



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Rapport 6

Blandningsmekanismer och blandningsprocesser – med tillämpning på pelarstabilisering

Stefan Larsson

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

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



Svensk Djupstabilisering
Swedish Deep Stabilization Research Centre

Rapport 6

Blandningsmekanismer och blandningsprocesser – med tillämpning på pelarstabilisering

Stefan Larsson

Denna rapport är även publicerad som Litentiate Thesis
Division of Soil and Rock Mechanics
Department of Civil and Environmental Engineering
Royal Institute of Technology

TRITA-AMI LIC 2052
ISSN 1400-1292
ISRN KTH/AMI/LIC--2052--SE

Linköping 2000

Rapport	Svensk Dju stabilisering 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--00/6--SE
Upplaga	400
Tryckeri	Roland Offset AB, Linköping, juni 2000

Förord

Föreliggande uppsats behandlar blandningsmekanismer och blandningsprocesser med tillämpning på pelarstabilisering. Arbetet har främst utförts som en litteraturstudie med tyngdpunkt på litteratur inom processindustrin. Denna litteraturstudie har legat till grund för en beskrivning och diskussion av blandningsprocessen och faktorer som påverkar processen i samband med pelarstabilisering. Inom projektet har också fält- och laboratorieförsök genomförts.

Arbetet har utförts på Institutionen för anläggning och miljö, avdelningen för jord- och bergmekanik, KTH, Stockholm. Projektet ingår i Svensk Djupstabilisering, en branschgemensam FoU-satsning i Sverige.

Projektet har finansierats av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Svensk Djupstabilisering, Tyréns Infrakonsult AB, KTH, Hercules Grundläggning, Stabilator och LC-Markteknik.

Ett varmt tack riktas till min handledare lektor Sven-Erik Rehnman och professor Bengt Broms samt min kollega Morgan Axelsson för deras engagemang i projektet.

Slutligen ett stort tack till all personal på avdelningen för jord- och bergmekanik.

Stockholm, maj 2000

Stefan Larsson

Sammanfattning

Kemisk djupstabilisering, med kalk och cement som blandas in i jorden för att forma pelare, har använts i mycket stor omfattning i de skandinaviska länderna för att reducera sättningar och öka stabiliteten för konstruktioner såsom vägar och järnvägar. Nya och allt djärvare tillämpningar såsom släntstabilisering och stabilisering av höga bankar ställer allt högre krav på pelarnas kvalitet med avseende på likformighet och distribution av bindemedel. Olika tillämpningar och funktioner ställer olika krav på pelarnas egenskaper och därmed kvalitet. Trots omfattande erfarenheter sedan introduktionen i slutet av 1960-talet är kunskapen om de grundläggande mekanismerna i blandningsprocessen mycket begränsade.

Föreliggande projekt ingår i den branschgemensamma forskningsinsatsen Svensk Djupstabilisering. Projektet syftar till att ta fram underlag för entreprenörernas och maskintillverkarnas egna utveckling av blandningsförfarandet genom att öka kunskaperna om de grundläggande teorierna och mekanismerna vid blandning av bindemedel och jord.

Uppsatsen inleds med en redovisning av en omfattande studie av litteratur som publicerats inom processindustrin där blandning av olika material står som en central del av verksamheten. Trots att utveckling och design av olika typer av blandningsprocesser fortfarande är något av en "svartkonst" har 50 år av forskning och diskussion i vetenskaplig tidskrift lett till en betydande utveckling av olika typer av blandningsprocesser. De tre första kapitlen i uppsatsen behandlar blandningsmekanismer, grundläggande utformningar av blandningsutrustningar respektive uppmätning och bedömning av blandningskvalitén. Tyngdpunkten i litteraturstudien läggs på blandning av partikelsuspensioner och laminära blandningsmekanismer. Den kanske viktigaste slutsatsen i denna del av uppsatsen är att litteraturstudien lägger en viktig och alldeles nödvändig bas för uppsatsens primära uppgift, vilken är att beskriva och diskutera blandningsprocessen vid pelarstabilisering.

Vid alla typer av processer där man blandar olika material är det av vikt att ha en god kunskap om de ingående materialens reologiska egenskaper för att skapa de nödvändiga grundförutsättningarna för en förståelse av blandningsprocessen. Lersuspensioner har mycket komplexa reologiska egenskaper och inblandning med bindemedel, t.ex. kalk eller cement, gör egenskaperna ännu mer komplexa. Lersuspensioner har visköst elastiska egenskaper vilket medför att rörelser som skapas, t.ex. av ett blandningsredskap, snabbt dör ut. Relativa rörelser mellan olika element i en blandning, vilket är förutsättningen för att blandning skall ske, sker endast i en mycket begränsad volym runt ett blandningsverktyg. Ett ytterligare problem är svårigheterna att kvantitativt uppmäta reologiska egenskaper i tunga partikelsuspensioner. Kunskaperna är därför mycket begränsade avseende de reologiska egenskaperna i lersuspensioner vid mycket snabba deformationsförlopp som är fallet vid en blandningsprocess. Det saknas därför grundläggande forskning på området

vilket tyvärr medför att tillämpade studier kring blandningsförlopp i lersuspensioner blir av empirisk karaktär.

Huvuddelen av uppsatsen behandlar tillämpningen pelarstabilisering. Blandningsprocessen vid pelarstabilisering är mycket komplex med många olika moment och en mängd faktorer som påverkar processen och dess resultat. Det är svårt att helt särskilja de olika mekanismerna vid blandningsprocessen, men det är viktigt att förstå hur de olika mekanismerna påverkar varandra. Olika delprocesser i blandningsprocessen beskrivs utifrån den metod som används i de skandinaviska länderna. En viktig slutsats är att den första delen i dispergeringsprocessen, fördelning av bindemedel från blandningsverktyget in i den omgivande jorden, är den viktigaste delprocessen för en fungerande blandningsprocess. Vidare redovisas en litteraturstudie och en diskussion avseende faktorer som påverkar processen. Det har tyvärr inte publicerats några omfattande studier avseende blandningsprocesser vid pelarstabilisering utan flertalet av de studier som refereras i uppsatsen är fragmentariska och mycket begränsade i sin omfattning.

En genomgång av olika varianter på pelarstabilisering och olika typer av redskap som används i världen visar att utvecklingen av blandningsprocessen och blandningsverktyg har varit mycket långsam och begränsad i de skandinaviska länderna. I Japan har en utveckling av metoden, främst under 1980-talet, lett till att det idag finns en rad olika varianter av metoden och därmed ett mycket brett tillämpningsområde.

Inom projektet har också fältförsök och några enklare laboriestudier utförts. Dessa studier är mycket fragmentariska i förhållande till litteraturstudierna som behandlar hela blandningsprocessen.

I samarbete med ett angränsande forskningsprojekt togs ett stort antal prover från upptagna hela kalkcementpelare. Studien syftar till att studera spridningen av bindemedel i produktionstillverkade kalkcementpelare genom att mäta bindemedelshalten i upptagna prover. Vidare diskuteras huruvida statistiska analyser och blandningsindex kan användas för att göra bedömningar av blandningskvalitén. Studien visar att blandningsindex kan användas för att kvantitativt bedöma blandningskvalitén. Testresultaten visar att provstorleken har en betydande inverkan då blandningskvalitén är dålig och en mindre inverkan då blandningskvalitén är relativt god. Studien visar också att det är svårt att dra slutsatser avseende bindemedelspridningen utifrån ett få antal prover eftersom distributionen varierar över pelarlängden och mellan olika pelare. För att undvika ett stort antal prover vid bedömning av blandningskvalitén måste kunskaperna öka avseende blandningsprocessen och bindemedelspridningen.

Summary

The dry jet mixing method, where lime and cement are mixed into the soil to form columns with a hardening effect on the soil, has been used extensively in the Scandinavian countries to reduce settlements and stabilise soft soils. The method is under rapid development with new applications such as the stabilisation of deep excavations and high embankments. These new applications may require a better mixing quality and better control over the mixing process in the stabilised soil. Both clients and contractors are in need of methods for evaluating the mixing quality. Different applications may require different properties and thereby different mixing qualities. Although the method has been used for over 20 years and has become a large-scale industry, knowledge about the fundamentals of the mixing process is limited. There is also a lack of methods for investigating the different parts of the mixing process.

The present project is part of Svensk Djupstabilisering (the Swedish Deep Stabilization Research Centre). The purpose of this thesis is to form a basis for development of the mixing process by increasing knowledge of the fundamental theories and mechanisms when mixing binders and soft soils.

The thesis begins with a presentation of an extensive literature survey in the process industry. Mixing operations are used widely in industrial production processes where physical and chemical changes occur. Present knowledge of the various mixing processes is mainly based on investigations by the chemical industry relating to the manufacture of pharmaceuticals, paper, plastics, ceramics and rubber. In spite of extensive research over a long period, there is still a lack of fundamental understanding of complex mixing processes.

The first three chapters deal with mixing mechanisms, basic mixing operations and equipment, and assessment of the mixing quality, respectively. The focus is on mixing of particle suspensions and laminar mixing mechanisms. The principal conclusion from this part of the thesis is that the literature survey provides a key implement for the primary purpose, describing and discussing the mixing process in the deep mixing method.

The process of mixing is highly dependent on the properties of the materials concerned. When different types of materials are mixed, it is important to have a thorough knowledge of the rheological properties of the materials. When these are known, it is possible to forecast the mechanisms which are essential for mixing and thereby to determine which mixing processes should be chosen. Normally, the behaviour of particle suspensions is very complex. With a dry binder, the soil mixture becomes even more complex. The viscous elastic properties of a soft soil reduce the movements around the mixing device. Relative motions between different elements in the mixture, which are a prerequisite for mixing to occur, only take place in a narrow volume around the mixing device. Another

problem lies in the difficulties of measuring the rheological properties of a clay soil during very rapid deformation. Basic knowledge is lacking and the technique becomes empirical.

The main part of the thesis deals with the application of deep mixing. The mixing process is very complex, with many phases and several factors that influence the process and the results. Although it is difficult to distinguish the different mechanisms during a mixing operation, it is important to understand how they affect both each other and the outcome. The different parts of the mixing process are described on the basis of the dry jet mixing method, used in the Scandinavian countries. An important conclusion is that the first part of the process, the distribution of the binder from the mixing device into the soft soil, is most critical for the process to perform as required.

The influence of various factors on the mixing process is described and discussed. Unfortunately, no extensive studies have been published concerning mixing processes in deep mixing methods. Most of the studies referred to in this thesis are fragmentary and of very limited scope.

A survey of different variants of deep mixing methods worldwide shows that the development of the mixing process and mixing devices has been very slow and limited in the Scandinavian countries. In Japan, development of the method has resulted in a number of versions and thereby a broad area of application.

During the project, a number of laboratory investigations have been performed. However, these are very fragmentary compared with the literature survey, which deals with the whole mixing process.

In co-operation with a parallel project, a large number of samples were taken from a number of lime-cement columns that had been extracted. The purpose was to study the distribution of binders in the columns by measuring the binder content in the samples. The discussion deals with the possibility of applying statistical analysis to measure the mixing quality when using the dry jet mixing method. The study shows that mixing indices can be used as a quantitative measure of the mixing quality. The results indicate that the sample size has considerable influence when the mixing quality is poor and limited influence when the mixing quality is relatively good. It is also shown that it is difficult to draw conclusions concerning the distribution of binder when using only a few samples, since the distribution may vary. With more extensive knowledge, it might be possible to assess the mixing quality without increasing the number of samples.

Innehållsförteckning

Förord	3
Sammanfattning	5
Summary	7
Begrepp	11
1. Inledning	15
1.1 Syftet med blandningsprocesser	15
1.2 Pelarstabilisering	15
1.3 Problem och kunskapsbehov kring blandningsmekanismer	17
1.4 Syfte och genomförande	17
1.5 Viktig litteratur	18
2. Blandningsmekanismer	19
2.1 Inledning	19
2.2 Klassificering av blandningsmekanismer	19
2.3 Klassificering av flödestyper	20
2.4 Agglomeratbildning och segregation	21
2.5 Krafter och mekanismer som blandar	22
2.6 Dispersion av fina partiklar i en vätska	30
3. Blandningsutrustningar	35
3.1 Inledning	35
3.2 Dispersion och upplösning i vätskor	35
3.3 Blandning av pastor och plastiska material	43
4. Blandningskvalitet	51
4.1 Inledning	51
4.2 Beskrivning av kvaliteten i en blandning	52
4.3 Skalan av betraktelse	53
4.4 Skalan och intensiteten av segregation	54
4.5 Blandningsindex	57

4.6	Uppmätning av blandningskvalitén	60
5.	Reologi	65
5.1	Inledning	65
5.2	Reologiska egenskaper	66
5.3	Uppmätning av de reologiska egenskaperna	73
5.4	Reologiska egenskaper vid delvis omrört tillstånd	75
5.5	Reologiska egenskaper vid inblandning av kalk och cement	77
6.	Pelarstabilisering	81
6.1	Inledning	81
6.2	Kort historik	81
6.3	Blandningsprocessen	82
6.4	Påverkande faktorer	94
6.5	Laboratoriefilosofi samt förhållande mellan laboratorieförsök och fält	110
6.6	Blandningsredskap	114
6.7	Diskussion kring några karaktäristiska defekter	130
7.	Bedömning av blandningskvalitén – fältförsök Arboga	133
7.1	Inledning	133
7.2	Metoder och material	134
7.3	Resultat	139
7.4	Diskussion	145
7.5	Slutsatser	148
8.	Fortsatt forskning	151
	Referenser	155
	Appendix A	
	Appendix B	
	Appendix C	

Begrepp

Agglomerat	En samling av primära partiklar och aggregat som är sammansatta vid ändar och hörnor kallas agglomerat. Den specifika ytan är inte mycket mindre än summan av beståndsdelarnas area
Aggregat	Aggregat är grupper av primära partiklar sammanfogade i deras ytor och har en specifik yta som är mindre än summan av areorna av de ingående partiklarna
Binghamplastisk fluid	Fluiden skiljer sig från en Newtonsk fluid endast genom att det linjära förhållandet mellan skjuvspänningen och töjningshastigheten ej går genom origo.
Blandningstid	Den tid det tar att blanda från ett givet begynnelsestillstånd till ett slutligt föreskrivet tillstånd av blandningskvalitet. D. v. s. den tid som erfordras för att blandningen av de ingående substanserna skall uppnå en specificerad grad av likriktighet.
Deg	Ett icke- Newtonskt material som har elastiska och viskösa flödesegenskaper
Diffusiv blandning	Naturlig eller spontan blandning. Komponenterna blandar sig själva.
Dilatant flöde	Den skenbara viskositeten ökar med ökad töjningshastighet för detta flödesbeteende.
Dispergera	Fördela (sig) i form av småpartiklar i en vätska.
Dispersion	Kemisk blandning i form av små partiklar i vätska.
Dispersiv blandning	Blandning där storleken på de ultimata partiklarna är reducerade.
Distributiv blandning	Blandning genom omfördelning genom skiktning och återställning.
Dynamisk viskositet	Viskositetskoefficienten μ (Pa·s) kallas numera dynamisk viskositet.
Flockbildning	Suspenderade partiklar som är bundna tillsammans med svaga strukturer i en vätska
Fluid	Vätska, flytande.

