. (1995).** Cement och kalk för djupstabilisering av jord, En kemisk – fysikalisk studie av stabiliseringseffekter. Rapport No 48, Statens Geotekniska Institut, Linköping.
- Åhnberg, H. och Pihl, H. (1997).** Kalktypens inverkan på stabiliseringsresultatet – Förstudie. Rapport 2, Svensk Djupstabilisering, Linköping.

## Rapport

- 1. Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare.** 1997  
Torbjörn Edstam
- 2. Kalktypens inverkan på stabiliseringsresultatet. En förstudie.** 1997  
Helen Åhnberg & Håkan Pihl
- 3. Stabilisering av organisk jord med cement- och puzzolanreaktioner** 2000  
Karin Axelsson, Sven-Erik Johansson & Ronny Andersson
- 4. Provbanks på kalk/cementpelarförstärkt gyttja och sulfidhaltig lera i Norrala** 1999  
Rolf Larsson
- 5. Masstabilisering** 2000  
Nenad Jelusic
- 6. Blandningsmekanismer och blandningsprocesser – med tillämpning på pelarstabilisering** 2000  
Stefan Larsson
- 7. Deformation Behaviour of Lime/Cement Column Stabilized Clay** 2000  
Sadek Baker
- 8. Djupstabilisering med kalkcementpelare – metoder för produktionsmässig kvalitetskontroll i fält** 2001  
Morgan Axelsson
- 9. Olika bindemedels funktion vid djupstabilisering** 2001  
Mårten Janz & Sven-Erik Johansson



**Svensk Djupstabilisering**

c/o SGI, 581 93 Linköping  
Tel: 013-20 18 61, Fax: 013- 20 19 14.  
Internet: [www.swedgeo.se/sd](http://www.swedgeo.se/sd)