Flytspänning	Den minimala spänning som erfordras i ett material för att bryta upp dess strukturen tillräckligt för att åstadkomma rörelser. En suspensionen har en flytspänning som ger suspensionen egenskaper som ett solid material då spänningarna i materialet ej överskrider flytspänningen.
Flöde	I denna rapport: Material i rörelse.
Granulöst- visköst mtrl.	En partikelsuspension som har både solida material-egenskaper och viskösa flödesegenskaper.
Intensiteten av segregation	Intensiteten av segregation (I_S) är ett mått på skillnaden i koncentration mellan närliggande klumpar i blandningen. Beskriver effekten av molekylär diffusion i blandningsprocessen.
Laminär blandning	Reduktion av skalan av segregation eller skiktjocklek genom laminär deformation (skjuvning, sträckning, skivning och vikning).
Makroblandning	Blandning genom turbulent eller laminär rörelse i en skala som är större än den minsta skiktjockleken eller minsta virvelstorleken.
Mikroblandning	Blandning genom molekylär diffusion i en skala som är mindre än den minsta skiktjockleken eller minsta virvelstorleken.
Molekylär diffusion	Reduktion av intensiteten av segregation. Transporten eller rörelsen av individuella molekyler genom en fluid menat som slumpvis, individuella rörelser av molekylerna. Ex. kalciumjoner som reagerar med lermineralens kisel och aluminium under en lång tid.
Newtonsk fluid	En fluid där skjuvspänningen är proportionell mot töjningshastigheten klassas som en Newtonsk fluid.
Pasta	En icke- Newtonsk dispersion med hög koncentration av solida partiklar i en vätska. Skjuvspänningen i materialet är inte proportionell mot töjningshastigheten.
Plastiskt flöde	Dessa material karaktäriseras av en flytspänning som måste övervinnas för att rörelser skall uppkomma i materialet.
Pseudoplastiskt flöde	Den skenbara viskositeten minskar med ökad töjningshastighet för detta flödesbeteende.

Reologi	Läran om materiens deformations- och flytegenskaper.
Skalan av segregation	Skalan av segregation (L_S) är ett mått på storleken av oblandade klumpar av ren konsistens och är ett mått på en genomsnittlig storlek.
Skiktjocklek	Genomsnittligt avstånd mellan angränsande gränsskikt av material som blandas genom laminära blandningsmekanismer.
Suspension	Uppslamning av fasta partiklar i en vätska.
Tixotropisk fluid	Dessa fluider visar en reversibel minskning av skjuvspänningen med tiden vid konstant töjningshastighet.
Turbulent blandning	Reduktion av skalan av segregation genom godtycklig turbulent rörelse i materialet.
Töjningshastighet	Hastighetsgradienten vid skjuvning eller förlängning (eng. shear rate) $\dot{\gamma} = \frac{du}{dxdt} = \frac{dv}{dx} \left[\frac{m}{ms} = s^{-1} \right]$
Uppehållstid	Tiden som ett element spenderar mellan inträde till och utgång från blandaren, etc.
Viskoplastisk fluid	Den skenbara viskositeten är inte konstant med töjningshastigheten. Se dilatant- och pseudoplastisk fluid.
Viskositet	Inre friktion, seghet (grad av). (av lat viscosus = klibbig)
Viskösa fluid	Fluid som har stor viskositet (klibbig, trögflytande, seg).
Visköst elastiska material	Ett material som har både elastiska och viskösa egenskaper. Materialet visar elastisk återställning från den deformation som uppstår under rörelse.
Vätning	Ersättning av gas (eller ånga) med en vätska från ett solid materials yta.
Vätska	Ämne i flytande tillstånd.

1. Inledning

1.1 Syftet med blandningsprocesser

Blandning och homogenisering av olika material är en viktig process inom en mängd områden t.ex. livsmedel-, kemisk-, pappers-, gummi- och betongindustri. Blandningsprocesser utförs främst för att åstadkomma ändringar i de fysikaliska, kemiska och biologiska egenskaperna.

En blandningsprocess reducerar olikformigheter eller gradienter i sammansättningar, egenskaper eller temperaturer i basmaterial eller produkter (Uhl & Gray 1966).

Syftet med blandning är homogenisering (reduktion av temperatur- eller koncentrationsgradienter eller reduktion av båda) och att blandning kräver att ingredienserna är i rörelse (Sterbacek & Tausk 1965).

Rörelse åstadkommen av t.ex. mekanisk blandning kan vara nödvändig för att t.ex. aggregat skall brytas upp så att solida partiklar kan dispergera i en vätska. De olika formerna av rörelse utgör mekanismerna för blandning (Nienow et al. 1992).

Det kan krävas en likformig distribution av ingredienserna för att t.ex. en slutprodukt skall erhålla en viss struktur eller för att en förväntad kemisk reaktion skall inträffa. Kraven på likformighet i en blandningsprocess varierar utifrån de krav som ställs på slutprodukten eller funktionen.

Blandning mellan två material sker när de kommer i kontakt med varandra och deformerar så att kontaktytan ökar mellan dem. Vätskor med hög viskositet har stor förmåga att motstå deformation och molekylär rörelse och diffusion är låg. Relativt stora krafter krävs för att övervinna detta motstånd. Blandning sker också då materialen skärs i mindre element och omfördelas. En tillfredsställande blandningsprocess producerar en erforderligt likformig blandning under kortast möjliga tid och till lägsta möjliga kostnad för maskin, kraft och arbetskraft.

I denna uppsats beskrivs de grundläggande teorierna och mekanismerna för främst blandning av vätskor och solida material. Den litteraturstudie som utförts behandlar främst litteratur som publicerats inom processindustrin som utfört forskning inom området sedan 1940-talet.

1.2 Pelarstabilisering

Pelarstabilisering används i mycket stor omfattning, speciellt inom utbyggnaden av infrastrukturen, för att stabilisera och sättningsreducera lösa jordar. Erfarenheterna har varit goda och metoden har stor utvecklingspotential. Metoden är under stark utveckling av-

seende metodens tillämpbarhet, kostnadseffektivitet och exportpotential. Vid tillverkning av pelare ställs allt högre krav på likformighet vad gäller pelaregenskaperna både längs pelaren, inom pelartvårsnittet och inte minst ställs krav på att de olika pelarna i konstruktionen tillverkas med likformiga egenskaper. För att kunna förbättra tillverkningsprocessen behöver bl.a. kunskaperna om de grundläggande teorierna och mekanismerna vid inblandning av stabiliseringsmedel i jord förbättras.

I de nordiska länderna används nästan uteslutande trycklyft som bärande media för distributionen av kalk och cement från tank till jord. Metoden går under namnet ”den torra metoden”. Alternativet idag är att förblanda bindemedlet, i regel cement, med vatten och på så sätt skapa ett cementbruk. D.v.s. stabiliseringsmedlet distribueras i flytande form till jorden. Metoden går under namnet ”den våta metoden” och den tekniken är den vanligast förekommande i bl.a. Japan.

Att använda tryckluft som bärande media för stabiliseringsmedlet medför fördelen att det åtgår relativt lite bindemedel för att uppnå erforderlig hållfasthetstillväxt. I och med att lösa jordar redan innehåller mycket vatten, ter det sig naturligt att inte blanda in ännu mer vatten i jorden vilket är fallet då den våta metoden används. Men i ett redan mycket komplext material vad gäller de reologiska egenskaperna i lösa jordar medför inblandning av luft ytterligare svårigheter vad gäller blandningsprocessen. I blandningsprocessen medför luftburet stabiliseringsmedel en komplicerad dispersionsprocess vad gäller vätning av kalk- och cementpartiklar och uppbyggnad av agglomeratbildning.

Syftet med blandningsprocessen vid pelarstabilisering är att distribuera och fördela stabiliseringsmedlet på ett sådant sätt att likformiga pelare erhålls som har de egenskaper som krävs för den aktuella funktionen.

Det förekommer en serie av moment och blandningsmekanismer vid pelarstabilisering. Jämfört med t.ex. blandning av två blandningsbara vätskor i en tank är blandningsprocessen vid pelarstabilisering mycket komplex och det är svårt att kontinuerligt följa hela tillverkningsprocessen. Den stora variationen beträffande geologin i en lokal, svårigheten att förutbestämma de reologiska egenskaperna i blandningen, fältförhållanden gällande utrustningen o.s.v., gör att det är svårt att följa och studera blandningsprocessen och blandningsmekanismerna i fält.

Blandningsprocessen påverkar pelarens fysikaliska och kemiska egenskaper såsom:

- 1 Likformighet. Egenskaper hos pelare kan variera både längs pelaren och inom pelartvårsnittet. Olika typer av heterogena egenskaper har iakttagits inom pelartvårsnittet bl.a. grymig konsistens, ansamlingar av stabiliseringsmedel längs pelarens periferi och morotsformade pelare.
- 2 Hållfasthetstillväxt och permeabilitet. Huvudsyftet med blandningsprocessen är att dispergera kalk och cement i jorden. Beroende på hur effektivt stabiliseringsmedlet dispergeras ändras förutsättningarna för hållfasthetstillväxten och permeabiliteten i pelaren.

1.3 Problem och kunskapsbehov kring blandningsmekanismer

Då blandningsprocesserna blir alltmer komplexa (blandning av flerfassystem såsom partikelsuspensioner), blir kraven på kvalitet och kostnadseffektivitet allt större. Trots att det har utförts många studier kring blandningsprocesser är blandning av olika material något av en konst. Det är fortfarande brister i de teoretiska kunskaperna kring olika blandningsprocesser. I praktiken vid nästan alla blandningsprocesser utför blandningsredskapen flera uppgifter, där vilken som helst av dessa kan vara den mest kritiska för produkten.

Inom processindustrin är design av blandningsprocesser inte baserad på väl etablerad vetenskap. Val och utformning av blandare sker fortfarande med ett beräkningsförfarande genom passning med lämpligt övervägande med tidigare erfarenheter (Short & Etchells 1982). Vid design väljs de blandningsredskap som förväntas ge bästa resultatet. Sedan utförs ofta laboratorieförsök i skala på dem. Beroende på vilken faktor som förväntas vara den mest kritisk kan en specifik faktor hållas konstant då skalan förstoras. Denna ansats fungerar relativt bra vid design av blandningsprocesser med vätskor men fungerar relativt dåligt då man blandar suspensioner med hög partikelkoncentration vilket är fallet vid inblandning av kalk och cement i lösa jordar t.ex. leror.

Branschen för pelarstabilisering förändras i den meningen att kunna konkurrera genom att tillverka en god produkt med maximal effektivitet. Effektiviteten hos en specifik blandningsprocess varierar med egenskaperna i jorden och hos bindemedlen. Det behövs alltså en ökad kunskap och förståelse för att kunna utveckla metoden.

Några problem som behöver lösas vid förbättring eller design av en blandningsprocess:

- 1 Design av inblandningsverktyg.
- 2 Kontroll av inblandningsförfarandet.
- 3 Reologiska egenskaper hos de blandade materialen.
- 4 Standard för jämförelse av olika inblandningsverktyg.
- 5 Klassifikation och mätning av blandningskvalitén.
- 6 Beskrivning av blandningsprocessen.
- 7 Beskrivning av blandningsmekanismerna.

1.4 Syfte och genomförande

Syftet med föreliggande uppsats är att skapa ett underlag för entreprenörernas och maskintillverkarnas egen utveckling av blandningsprocessen vid pelarstabilisering genom att öka kunskaperna om de grundläggande teorierna och mekanismerna vid inblandning av bindemedel i jord. Arbetet har främst genomförts som en litteraturstudie.

Kapitel 2, *Blandningsmekanismer*, behandlar grundläggande teorier och mekanismer vid blandning av främst vätskor och solida material.

Kapitel 3, *Blandningsutrustningar*, är en genomgång av grundläggande utformningar på blandningsutrustningar som används i processindustrin för blandning av vätskor och solida material.

Kapitel 4, *Blandningskvalitet*, utgör en sammanställning av enkla statistiska analyser och blandningsindex för uppskattning av blandningskvalitet i olika typer av blandningar.

Kapitel 5, *Reologi*, diskuterar reologiska egenskaper i lösa jordar och hur dessa egenskaper påverkar en blandningsprocess.

Kapitel 6, *Pelarestabilisering*, beskriver och diskuterar blandningsprocessen, blandningsmekanismer och faktorer som påverkar processen vid inblandning av bindemedel i lösa jordar. Vidare diskuteras den blandningsutrustning som används vid pelarestabilisering i främst de nordiska länderna samt i Japan.

Kapitel 7, *Bedömning av blandningskvaliteten – fältförsök Arboga*, presenterar en statistisk analys av blandningskvaliteten i samband med kemiska analyser av ett stort antal prover tagna från fyra kalkcementpelare.

Kapitel 8, *Fortsatt forskning*, behandlar kunskapsbehovet inom området.

1.5 Viktig litteratur

Trots att det inte bedrivits någon väl organiserad och sammanfattande forskning kring blandningsprocesser så finns det en hel del litteratur som översiktligt behandlar området. Nedan listas en del av den litteratur som kan rekommenderas och som denna rapport baseras på.

Hamby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W., 1992. *Mixing in the Process Industries*. Second Edition. Ger en mycket god översikt över olika blandningsmekanismer och tillämpningar.

Sterbacek, Z. & Tausk, P., 1965. *Mixing in the Chemical Industry*. Trots att denna bok är skriven för över 30 år sedan är den i högsta grad fortfarande aktuell för att ge en god översikt över olika blandningsmekanismer och dess tillämpningar.

Barnes, H.A., Hutton, J.F. and Walters, K., 1989. *An Introduction to Rheology*. Rheology Series, 3. Ger en god introduktion till vetenskapen reologi.

Yonekura, R., Terashi, M. and Shibazaki, M. 1996. *Grouting and Deep Mixing*. Proceedings of IS-Tokyo '96. The 2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May 1996. Vol. 1-2. En mycket omfattande sammanställning av metoden pelarestabilisering med tillämpningar, egenskaper och design.

Bredenberg, H., Holm, G. and Broms, B.B. 1999. *Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*. Proceedings of the International Conference on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Stockholm, Sweden, 13-15 Oct. 1999. Ett bra komplement till Japan-konferensen, IS-Tokyo '96, där främst "den torra metoden" avhandlades.

2. Blandningsmekanismer

2.1 Inledning

Som nämndes i inledningskapitlet så reducerar blandningsprocesser olikformigheter eller gradienter i sammansättningar, egenskaper eller temperaturer i basmaterial eller produkter (Uhl & Gray 1966). Förståelse för de rörelser som åstadkommer dessa reduktioner i vätskor och solida material, är en viktig grundförutsättning vid en design eller en förbättring av en blandningsprocess. Olika former av rörelse utgör mekanismerna vid blandning (Nienow et al. 1992).

Föreliggande kapitel avser att gå igenom de grundläggande mekanismerna vid blandning av främst vätskor och partikelsuspensioner. Eftersom lösa jordar är partikelsuspensioner med i regel en mycket hög partikelkoncentration läggs tyngdpunkten på laminära blandningsmekanismer. Vidare berörs dispergeringsprocessen av solida partiklar i vätskor.

Litteraturen som citeras i detta kapitel kommer främst från processindustrin där den tillgängliga forskningen avseende blandningsmekanismer utförts. Blandningsmekanismer i samband med pelarstabilisering diskuteras i Kapitel 6.

2.2 Klassificering av blandningsmekanismer

En generell klassifikation av blandningsprocesser är oberoende av produkt eller industri. Blandningsprocesser kan delas in enligt följande (Nienow et al. 1992):

- 1 Enfasvätska
- 2 Vätska- vätska
- 3 Solid material- vätska
- 4 Gas- vätska
- 5 Trefasssystem
- 6 Solida material

Djupstabilisering med kalk- kalk/cement- och cementpelare involverar solida material (kalk och cementpartiklar), lersuspension med hög partikelkoncentration och gas (luft). Det är stora differenser beträffande de kemiska och fysikaliska egenskaperna mellan de olika faserna vilket medför extremt komplexa egenskaper hos dessa system som kan variera under olika betingelser.

Även om de flesta typer av blandningsredskap används för att blanda material med skiftande flödesegenskaper så är de ingående materialens egenskaper viktiga vid design av blandningsutrustningen. Det kan vara så att varje typ av utrustning utför optimala prestanda endast för en begränsad vidd av olika egenskaper i blandningar.

Reologi är läran om materials deformations- och flytegenskaper. Ur reologisk synpunkt flyter alla material bara man väntar tillräckligt länge. Vätskor (fluider) som blandas kan delas in i (Lindley 1991a):

- 1 Newtonsk.
- 2 Icke-Newtonsk.
- 3 Visköst elastisk.

Några enkla flödesmodeller behandlas i Appendix A.

Tillsatta material kan delas in i (Lindley 1991a):

- 1 Kohesivt solida material.
- 2 Pulver.
- 3 Klibbiga solida mtrl.
- 4 Torra solida mtrl.

2.3 Klassificering av flödestyper

Partikelsuspensioner såsom lersuspensioner och kalk- och cementpartiklar suspenderade i lera visar egenskaper som avviker från Newtonsk vätska, d.v.s. de flesta partikelsuspensioner med relativt höga partikelkoncentrationer har icke- Newtonskt eller visköst elastiska egenskaper.

Egenskaperna hos ett plant flöde (relativ rörelse mellan elementen i materialen) kan beskrivas med två parametrar för ej kompressibla material: Graden av deformation, ε och graden av rotation, ω . Ett tal som karakteriserar flöden, R , tecknas som (Giesekus 1983):

$$R = \frac{(\varepsilon^2 - \omega^2)}{(\varepsilon^2 + \omega^2)} = \frac{(1 - r_0^2)}{(1 + r_0^2)} \quad (2.1)$$

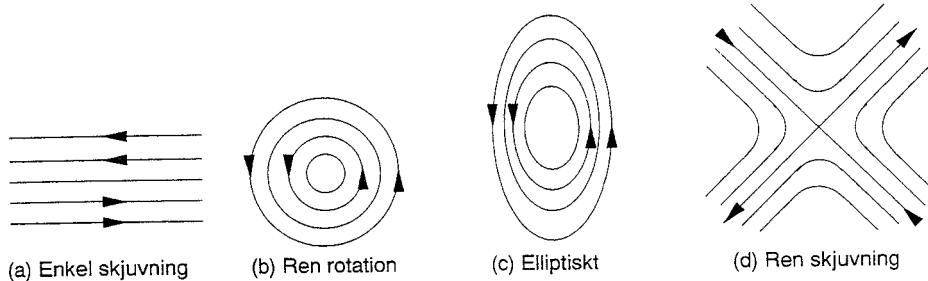
där $r_0 = \omega / \varepsilon$

Två klasser av flöden definieras som:

Hyperboliskt flöde:	$0 < \omega < \varepsilon$	$0 < r_0 < 1$	$0 < R < 1$
Elliptiskt flöde:	$\varepsilon < \omega < \infty$	$1 < r_0 < \infty$	$-1 < R < 0$

Dessa är begränsade av:

Rent skjuvande flöde:	$\omega = 0$	$r_0 = \infty$	$R = 1$
Enkelt skjuvande flöde:	$\omega = \varepsilon$	$r_0 = 1$	$R = 0$
Rent roterande flöde:	$\varepsilon = 0$	$r_0 = \infty$	$R = -1$



Figur 2.1 Olika typer av plana flöden. (efter Giesekus 1983)

Vanlig skjuvning kan förstås som en relativ glidning mellan stabila lager med oändligt liten tjocklek. Avståndet mellan partiklarna i ett lager är konstant och ändras endast om de är i olika lager. Rotationsgraden är lika med deformationsgraden.

I en blandningsprocess med en icke-Newtonsk vätska uppkommer vanligtvis en kombination av alla typer av flöden. Materialet har olika reologiska egenskaper beroende på typen av flöde (Giesekus 1983). I en blandningsprocess kan således blandningen ha skiftande reologiska egenskaper i olika delar av blandningen.

2.4 Agglomeratbildning och segregation

Eftersom blandningsprocesser involverar olika material med skiftande reologiska egenskaper är det viktigt att känna till faktorer som påverkar egenskaper i blandningen. Partiklar av material som tenderar till att bilda agglomerat har dåliga flödesegenskaper. Partiklar bildar agglomerat eller adheras till varandra p.g.a. växelverkande krafter. Följande mekanismer kan leda till agglomeratbildning (Coulson et al. 1979):

- a) Mekanisk blockering. Massor av långa tunna partiklar kan bli totalt blockerade.
- b) Ytattraktion: Dessa inkluderar Van der Waal's krafter, solida bindningar (stor specifik yta mot volymsandelen).
- c) Plastisk svetsning. Resultat av högt tryck som utvecklas av liten kontaktarea mellan ojämna partiklar.
- d) Elektrostatiske attraktioner. Rörelsen av fina partiklar kan resultera i laddningar.
- e) Effekten av fukt. Samlar nära punkter av kontakt mellan partiklar och resulterar i ytspänningseffekter. Fukt kan också lösa upp en del av partiklarna som sedan agerar som ett bindande hjälpmedel för efterföljande avdunstning.
- f) Temperaturväxling kan resultera i ändringar i partikelstrukturen och större kohesion. Perfekt blandning är det stadiet då alla delar av blandningen har samma komposition.

Segregation uppkommer p.g.a. skillnader i partikelstorlek, densitet, form, och/eller elasticitet. Storleksdifferenser är den viktigaste faktorn. Densiteten är ibland av betydelse.

De andra effekterna är i regel obetydliga. De följande faktorerna kan leda till segregation (Williams 1983):

- a) Partiklarnas rörelsebana där partiklar med olika storlek har olika hastighet.
- b) Perkolation av fina partiklar. De fina partiklarna rör sig mellan gap i partikelmassan.
- c) Grövre partiklar stiger av vibrationer.

2.5 Krafter och mekanismer som blandar

De fundamentala processerna för transport av materialen i en blandningsprocess är: Momenttransport i ett rörligt media, värmetransport och massrörelse (Geankoplis 1993).

Molekylära transportprocesser svarar för transport eller rörelse av en given egenskap genom molekylär rörelse genom ett system eller medium (Geankoplis 1993). De egenskaper som transporteras kan vara massa, termisk energi eller moment. Varje molekyl i ett system har en given kvantitet av massa, termisk energi eller moment associerad med den. Om en differens i koncentration av egenskapen existerar från en region till en angränsande kommer en transport av denna egenskap att ske. Graden av denna transport kommer att vara proportionell mot koncentrationsdifferensen och omvänt proportionell mot motståndet.

Rörelsemönstret runt ett blandningsredskap är i regel mycket komplext. Men motståndet mot ett blandningsredskap kan undersökas genom jämförelse med enkla flödesituationer. I ett laminärt flöde runt en sfär är det ingen separation av flödet och den viskösa förlusten av energin är en kontrollerbar faktor. Den totala kraften på sfären beror av den skjuvande kraften på ytan och skillnaden i tryck mellan fronten och baksidan på sfären. Tryckskillnaden är ett resultat av den viskösa förlusten av energi i flödet (Metzner & Otto 1957).

Blandningsmekanismerna kan sammanställas enligt följande (Lindley 1991a):

- a) Turbulens och diffusion för vätskor med låg viskositet.
- b) Uppbrytning och rekombination, deformation, laminärt flöde, skjuvflöde och strömlinjefflöde för vätskor med hög viskositet.
- c) Konvektion, diffusion och skjuvning för torra icke- kohesiva solida material.

Turbulent blandning

Det måste förekomma relativ rörelse mellan partiklar eller flödeselement för att blandning skall ske. När flödesgraden ökar blir flödet turbulent. Blandning av material uppkommer p.g.a. antingen spontan (diffusion eller fri konvektion) eller påtvingad rörelse (Sterbacek & Tausk 1965). Externa krafter måste läggas på för att överkomma motståndskrafterna i blandningen. Dessa krafter är: Tröghetskrafter som motstår ändringar i riktning eller hastighet och visköst motstånd eller skjuvkrafter. För vätskor med låg viskositet där turbulens är utvecklad så är tröghetskrafter det största motståndet mot blandning.

Om viskositeten är mindre än ungefär $10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ är flödet turbulent vid de flesta praktiska tillämpningar (Sterbacek & Tausk 1965). Turbulent flöde är en hydrodynamisk process där virvlar utvecklas. Flödeselementen rör sig inte bara i parallella lager utan också

i obestämda mönster. Blandningen effektiviseras då inte bara mellan molekyler utan också flödeselement passerar mellan individuella lager. Att göra en analys av det turbulenta flödet i t.ex. en blandningstank är mycket svårt p.g.a. de snabba tredimensionella rörelserna. För att avgöra om flödet är turbulent eller laminärt kan *Reynolds tal* kriteriet användas men det är också svårt att bestämma Reynolds tal. Det maximala värdet på Reynolds tal för laminärt flöde är $Re=10-20$, för blandningsprocesser i tankar.

Turbulent strömning kan ses som en superposition av ett spektrum av hastighetsväxlingar och virvelstorlekar i blandningen. Sambandet mellan skjuvspänning och töjningshastighet i turbulent flöde kan tecknas som (Sterbacek & Tausk 1965)

$$\tau = (\mu + \varepsilon) \frac{dv}{dy} \quad (2.2)$$

där μ är viskositeten (laminär inre friktion), ε är virvelviskositeten och dv/dy är töjningshastigheten eller skjuvhastighetsgradienten. Virvelviskositeten ε är inte konstant för ett flöde vid en given temperatur. Den är inte konstant i alla delar i flödet utan varierar från låga värden utmed flödesperiferin till höga värden i flödescentrum. För fullt utvecklad turbulens kan tillskottet från laminär inre friktion μ försummas och ekvationen ovan kan skrivas som

$$\tau = \varepsilon \frac{dv}{dy} \quad (2.3)$$

Partikelsuspensioner och solid-vätske blandningar är beroende av stora virvlar som bär mycket energi, d.v.s. icke isotrop turbulens (Nienow et al. 1992). Stora virvlar har stora hastighetsväxlingar med låg frekvens och är storleksrelaterade till blandningsredskapets geometri. Virvlar har stor betydelse för både distributiv och dispersiv blandning.

Precis som den inre friktionen, ökar också graden av diffusion då flödet blir mer och mer turbulent.

Laminär blandning

De mekanismer som åstadkommer blandning är laminärt- och turbulent flöde, virvel- och molekylär diffusion. Inre krafter och skjuvkrafter ansvarar för reduktionen av partikelstorleken och därmed ökningen gränsytearean mellan komponenterna. Om det existerar aggregat i materialen, d.v.s. starkt bundna klumpar, fungerar laminär blandning som en dispergerande process. D.v.s. stora töjningshastigheter bryter aggregaten och skapar en homogenisering.

Om det är nödvändigt med en snabb blandning så är metodens deformerande förmåga viktig (Gray 1963). En del flödesrörelser är mer effektiva än andra för deformation och blandning av vätskor med hög viskositet.

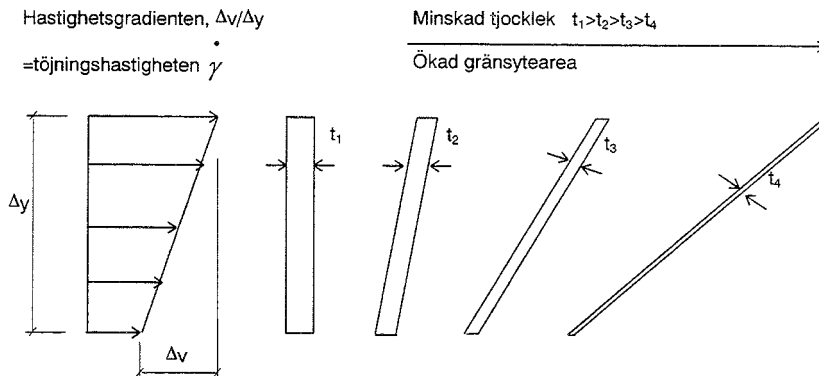
Det är önskvärt att ett flödesmönster åstadkommer rörelse i hela den volym som skall blandas. I vätskor med hög viskositet konsumeras den kinetiska energin i flödet av det viskösa motståndet. Vätskor med hög viskositet måste drivas av en rörlig yta eller av ett rörligt flöde in och ut ur alla delar av volymen. Denna omflyttning bör genomföras på ett

sätt som snabbt deformerar formen och sträcker ut arean mellan de material som skall blandas (Gray 1963).

De mekanismer som kan vara verksamma i laminära flöden är laminär skjuvning, extensionellt flöde, distributiv blandning, molekylär diffusion och skjuvspänningar (Edwards 1992). Laminär strömning är normalt associerat med högviskösa vätskor. Vid typiska grader av energitillförsel erfordras en viskositet som är större än ungefär $10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ för att flödet skall bli riktigt laminärt (Nienow et al. 1992). Högviskösa vätskor är som regel reologiskt komplexa. Intermediära krafter dör snabbt ut vid laminär strömning under påverkan av hög viskositet. Därför måste ett blandningsredskap ta upp en stor del av volymen som skall blandas. Nära redskapet existerar stora töjningshastigheter där laminär strömning deformerar och sträcker flödeselementen. Blandningsgraden bestäms av den totala töjningen som är en produkt av töjningshastigheten och tiden. En kombination av höga skjuvkrafter och lång tid förbättrar blandningen.

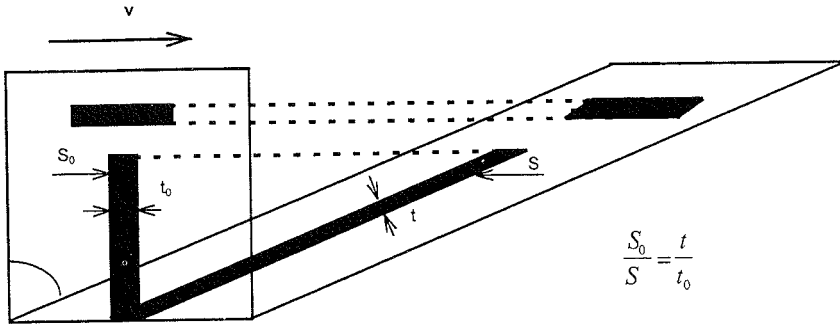
Laminär skjuvning

Vid laminär skjuvning så sker en förlängning och en areaökning av ett plan som är parallellt med skjuvriktningen, se Figur 2.2.



Figur 2.2 Förtunning av flödet under påverkan av laminär strömning (efter Nienow et. al. 1992)

För att upprätta ett förhållande mellan deformation i en laminär rörelse och blandningsgraden i en blandning med två komponenter så kan vi betrakta skiktjockleken som ett mått på blandningens tillstånd. Om S representerar gränsytearean mellan två komponenter och t skiktens tjocklek erhålls sambandet som visas i Figur 2.3.

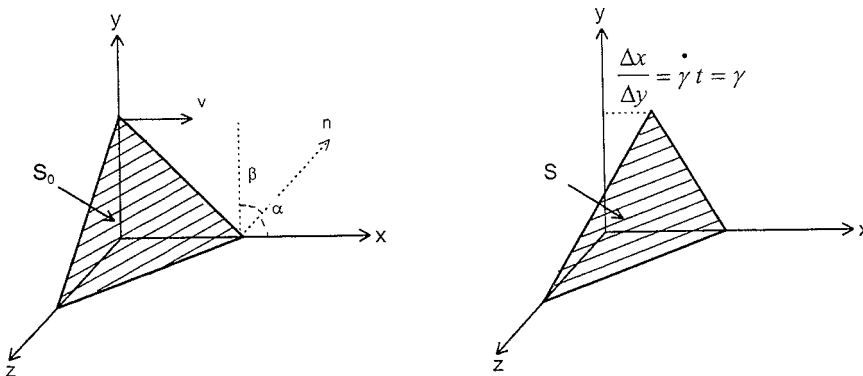


Figur 2.3 Laminär skjuvning (efter Hold 1982)

En generell analys av blandning i laminär skjuvning presenterades av Spencer and Wiley (1951). Processen illustreras i Figur 2.4 och det kan visas att kvoten mellan slutlig och initial gränsytearea ges av (Hold 1982):

$$\frac{S}{S_0} = \sqrt{1 - 2\gamma \cos \alpha \cos \beta + \gamma^2 \cos^2 \alpha} \quad (2.4)$$

- där: S = Gränsytearean area/enhet av blandning, (m^2/m^3)
 S_0 = Gränsytearean före skjuvning, area/enhet av blandning, (m^2/m^3)
 α = Vinkeln mellan normalen till original planet och x- axeln, (rad)
 β = Vinkeln mellan normalen och y- axeln, (rad)
 γ = Netto töjningen, (-)



Figur 2.4 Ökning av gränsytearean mellan parallella plattor vid laminär skjuvning (efter Hold 1982)

Påverkan av orienteringen ges av ekvationen ovan (Edwards 1992):

- a) För en yta som är initialt parallell med x,y planet

$$S/S_0 = 1 \quad (2.5)$$

ser vi att ingen blandning åstadkoms.

b) För en yta som är initialt parallell med x,z planet

$$S/S_0 = 1 \quad (2.6)$$

ser vi återigen att ingen blandning åstadkoms.

c) För en yta som är initialt parallell med y,z planet, t.ex. vinkelrätt mot skjuvplanet

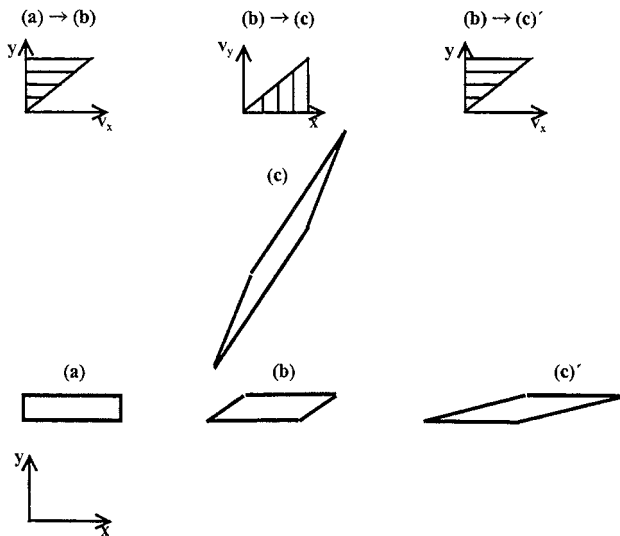
$$S/S_0 = (1 + (\dot{\gamma} t)^2)^{1/2} = (1 + \gamma^2)^{1/2} \quad (2.7)$$

ser vi att gränsytearean mellan komponenterna ökar och blandningen förbättras.

För mycket stora deformationer γ visar Hold (1982) att:

$$S/S_0 = (1 + \gamma^2 \cos^2 \alpha)^{1/2} \cong \gamma \cos \alpha \quad (2.8)$$

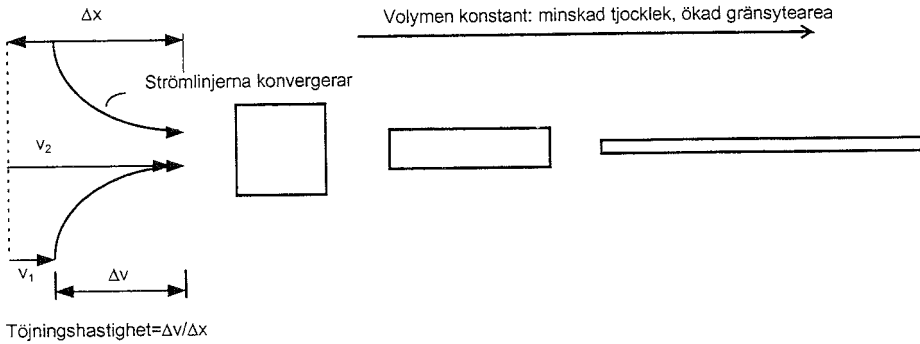
Gränsytearean ökar om skjuvriktningen ändras under skjuvprocessen (Hold 1982). Det är alltså en fördel att medvetet ändra skjuvriktningen än att applicera ett kontinuerligt orientat skjuvfält. Enkel skjuvning kan alltså optimeras genom att ändra skjuvriktningen för varje cykel, se Figur 2.5. Ökningen av gränsytearean kan optimeras genom att ändra skjuvriktningen så att den alltid bibehåller vinklarna $\alpha = \beta = 45^\circ$, se Figur 2.4.



Figur 2.5 Effekten av enkel skjuvning med förändrad riktning. Två konstitutivt enkla skjuvningar i rät vinkel (efter Edwards 1992 och Hold 1982)

Extensionellt flöde

Generellt vid praktiska tillämpningar existerar också extensionellt flöde d.v.s. flöden där hastigheten ökar i flödesriktningen, se Figur 2.6. Extensionell töjning producerar en sträckning av materialet p.g.a. ändringar i flödesgeometrin eller acceleration i flödet som reducerar elementens tjocklek och därmed förbättrar blandningskvaliteten (Edwards 1992).



Figur 2.6 Förtunning av flödeselement med hänsyn till utsträckt flöde (efter Nienow 1992)

Vid enaxlig töjning i x- riktningen uppstår kontraktion i y- och z- led som är hälften av töjningen i x- led, se Figur 2.7. Förhållandet mellan den slutliga och den initiala längden av en elementär volym ges som (Edwards 1992):

$$l/l_0 = e^{\gamma_e} \quad (2.9)$$

där: l_0 = Initial längd av elementär volym, (m).
 l = Slutlig längd av elementär volym, (m).
 γ_e = Töjning under en extensionell rörelse, (-).

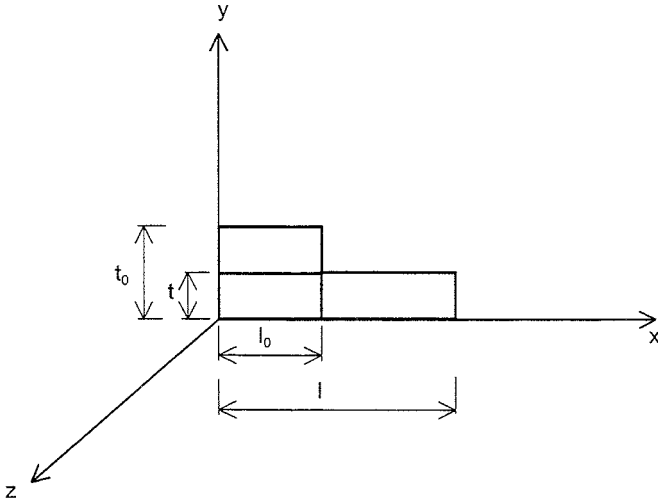
Förhållandet mellan slutlig och initial vidd (Edwards 1992):

$$t/t_0 = e^{-\gamma_e} \quad (2.10)$$

där: t_0 = Initial tjocklek av elementär volym, (m).
 t = Slutlig tjocklek av elementär volym, (m).

Detta ger att (Cheng 1979):

$$S/S_0 = e^{\gamma_e/2} \quad (2.11)$$

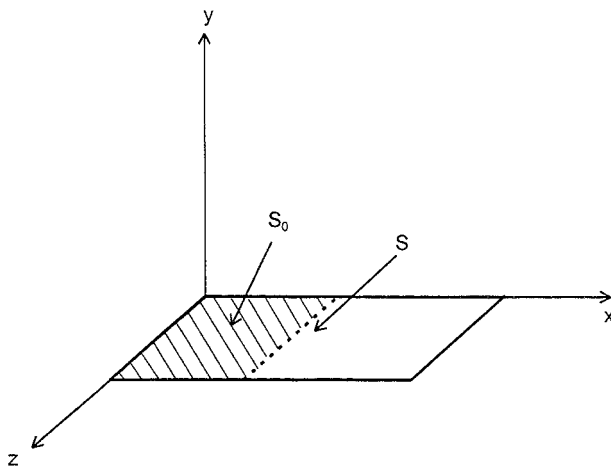


Figur 2.7 Ökning av gränsytearean under idealiserad enaxlig förlängning (efter Cheng 1979)

För plant extensionellt flöde är töjningen i x- led åtföljd av lika kontraktion i y- led och ingen kontraktion i z- led, enligt Figur 2.8. I detta fallet är förhållandet mellan den slutliga och den initiala längden av en elementär volym (Cheng 1979):

$$S/S_0 = e^{\gamma_{pe}} \quad (2.12)$$

där γ_{pe} är töjningen i x- led under en plan extensionell rörelse.



Figur 2.8 Ökning av gränsytearean under plan extensionell rörelse (efter Cheng 1979)

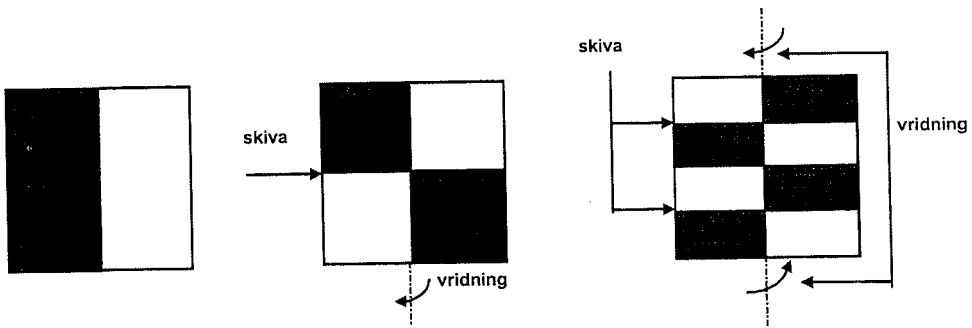
Om man nu jämför ändringen av gränsytearean av en skjuvning i en riktning, enaxlig förlängning och plan förlängning så står det klart att effektiviteten i att skapa ny gränsytearea ökar i ordningen (Cheng 1979);

- 1) Skjuvning i en riktning.
- 2) Enaxlig förlängning.
- 3) Plan förlängning.

Vid praktiska tillämpningar är det inte möjligt att kontinuerligt förlänga materialen. En region av förlängning av ett element måste följas av zon med kompression. I blandningsprocesser passerar materialen genom olika zoner (Edwards 1992). Om en blandare har zoner med hög skjuvning eller töjning bör komponenterna i blandningen passera genom dessa zoner så ofta som möjligt.

Distributiv blandning

Blandning genom omfördelning genom skiktning och återställning visas som en idealiserad mekanism i Figur 2.9. Det laminära flödet genom ett redskap t.ex. statiska linjeblandare, producerar en strömdelande och hybridiserande effekt som reducerar tjockleken på skiktningen och ökar gränsytearean mellan komponenterna. Detta kallas distributiv blandning (Edwards 1992).



Figur 2.9 Konceptet för distributiv blandning m.h.t. skivning och vridning (efter Nienow et al. 1992)

Som Figur 2.9 visar så ökar gränsytearean och de olika skiktens tjocklek minskar mellan de två komponenterna. För varje individuell mekanism så ökar blandningsgraden. Skivnings- och återställningsmekanismen sker utan att komponenterna utsätts för skjuvning eller förlängning enligt den idealiserade situationen i Figur 2.9. Med fördel kan en blandningsprocess utformas så att det förekommer zoner där elementen utsätts för skjuvning och förlängning med möjlighet till omformering mellan dessa zoner, alltså en kombination av laminär skjuvning och distributiv blandning.

Molekylär diffusion

I vätskor med hög viskositet är den molekylära diffusionen en långsam process. Endast då skjuvningen eller töjningen har reducerat tjockleken av skiktningen till en tillräckligt låg nivå blir molekylär diffusion betydelsefull.

Solida material

Solida partiklar varierar i storlek från fina pulver till stora partiklar som varierar i storlek, form, densitet och skrovlighet. Fina pulver kan vara svåra att blanda p.g.a. kohesiva krafter och grövre partiklar p.g.a. segregation. Att blanda likformiga solida material som rör sig fritt, vilket är ett mellanting av de ovan nämnda, är en enkel sak.

Blandning av kohesiva pulver kräver att blandningen delas in i mindre delar och att varje del rör sig relativt blandningen. Blandare som ger stora skjuvspänningar är att föredra för sådana material.

Tre mekanismer förklarar beteendet hos solida partiklar under blandningen. (Perry et al. 1984):

- 1) Diffusion. Godtycklig rörelse i liten skala. Individuella partiklar rör sig skilt åt.
- 2) Konvektion. Godtycklig rörelse i stor skala. Klumpar eller grupper av partiklar rör sig tillsammans.
- 3) Skjuvning.

2.6 Dispersion av fina partiklar i en vätska

När fina solida partiklar tillsätts i en vätska är det normalt nödvändigt att bryta upp klumpar av partiklar som hålls samman av antingen starka eller svaga inre krafter. Vanligtvis har partikelsuspensioner hög viskositet och ett icke- Newtonskt flödesbeteende. Uppbrytning av klumbildning sker med hjälp av de skjuvspänningar som tillsätts flödet.

Det finns ett flertal problem i samband med dispersion av solida partiklar i en vätska när partiklarna inte är tillräckligt vätade, när luft dras med in i flödet, när det är svårt att bryta upp agglomerat och när flockbildning sker.

En detaljerad analys av spänningsfälten vid dispersiv blandning är mycket komplex (Parfitt & Barnes 1992). Flödet kan involvera zoner med hög skjuvning och troligen töjning tillsammans med zoner där omfördelning kan ske. Fastän töjning är mer effektiv så är det lättare att utforma utrustning som ombesörjer höga skjuvkrafter.

Solida partiklar måste genomgå fyra stadier när de konverterar in i en dispersion (Parfitt & Barnes 1992). Partikelytan skall blandas in, vätas, agglomeraten skall brytas upp och partiklarna skall stabiliseras emot flockbildning.

Inblandning

För att erhålla ett gott blandningsresultat vid korta blandningstider är det viktigt att inblandningen sker på ett sådant sätt att det inblandade pulvret distribueras jämt över hela volymen. Speciellt viktigt är det då man blandar in pulver i material som har visköst elastiska egenskaper, hög flytspänning och hög viskositet eftersom det är svårt och tids-

ödade att under distributionsskedet fördela materialen i blandningen. Visköst elastiska material har stor förmåga att motstå deformation och därmed rörelser. En god fördelning av bindemedlen medför att skalan av segregation (se Kapitel 4) reduceras i ett tidigt skede under dispersionsprocessen.

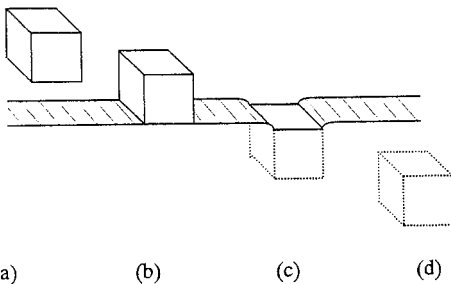
Partiklar kan existera som primära partiklar, aggregat eller agglomerat. Aggregat är grupper av primära partiklar sammanfogade i deras ytor och har en gränsytearea som är mindre än summan av areorna av de ingående partiklarna. En samling av primära partiklar och aggregat som är sammansatta vid ändrar och hörnor kallas agglomerat. Gränsytearean är inte mycket mindre än summan av beståndsdelarnas area (Parfitt & Barnes 1992).

Interpartikulära krafter påverkar ett torrt pulver. Van der Waals' krafter är normalt attraktiva och är i regel större än elektrostatiske krafter. Vid relativt stor fukthalt så bildas en film som åstadkommer attraktion mellan partiklar som är i kontakt. Större mängder vatten mellan partiklarna resulterar i formation av interpartikulära vätskebroar som ökar kohesionen (Parfitt & Barnes 1992). Magnituden av de största krafterna van der Waals' och gravitation, kan uppskattas. Generellt gäller att desto mindre partiklar desto större betydelse har interpartikulära krafter.

Vätning

När ett pulver blandas med en vätska innehåller pulverklumparna inneslutet luft som måste ersättas med vätska (McDonagh & Heywood 1986). Vätskan uppslukar först de små partiklarna, sedan de större. De större aggregaten kan också penetreras av vätskan. Vätskan penetrerar håligheter eller porer i ett nedsänkt agglomerat, men med en långsammare fart än nedsänkingsprocessen. Vid en viss grad av penetration blir skrymdensiteten hos ett agglomerat större än mediets vilket leder till att agglomeratet frigörs. Om vätska penetrerar ett agglomerat från alla sidor så ökar trycket i luftporerna tills agglomeratet slits sönder till fragment. Vättningsprocessens egenskaper påverkas av bl.a. vätskefasens egenskaper, ytans karaktär, agglomeratens intermediära dimensioner och det mekaniska systemets tryckpåverkan på komponenterna.

Figur 2.10 visar en liten kub då den nedsänks i en vätska. Vättningsprocessen sker i tre stadier, adhesion, nedsänkning och spridning (Parfitt & Barnes 1992).



Figur 2.10 Tre stadier i vättningsprocessen: (a) till (b) adhesion; (b) till (c) nedsänkning; (c) till (d) spridning (efter Parfitt & Barnes 1992).

Det behövs ingen mekanisk blandning under vätningsprocessen om 1) pulvret har högre densitet än vätskan och 2) vätskan väter pulvret och 3) pulvret är ej starkt agglomererat. Pulvret sjunker ned i vätska, porerna fylls med vätska och klumpar faller isär och frigör luften. Om inte alla dessa tre villkor uppfylls måste vätningsförloppet kompletteras med mekanisk blandning. Det är speciellt svårt, även med mekanisk hjälp, att frigöra innesluten luft när man blandar i en vätska med hög viskositet. Ett sätt att undvika innesluten luft är att förblanda pulvret i en vätska med lägre viskositet (förblandning).

Uppbrytning av agglomerat

När pulvret är inblandat i vätskan, vätat eller delvis vätat, är nästa steg att bryta upp de återstående agglomeraten genom mekanisk blandning (Parfitt & Barnes 1992). Uppbrytning av agglomeraten sker genom skjuvning, malning eller sönderslagning. Uppbrytning genom skjuvning beror av viskositeten. Den skjuvande kraften på en partikel är direkt relaterad till medelviskositeten i blandningen. Höga skjuvspänningar för detta ändamål kan uppnås i t.ex. rullande kvarnar eller tvillingskruvpressare. För att erhålla höga skjuvspänningar är det en fördel att ha hög töjningshastighet och hög viskositet i vätskan. En kommentar är att det krävs mycket energi för att erhålla en hög töjningshastighet i en vätska med hög viskositet. I vätskor med hög viskositet, där det inte förekommer någon masstransport mellan solid- och vätskefas, är skalan av segregation (se Kapitel 4.4) mycket viktig. När skalan av segregation nått en tillräckligt låg nivå kan molekylär diffusion agera för att reducera intensiteten av segregationen.

Beroende på de ingående materialens reologiska egenskaper typ av blandningsprocess så styrs effektiviteten i dispersionsprocessen av två mekanismer då agglomerat bryts upp:

- 1 Den effektiva töjningen och antalet rotationer hos blandningsverktyget eller antal cirkulationer i materialet.
- 2 Töjningshastigheten, intensiteten i agitationen.

Vilken av dessa parametrar som har störst inverkan på dispersionsprocessen beror av en rad faktorer såsom de reologiska egenskaperna i blandningen och de verksamma blandningsmekanismerna i den aktuella blandningsutrustningen.

Vid komplexa blandningar t.ex. partikelsuspensioner i en vätska under en upplösning, kan distributionen av den dispergerade fasen bero på intensiteten i själva agitationen (Rielly et al. 1994). Då är det förhållandet i agitationen och inte blandningstiden som är viktigast när blandningskvalitén bestäms. D.v.s rotationshastigheten hos ett blandningsverktyg har stor betydelse för blandningskvalitén.

Vid blandning med tunga suspensioner beror enligt Schofield & Stewart (1982) effektiviteten i dispersionsprocessen av den effektiva töjningen och antalet rotationer hos blandningsverktyget. För bl.a. en Z- bladblandare var graden av uppbrytning av agglomerat oberoende av töjningshastigheten (rotationshastigheten). Den berodde endast av antalet rotationer. Det betyder att man kan uppskatta antalet erforderliga rotationer för att bryta

upp agglomerat med experiment i skala och sedan använda denna relation för likvärdiga geometrier i större skala.

Vid betongtillverkning skriver Padgett (1996), att töjningshastigheten har större inverkan på cementslammets egenskaper än den totala blandningsenergin. Genom att mäta fri fukt och förtjockningstid med samma blandningsenergi jämfördes blandare på laboratorie med fältutrustning. Resultaten visade att det existerar liten korrelation mellan den totala blandningsenergin och de uppmätta egenskaperna i cementslammet. Däremot visar mängden fri fukt ett starkt beroende av blandningsutrustningen. En av de största skillnaderna mellan fältutrustningen och laboratorieutrustningen är töjningshastigheten i blandningsprocessen. Anledningen till att töjningshastigheten har större inverkan än den totala energimängden är krafterna som erfordras för att bryta upp agglomeraten som bildas vid vätningen av pulvret.

I samband med studier av hur pigment bryts upp i tunga suspensioner formulerade Schofield & Stewart (1980) hypoteser kring inverkan av den effektiva töjningen och intensiteten i agitationen. Det finns enligt dessa författare tre mekanismer som bryter upp agglomerat. Den första går ut på att det initiala agglomeratet bryts upp i två eller fler mindre agglomerat. Dessa mindre agglomerat bryts upp i ytterligare mindre enheter om de utsätts för skjuvspänningar som är större än deras kohesion. Om det under gynnsamma förhållanden ges erforderlig tid för att utsätta alla agglomerat för tillräckligt stora skjuvspänningar uppnås en slutlig uppbyggnad. Uppbyggnadsprocessen beror således på den maximala hållfastheten i bindingarna i agglomeraten och den tillgängliga skjuvspänningen. Om den rådande skjuvspänningen eller intensiteten i agitationen är tillräckligt hög kommer alla agglomerat att brytas ned till de fundamentala partiklarna. En annan möjlighet är att ett antal av de fundamentala partiklarna (de minsta partiklarna som individuellt kan existera) som tillsammans bildar ett stort agglomerat blir helt separerade. Den tredje möjligheten är att de fundamentala partiklarna skrubbas av från ytan på agglomeraten. Man kan sammanfatta Schofield's och Stewart's resonemang med att intensiteten i agitationen måste vara tillräckligt hög och varaktig så att agglomeraten bryts upp i erforderlig grad. När sedan detta har skett så är det den effektiva töjningen som förbättrar blandningsgraden.

Det saknas idag teorier som beskriver de grundläggande mekanismerna kring den effektiva töjningen och intensiteten i agitationen och hur dessa parametrar generellt inverkar på olika blandningsprocesser. Det är svårt att utifrån en litteraturstudie kunna dra generella slutsatser huruvida olika parametrar inverkar på olika blandningsprocesser. Man är därför hänvisad till att utföra försök för varje blandningsprocess och tillämpning.

Distribution

Distribution är den process då de uppbrutna agglomeraten distribueras slumpvis ut i vätskefasen. Detta sker normalt samtidigt som agglomeraten bryts upp. Om man inte lyckas utforma blandningsprocessen så att uppbyggnad av agglomerat och distribution av partiklarna sker samtidigt kan man förvänta sig långa erforderliga blandningstider. Det är

således viktigt att distributionen av den solida fasen sker över så stor volym som möjligt vid själva inblandningen. Fördelningsprocessen av partiklar fungerar bäst om blandningen har en låg viskositet.

Stabilitet hos dispersionen

När pulvret är vättat, agglomeraten uppbrutna, partiklarna separerade och jämnt fördelade i vätskan, skall detta bestå och flockbildning förhindras. Vid många blandningsprocesser är detta en svår nöt att knäcka. Om vätskan har en hög viskositet och pulvret har en låg densitet är stabiliteten i dispersionen inte ett stort problem, varför detta inte behandlas vidare i denna uppsats.

3. Blandningsutrustningar

3.1 Inledning

Med hänsyn till graden av agglomerat och aggregat i material kan man särskilja blandning av gaser, vätskor och solida material. Blandning av vätskor kan ytterligare delas upp efter konsistensen i blandning av Newtonsk vätska och blandning av pastor, icke-Newtonsk vätska med hög partikelkoncentration.

Blandningsredskap kan delas upp i fyra olika grupper enligt, Sterbacek & Tausk (1965):

- 1 Utrustning för blandning av gaser.
- 2 Utrustning för blandning av lättflytande vätskor (Newtonsk- vätska).
- 3 Utrustning för blandning av pastor och andra substanser med icke-Newtonskt flödesbeteende.
- 4 Utrustning för blandning av solida lösa substanser.

Det stora utbud av blandningsutrustningar som finns att tillgå reflekterar den enorma variationen av blandningsuppgifter som finns i kemisk-, färg-, livsmedel-, läkemedelsindustri o.s.v. I föreliggande kapitel belyses några av de typer av utrustningar som finns tillgängliga inom främst processindustrin för dispersion och upplösning i vätskor samt för blandning av pastor och plastiska material. De typer av blandningsutrustningar som behandlas i detta kapitel täcker ett relativt brett område i relation till de typer av utrustningar som är tillämpbara vid pelarstabilisering. Blandningsutrustningar i samband med pelarstabilisering diskuteras i Kapitel 5.

Den litteratur som refereras och de bilder som visas kommer delvis från litteratur som presenterades för över 30 år sedan, Sterbacek & Tausk (1965). Orsaken till detta är att denna litteratur utgör en utmärkt genomgång av de grundläggande utformningarna på blandningsredskap. Senare publicerad litteratur bidrar i många fall inte till något nytt med undantag för utveckling av främst statiska blandare och specialutformningar på bl.a. propellrar och turbiner.

3.2 Dispersion och upplösning i vätskor

Allmänt

Det finns en enorm variation av utrustningar för blandning av olika substanser i vätskor. Tillämpningsområdena är bl.a. kemisk-, livsmedel-, färg- och läkemedelsindustri. För att erhålla en snabb blandningsprocess krävs en effektiv rörelse åstadkommen av konvektion. Rörelsen i materialet bör vara tillräckligt intensivt så att turbulens och turbulent diffusion uppkommer. Regioner med hög intensitet i turbulensen är lämpligt för dispersiva

processer. Blandning av vätskor med låg viskositet är beroende av (Sterbacek & Tausk 1965):

- 1 Intensiteten i turbulensen
- 2 Graden av cirkulation

De flest förekommande redskapen vid blandning i material överför krafter och moment till materialen genom skjuvspänningar, d.v.s. i rät vinkel mot redskapets rörelse (Sterbacek & Tausk 1965). Paddlar, turbiner och propellrar är exempel på redskap tillhörande denna grupp.

Med hänsyn till de reologiska egenskaperna hos de i blandningen ingående materialen är möjligheten att åstadkomma rörelser i materialen olika. Suspensioner med höga partikelkoncentrationer har i regel mycket komplexa reologiska egenskaper där de kan ha både elastiska egenskaper och flytegenskaper. Med hänsyn till de blandade materialens egenskaper används redskap som opererar med olika hastighet, se Tabell 3.1.

Tabell 3.1. Applikationen för olika blandningsredskap beror mycket av viskositeten i blandningen (efter Edwards & Baker 1992).

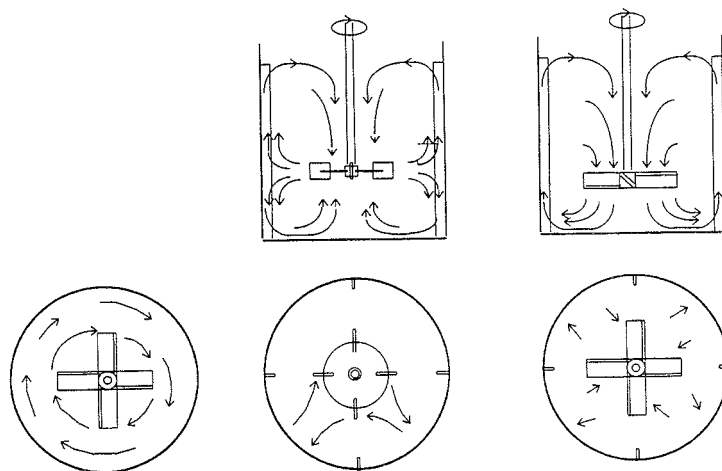
Propellrar	↓	↑
Turbiner	↓	↑
Paddlar	Ökad viskositet	Ökad rotationshastighet
Ankare	↓	↑
Spiralformade band	↓	↑
Spiralformade skruvar	↓	↑

Propellrar, Turbiner och paddlar

Propellrar, turbiner och paddlar används vanligtvis vid blandning av vätskor med relativt låg viskositet och med hög rotationshastighet men de kan också användas för att blanda reologiskt komplexa material. De har vanligtvis en diameter som är 1/4-2/3 av diametern om dom opererar i en tank.

Med hänsyn till flödesmönstret kan man särskilja blandningsredskap efter tangentiellt (paddlar), radiellt (turbiner), axiellt (propellrar) och sammansatt flöde enligt Figur 3.1.

Tangentiellt flöde produceras främst av paddlar med plana blad och med breda paddlar som roterar med sådan hastighet att inget radiellt flöde uppkommer p.g.a. centrifugalkrafter. Turbiner producerar radiella flöden och propellrar producerar rent axiala flöden. Sammansatta flöden uppkommer t.ex. då paddlar har lutande blad.



Figur 3.1 Tangentiellt-, radiellt- och axiellt flöde (Sterbacek & Tausk 1965).

Propellrar

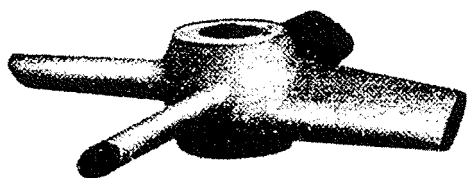
Den vanligaste typen är propellrar av marin typ och då ofta med tre blad. Propellrar arbetar som pumpar med hög rotationshastighet. Blandningen påverkas av rörelse i flödet och således är det propellerns pumpkapacitet som är avgörande.

Med propellrar uppnås blandning genom kombination av två rörelser:

1. Genom axiellt flöde från propellern.
2. Genom spiralformat turbulent flöde.

Propellrar kan användas för att blanda vätskor med viskositet upp till $2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (Sterbacek & Tausk 1965). De är passande för snabba blandningsförlopp t.ex. lågviskösa emulsioner. Propellerblandare är opassande för suspensioner med tunga, sättningsbenägna substanser och för absorption av gaser.

Radiell propeller eller axial turbin har ett sammansatt axiellt- radiellt flöde. De består av 4-16 plana eller profilerade blad monterade på ett skaft, vinklade $10\text{-}25^\circ$ mot horisontalplanet vinkelrätt mot axeln. Skillnaden mot vanliga propellrar är den att bladen slutar med plana ändar, se Figur 3.2. Detta för att skapa det radiella flödet. Det är ett redskap som opererar med hög hastighet och passar för suspensioner med viskositet, upp till $20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (Sterbacek & Tausk 1965).



Figur 3.2 Radiell propellerblandare (Sterbacek & Tausk 1965).

Turbiner

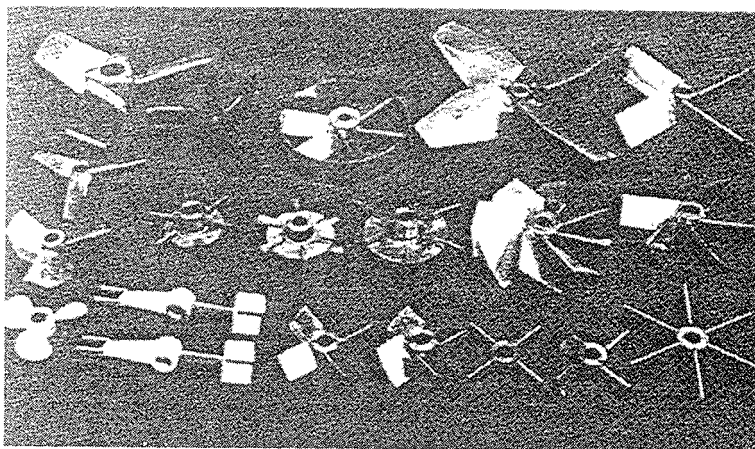
Turbiner har blad som är monterade vertikalt och det finns en mängd olika utformningar. De har använts som blandningsredskap i många år.

Turbinbladen tränger in i och avbördar flödet i ett huvudsakligt radiellt flöde från bladen. Detta medför att blandningstankens utformning är mycket viktig för turbinens funktion.

Den huvudsakliga fördelen med turbinblandare är de kan användas för en bred skala av viskositeter och densiteter. Det finns ingen direkt övre gräns för viskositeten som kan blandas. När väl turbulent flöde uppkommit i flödet ($Re \gg 100$) har viskositeten nämligen liten betydelse för kraftkonsumtionen (Ulbrecht & Patterson 1985, Edwards et al. 1992).

Utformningen av turbinbladen bestäms av flödets karaktär och blandningens syfte. För lättflytande vätskor används vertikala, helt plana blad. För att förbättra den pumpande effekten kan bladen snedställas. Det är en fördel vid blandning av substanser med hög viskositet att snedställa bladen i motsatt riktning mot rotationsriktningen. Om bladen är snedställda eller profilerade blir det initiala momentet mindre och det hjälper överföringen av energi från bladen till flödet. Bladen kan också ha krökta blad för att minska flödet från redskapet och underlätta starten för turbinen.

Turbiner har ett brett användningsområde bl.a. suspensioner, upplösningar, kemiska reaktioner, absorption av gaser och värmetransport. De är mindre passande för, men kan användas för pastor och degar.



Figur 3.3 Typiska propellrar, turbiner och paddlar (King 1992).

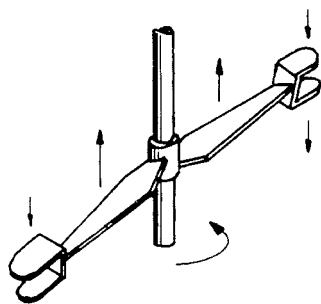
Paddlar

Rektangulära blad, vinkelrätt eller sneda mot drivaxeln och som drivs av mekanisk energi går under benämningen paddlar. Det som skiljer paddlar från turbiner är flödesmönstret

åstadkommet från respektive. Med turbiner måste radiellt flöde dominera, möjligtvis med tangentiellt flöde, se Figur 3.1.

Paddlar har varit kända som blandningsredskap sedan lång tid. Deras främsta fördel är deras enkelhet och således låga kostnad. De främsta nackdelarna är den låga pumpkapaciteten, de endast kan användas för vätskor med viskositet upp till c:a $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ och att axialt flöde från bladen är begränsat (Sterbacek & Tausk 1965). God blandning uppnås endast i tunna skikt i flödet i direkt anslutning till bladen. Där uppstår lokala virvlar på övre och undre kanten på bladet.

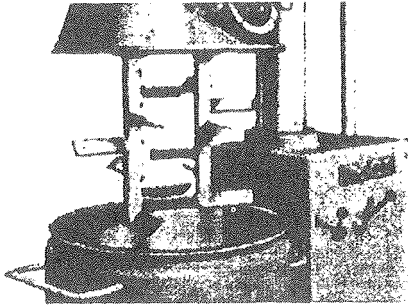
När paddlar används vid blandning uppstår ofta en koncentrerad gradient (skiktning) i flödet. Detta är en nackdel speciellt när en av komponenterna adderas under blandningsförloppet. Detta kan motverkas genom att snedställa bladen ($30\text{-}45^\circ$ mot axeln) så att axial rörelse uppkommer. En kombination av paddel och propeller kan utformas som Figur 3.4 visar. Genom att snedställa bladet i två riktningar uppkommer axiellt flöde både uppåt och nedåt. Detta är gynnsamt om man vill åstadkomma cirkulation i flödet.



Figur 3.4 Blandningsredskap med paddlar som är snedställda i två riktningar för att åstadkomma cirkulation i flödet (Ulbrecht & Patterson 1985).

Breda paddlar har inte dessa nackdelar eftersom de främst producerar tangentiella flöden. De är speciellt passande för processer som kräver homogena blandningar t.ex. kemiska reaktioner (Sterbacek & Tausk 1965). För att förbättra skjuvning kan hål borras i bladen. Nackdelar med breda paddlar är att de är opassande för suspensioner och blandning av material med hög viskositet.

Eftersom paddlar arbetar i huvudsak med tangentiella rörelser kan problem uppkomma då materialet erhåller samma hastighetsgradienter som paddeln, d.v.s. materialet dras runt av paddeln utan någon nämnvärd blandning sker. Problemet kan undvikas genom att använda flera paddlar som roteras i olika riktningar och/eller med olika hastighet. Vid blandning av material med hög viskositet i blandningskärl kan utrustningen utformas som Figur 3.5. Två excentriskt placerade axlar med ett flertal paddlar roteras i olika riktningar där paddlarna överlappar varandra. Flödet befinner sig på sådant sätt i ständig rörelse i kontinuerligt skiftande riktningar. I denna typ av blandningsutrustning prioriteras rörelse i flödet framför höga skjuvspänningar.



Figur 3.5 Blandningsredskap för blandning av pastor och suspensioner. Två excentriskt placerade axlar med flera paddlar roterar i olika riktningar (Sterbacek & Tausk 1965).

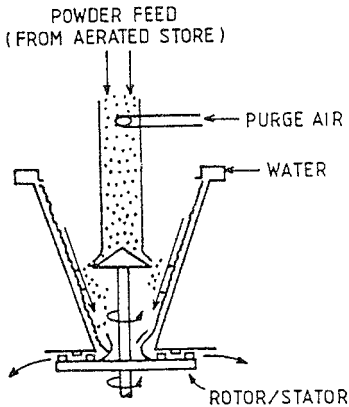
Utrustning för dispersion av solida partiklar

Problemen med att dispergera solida partiklar i en vätskefas kan variera mycket i svårighetsgrad och komplexitet. Dispersionsprocessen och dess problem beskrivs i Kapitel 2.6.

Det finns en mängd typer av blandningsutrustningar som kan användas för att dispergera pulver i vätskor, men det har endast utvecklats ett litet antal som används speciellt för dispersion (McDonagh & Heywood 1986). Dessa kategorier av utrustningar beskrivs nedan helt kort.

- i Vertikala axelblandare. Blandare som använder blandningsredskap som sitter på en vertikal axel kan variera mycket vad gäller utformning och rotationshastighet. Ofta används propellrar, paddlar, turbiner etc. där blandningsredskapet kan alterneras och kombineras för att erhålla olika blandningsmekanismer vid olika skeden i processen.
- ii Horisontella axelblandare. Vid blandning av suspensioner med hög viskositet används ofta horisontella blandare för att åstadkomma rörelse i hela den blandade volymen. Här kan t.ex. paddlar, skruvar, knådare eller Z- blad användas. De sist nämnda beskrivs närmare i Kapitel 3.3.
- iii Kvarnar. Om det är svårt att bryta upp agglomerat i blandningen kan kvarnar med fördel användas. Kvarnar, t.ex. kolloidkvarnar, rullkvarnar eller kulkvarnar, kan tvinga material i rörelse och åstadkomma höga skjuvspänningar.
- iv Utrustning för homogenisering. Används oftast för material med låg viskositet där det inte erfordras höga skjuvspänningar för att bryta upp agglomerat.
- v Speciella blandare för pulver och vätska. Det har utvecklats ett antal utrustningar som är speciellt lämpade för dispersion då det är svårt att väta den solida substansen. De kan delas upp mellan de typer där vätskefasen sprayas in i en fallande ström av pulver och de typer där den solida substansen faller in i tunna vätskefilmer. I båda fallen skapas en stor gränsytearea mellan materialen och därmed förhindras stora klumpar av delvis vätdade partiklar. Ett exempel på en sådan utrustning visas i Figur 3.6.

17392



Figur 3.6 Utrustning för vätning. Pulver leds in i en flytande yta av t.ex. en vätska (McDonagh & Heywood 1986).

När en process för dispersion skall designas eller förbättras är det viktigt att kunna beskriva och förstå de individuella stadierna inblandning, vätning, uppbyggnad av agglomerat, distribution och stabilitet, enligt Kapitel 2.6. De olika skedena i dispersionsprocessen kan ske var för sig eller överlappa varandra, vissa skeden kanske inte alls inträffar och det är viktigt att uppskatta betydelsen av dessa skeden för varje specifikt blandningssyfte. Utifrån en beskrivning av de rådande blandningsmekanismerna och svårigheterna i dispersionsprocessen kan man fokusera sina insatser på de viktigaste skedena i processen. P.g.a. de i regel mycket komplexa blandningsförloppen kan laborieförsök vara nödvändig för att kunna fastställa var svårigheterna ligger (McDonagh & Heywood 1986).

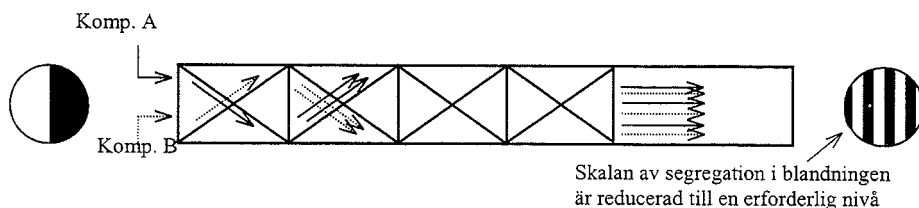
Statiska blandare

Exempel på statiska blandare är rörelsefria eller roterande blandningselement in-korporerade i tuber där de blandade komponenterna trycks genom tuben (Godfrey 1992), se Figur 3.7. Det är alltså blandningen som trycks genom ett statiskt blandningsverktyg.

Det finns en mängd olika typer av statiska blandare och tillämpningsområdena är många både för turbulenta och laminära applikationer. Ofta används statiska blandare för att förbättra redan existerande blandningsprocesser genom att addera statiska blandare för förblandning eller efterblandning.

Den huvudsakliga blandningsmekanismen för laminär blandning är distributiv blandning med delning/skiktning och omfördelning/omorientering av elementen. Denna process reducerar volymen av de individuella regionerna av icke likformighet. Antalet element som blandas beror av svårigheten i blandningsprocessen. Vid dispersion av solida partiklar i en vätska är det viktigt att redskapet åstadkommer de erforderliga skjuvkrafter som krävs för att bryta upp agglomeratbildning.

Det är precis som med andra typer av blandningsutrustningar svårt att bedöma blandningskvaliteten och det medför att det är svårt att jämföra olika typer av redskap med varandra.



Figur 3.7 Principen för en statiska linjeblandare .

Jet blandare

Blandning med jetstrålar används för både gaser och vätskor. Principen är densamma för de båda. Användandet av turbulenta strålar för blandning av vätskor är mycket vanlig i kemisk industri.

Jet blandning är lämplig för blandning av lågviskösa vätskor och kombineras i regel med en pump vid blandning av vätskor. Turbulenta jetblandare kan ha mycket korta blandningstider, mindre än sekunder. För att effektivisera blandningsförloppet används flera munstycken och ofta kombineras metoden med mekanisk blandning.

Flödet som mynnar ut ur munstycket antar formen av en kon som breder ut sig från mynningen, se Figur 3.7. Detta orsakas av följande omständigheter (Sterbacek & Tausk 1965):

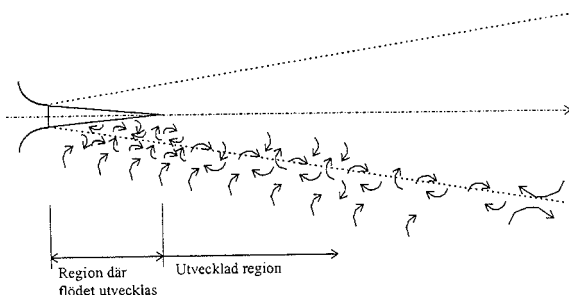
1. Flödet från munstycket flyttar på omgivande fluid framför mynningen. Fluiden som är närliggande till strålen sätts i en parallell rörelse, orsakat av överföring av moment från strålen till omgivande fluid. Denna överföring av moment effektiviseras av skjuvspänningar mellan det snabba och det stagnanta lagret och genom turbulent penetration av partiklar från strålen in i den omgivande fluiden. Om man bortser från den inre friktionen, är rörelseenergin konstant, d.v.s.:

$$\sum M_0 v_0 = \sum M_1 v_1$$

där M_0 och v_0 är rörelsemomentet resp. hastigheten i jetströmmen och M_1 och v_1 är rörelsemomentet resp. hastigheten i den inträngande fluiden. Hastigheten i den inträngande fluiden är mindre än hastigheten i själva strömmen och varje lager som sätts i rörelse tränger in i närliggande lager. Tvärsektionen av det strömmande lagret ökar med avståndet från munstycket och hastigheten minskar mot periferin i konen.

2. När den omgivande fluiden tränger in i flödet minskar trycket vid dess ursprungliga läge. Denna tryckminskning gör att ytterligare fluid sugas in och sätts i rörelse genom att moment överförs från strålen.

Inträngningen av vätska i det strålande flödet resulterar i ett turbulent gränsskikt i konens periferi där blandningen är verksam. Tjockleken av detta turbulenta gränsskikt ökar proportionellt med avståndet från munstycket och detta förbrukar en del av momentet i centrum av konen. Det gradvis tjockare gränsskiktet orsakar en utvidgning av konen och sammandragning av kärnan som till slut försvinner vid ett visst avstånd från munstycket.



Figur 3.7 Jetstråle och dess flödesbeteende (efter Sterbacek & Tausk 1965).

3.3 Blandning av pastor och plastiska material

Allmänt

Det finns mängder av olika typer av redskap och processer för blandning av solida material och pastor. Blandning av plastiska material är en övergång mellan blandning av vätskor och blandning av solida material. Det är vanligt att en utrustning är flexibel och kan användas för att blanda vätskor med hög viskositet eller tunna pastor men även lättflytande vätskor. Samma sak gäller för vissa utrustningar anpassade för pastor som även kan användas för att blanda solida material. Det är därför heller ingen tydlig gräns mellan olika typer av blandningsutrustningar. Det finns utrustningar som bryter ned solida agglomerat i pastor och i plastisk material och dessa är regel designade som kvarnar (Sterbacek & Tausk 1965).

Utrustningar för att blanda pastor och plastiska material återfinns speciellt i kemisk industri (gummiprodukter, plaster, keramer, mediciner, tvål etc.) och i livsmedelsindustrin.

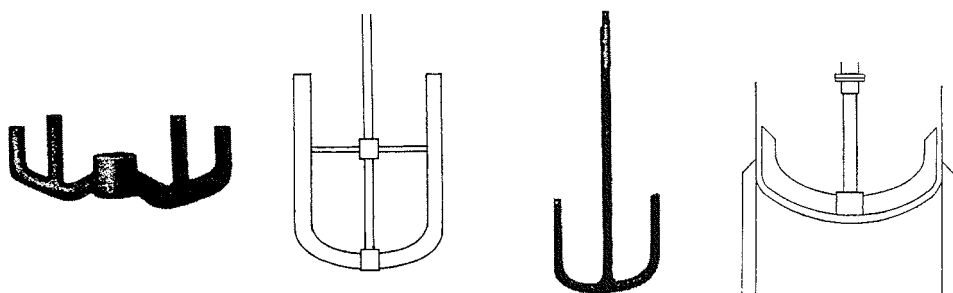
Det är betydligt svårare och mer komplext att blanda pastor och plastiska material än att blanda vätskor. Ju högre konsistens ju långsammare är flödet av material och därmed är möjligheten till turbulenta strömningar begränsad. Utrustningarna är i regel designade så att blandningsredskapet rör sig över hela den volym som skall blandas eftersom det är svårt att åstadkomma ett massflöde över hela volymen.

Blandare som blandar material med hög viskositet har i regel mycket komplexa flödesmönster. Det förekommer zoner med höga skjuvkrafter (där materialen sträcks) och zoner där materialen omfördelas (ger materialen en ny orientering). Det är i regel mycket svårt att analysera dessa blandningsprocesser kvantitativt med idealiserade blandningsmekanismer.

För de flesta redskapstyperna ovan, utom för kvarnar och knådare, är det primära flödesmönstret tangentiellt, d.v.s. flödet följer redskapet då det roterar kring sin egen axel. Spiralformade redskap, paddlar med stor lutning och propellrar genererar också en axial flödeskomponent så att det primära flödet blir spiralformat. Centrifugalkrafter genererat av ett tangentiellt flöde skapar ett sekundärt radiellt flöde. Detta sekundära flöde motverkas av elastiska krafter i ett visköst elastiskt material.

Ankarblandare

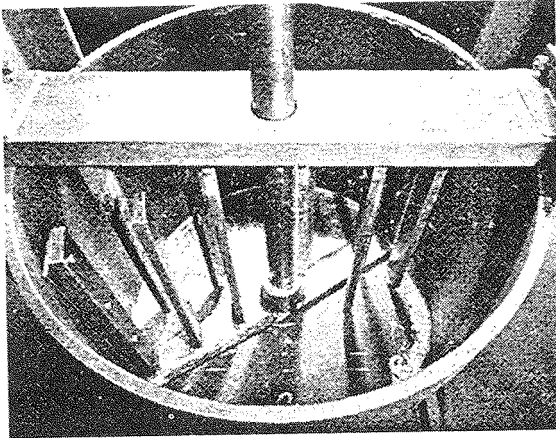
Den vanligaste typen av utrustning för blandning av pastor är paddelblandare med sådan utformning att de säkerställer rörelse i blandningar med hög konsistens. De flesta av dessa blandare har vertikala armar som tillägg till de horisontella, för att hjälpa vertikala rörelser i blandningen, som är svårt att åstadkomma i t.ex. plastiska material. Ankarblandare skapar stora cirkulationsmönster. I regel är diametern på blandningsredskapet i samma storleksordning som blandningskärlet och de är placerade nära botten. Ankarblandare är den vanligaste blandaren av denna typ. Figur 3.8 visar några typiska ankarblandare för blandningsprocesser i kärl.



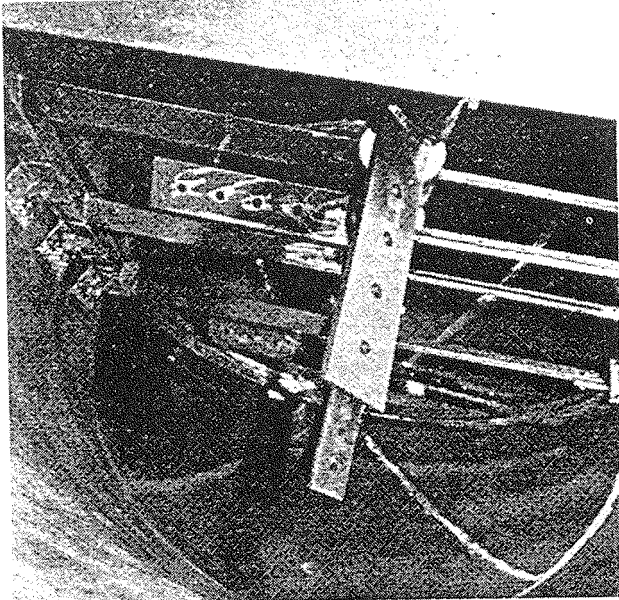
Figur 3.8 Några typiska ankarblandare (Sterbacek & Tausk 1965).

För att åstadkomma virvlar i hela flödet eller flera skjuvzoner kan redskapen utformas som rakor. De passar speciellt bra för blandning av plastiska material. För att förbättra redskapets skjuvande verkan kan de utformas med två uppsättningar armar som opererar i olika riktningar. Antingen rör sig båda armarna eller så är den ena fix och den andra roterar. Se Figur 3.9.

Ankarblandare är speciellt lämpliga att kombinera med horisontella armar. En populär kombination är ankare och paddlar med dubbel rörelse, se Figur 3.10. Paddelbladen kan vara vertikalt stående eller lutande. Denna kombination möjliggör att de olika redskapen kan gå i olika riktningar och med olika hastighet. Denna utformning är speciellt lämplig då blandningen har en initialt relativt låg viskositet som sedan höjs p.g.a. reaktioner till pastor eller plastiska material. Under första skedet opererar paddlarna och då viskositeten ökar tar ankaret över blandningsprocessen.



Figur 3.9 Ankarblandare utformade med två uppsättning armar, där den ena roterar och den andra är fix (Sterbacek & Tausk 1965).



Figur 3.10 Ankare kombinerad med paddlar (Sterbacek & Tausk 1965).

Spiralformade blandare

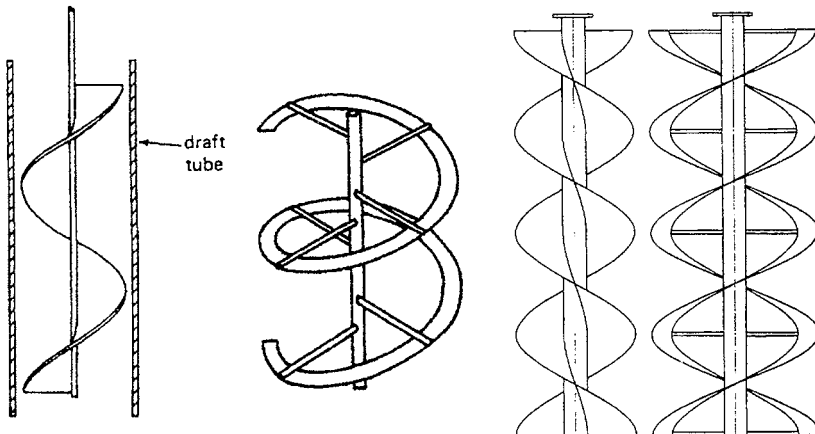
För att förbättra cirkulationen i en blandning kan spiralformade band eller skruvar användas. Dessa redskap opererar långsamt och skapar inte stora töjningshastigheter utan litar på sin pumpkapacitet för att nå alla delar i den volym som skall blandas. Spiralformade blandare lämpar sig bra vid blandning av material med hög flytspänning och

viskositet eftersom de åstadkommer rörelser i axial och tangentiell riktning samtidigt som de skär sig genom materialen. Detta är en fördel vid blandning i material som annars lätt fastnar på redskapsbladen.

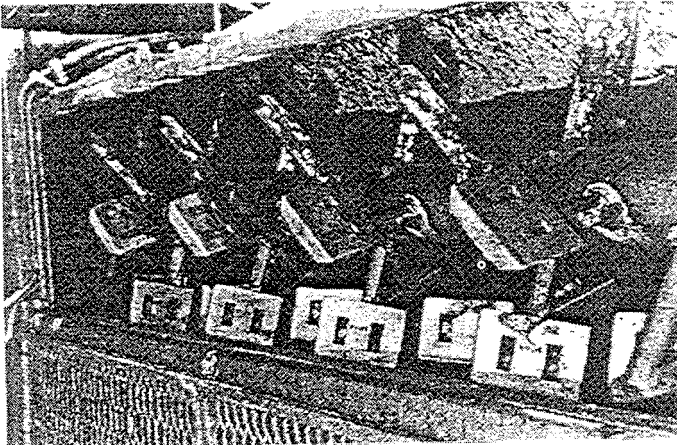
Vid blandning i visköst elastiska material anses spiralformade redskap vara mer effektiva än ankarblandare eller redskap utrustade med paddlar (t.ex. Nagata et al. 1972). Orsaken är att då t.ex. paddlar roteras i ett visköst elastiskt material så är konsumtionen av energi stor i direkt anslutning till bladen och p.g.a. blandningens visköst elastiska egenskaper kan inte krafter propagera ut i blandningen. Resultatet blir att blandning sker i direkt anslutning till bladen och strax utanför är blandningen inte i rörelse alls. Visköst elastiska egenskaper diskuteras i Kapitel 5, Reologi.

Spiralformade band används speciellt i horisontella blandare där man vill ha en recirkulation av flödet. Det uppnås genom att kombinera två spiraler som opererar i motsatt riktning. Dessa redskap är speciellt lämpade för blandning av löst packade solida material men används också för att blanda vätskor med t.ex. pulver. Blandningen effektiviseras genom att materialet drivs åt sidan för att sedan falla tillbaka till huvudflödet. För att åstadkomma starkt axiellt flöde för material med hög viskositet används spiralformade skruvar.

Blandningsredskap kan också utformas med paddlar formerade i en spiral. Materialet tvingas ut i sidorna och delvis framåt i tanken. Dessa typer av redskap används bl. a. för blandning av färger (Sterbacek & Tausk 1965). Figur 3.12 visar ett sådant verktyg som här används för att blanda jord och cement i samband med ystabilisering.



Figur 3.11 Spiralformade blandningsredskap (Parfitt & Barnes 1992, Silvester 1985)



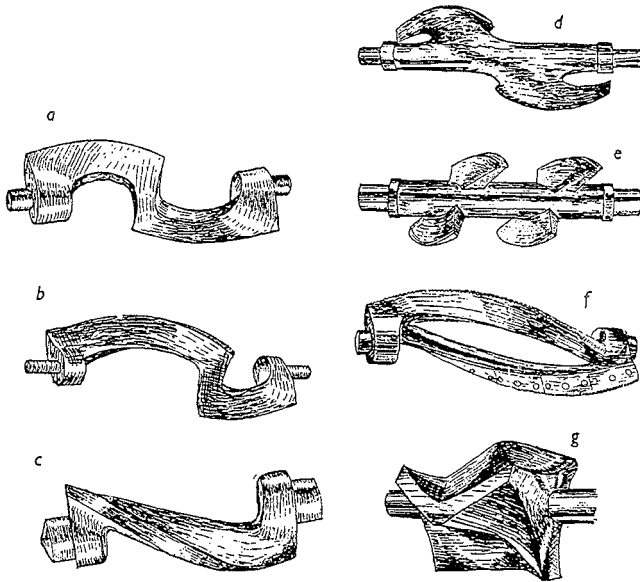
Figur 3.12 Spiralformat blandningsredskap med paddlar för blandning av jordmaterial och cement (Mueller 1991)

Knådare

Knådare, Z- blad och sigmablåd används normalt för blandning av vätskor med hög viskositet, pastor, gummi, degar etc. som inte kan hanteras med ankare eller spiralformade band. Avståndet mellan bladen och mellan bladen och tanken är liten för att stora skjuvspänningar skall uppstå i materialet. Bladen opererar i hela den blandade volymen. Vanligtvis utformas dessa blandningsredskap som horisontellt liggande tankar.

Blandningsmekanismen för dispersion av solida material fungerar vanligtvis på följande sätt. Först tillsätts en del av vätskan i tanken. Allt medan bladen arbetar tillsätts den solida substansen med tillräckligt med vätska för att forma en pasta. Vid denna första fas blandas vätskan endast med den solida substansen. Under inverkan av knådning bryts agglomeraten upp i pastan. Höga skjuvspänningar förekommer mellan bladen och genom att pastan pressas mot väggarna i tanken. Det är viktigt att pastan har rätt konsistens så att tillräckliga skjuvspänningar uppkommer. Höga skjuvspänningar är alltså nödvändiga för att hjälpa vätningsprocessen.

Två blad kan kombineras så att de opererar i motsatt riktning. De är placerade så att deras mönster överlappar varandra. Vanliga utformningar på bladen visas i Figur 3.13.



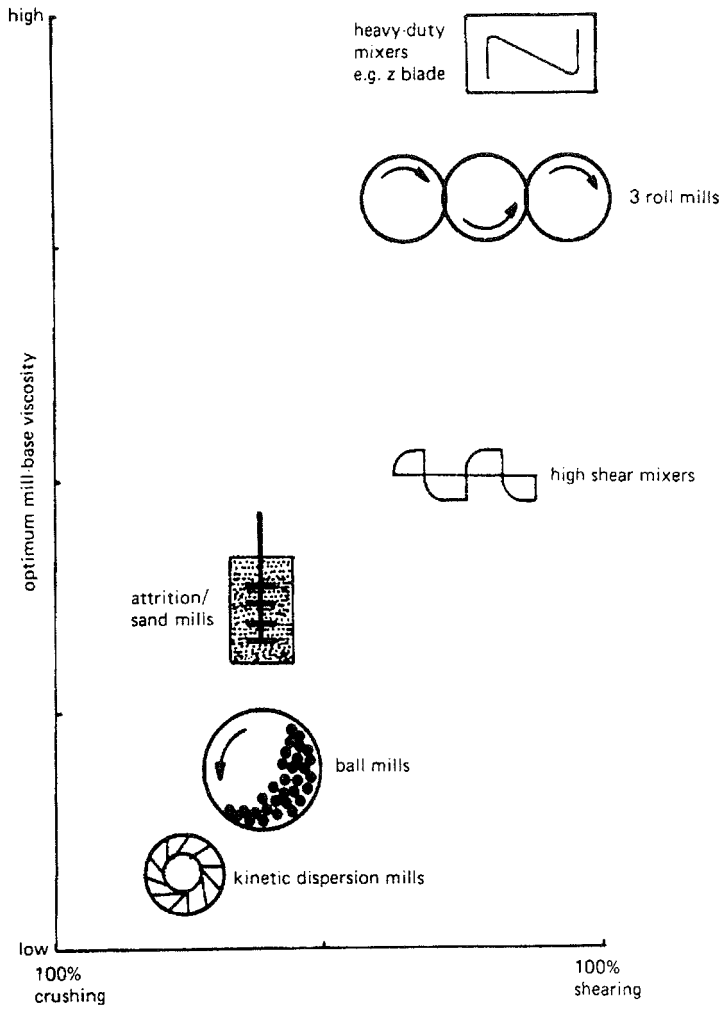
Figur 3.13 Olika typer av knådare (Sterbacke & Tausk 1965)

- a: Används vanligtvis i den kemiska industrin
- b: Används för tunna pastor
- c: Passande för dispersion av färger och pigment i plastiska material och för dispersion av vatten i gummi
- d: Används för knådning av mycket styva material i små kvantiteter
- e: Används för knådning av mycket styva material i stora kvantiteter
- f: Används för homogenisering av fiberrika material
- g: Passande för knådning av gummi

Kvarnar

Vid många tillämpningar kan inte konventionella blandare åstadkomma tillräckligt höga skjuvkrafter i materialen för att bryta upp agglomerat vid dispersion av solida partiklar. Problemet kan t.ex. uppkomma om de blandade komponenterna har mycket olika reologiska egenskaper. Vid sådana tillämpningar kan kvarnar användas där dispersion åstadkoms genom skjuvning och krossning av agglomeraten.

Figur 3.14 visar det principiella tillämpningsområdet för olika typer av kvarnar och deras huvudsakliga blandningsmekanism, d.v.s. huruvida de solida partiklarna dispergeras genom krossning eller skjuvning.



Figur 3.14 Krossning och skjuvning i dispergerande blandningsutrustningar (Edwards & Baker 1992).

4. Blandningskvalitet

4.1 Inledning

Uppskattningen av blandnings kvalitén är en viktig del av alla typer av studier av blandningsprocesser. Uppmätningar av blandningsgraden eller erforderlig blandningstid för en blandningsprocess kräver uppmätningar av blandnings kvalitén. På samma sätt är det nödvändigt att kunna beskriva tillståndet i blandningen vid studier av blandningsmekanismer. Då en blandning har en industriell tillämpning och då dess egenskaper beror på hur bra den är blandad, är blandningskvaliteten en viktig del av produktspecifikationen (Schofield 1974).

När är en blandning väl blandad? Traditionellt så kan svaret vara att en blandning är väl blandad då den är tillräckligt bra för sitt syfte. Att blandningen är tillräckligt blandad för sitt syfte och funktion betyder i regel inte att blandningen är homogen. I tillräckligt liten skala är i praktiken alla typer av blandningar heterogena. Det är därför svårt att definiera begreppet homogenitet. Mängder av forskare har skrivit och diskuterat kring begreppet homogenitet eller perfekta blandningar. Poux et al. (1991) belyser ett 20-tal artiklar som behandlar ämnet. Ett exempel på en definition är Fan et al. (1970) som definierar en homogen blandning som en blandning där sammansättningen av alla beståndsdelar är likformig i alla delar av blandningen. Begreppet homogenitet är i regel olämplig och inte tillräcklig för att karakterisera blandningar typ partikelsuspensioner, solida ämnen, pastor och andra komplexa blandningar. Exempelvis så betyder det olika saker inom olika typer av processindustrier. Begreppet är endast användbart då det är associerat till en lämplig skala.

Det har utarbetats en mängd kriterier för att värdera blandningskvalitet (Nienow et al. 1992). Det är inte så konstigt p.g.a. det mycket breda tillämpningsområdet för blandningsprocesser såsom emulsioner, solida dispersioner, blandning av torra solida material etc. Det olyckliga är att det inte finns någon allmän universell definition för begreppet blandningskvalitet.

Begreppet blandningskvalitet kan komma in i många sammanhang. Bland de enklare att behandla är t.ex. blandning av två torra solida substanser. Där används begreppet för att värdera resultatet (t.ex. koncentrationsvarianser) av blandningsprocessen. Då är det svårare att behandla begreppet blandningskvalitet när t.ex. en kemisk reaktion är inblandad. Blandningsprocessen bedöms där ofta utifrån faktorer som t.ex. produktens reologi, tryckhållfasthet, färg, smak, temperatur etc.

Vid uppskattning av blandningskvaliteten måste man särskilja mellan fördelningen av olika komponenter i blandningen och speciella egenskaper. Det kommer in en mängd andra faktorer än själva blandningsprocessens effektivitet. När processens kvalitet bedöms är det viktigt att fokusera på produktens viktigaste resultat. För att bedöma nivån på utförandet kan det krävas flera indirekta mätmetoder för att bedöma det specifika resultatet.

Detta för att ett blandningsredskap kan utföra flera funktioner samtidigt t.ex. bryter upp agglomerat och distribuera de solida partiklarna.

Syftet med detta kapitel är att ge en översikt över metoder för uppskattning av homogeniteten eller blandningsgraden i en blandning. Teorierna är hämtade främst från vetenskapliga tidskrifter från processindustrin. De typer av blandningar som behandlas är vätskor, fasta ämnen eller kombinationer av olika faser.

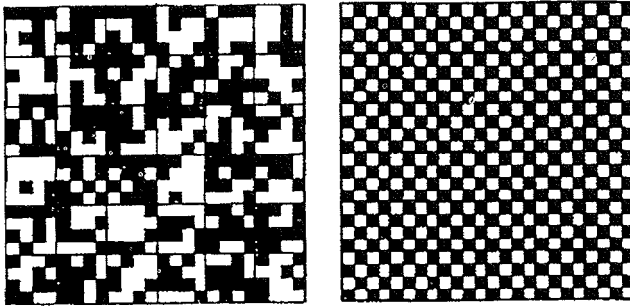
I Kapitel 7 presenteras en studie där blandningskvaliteten utvärderats i samband med en pelarstabilisering i Sverige. I denna studie avses spridningen av bindemedel i den stabiliserade jorden utgöra grunden för en utvärdering av blandningskvaliteten.

4.2 Beskrivning av kvaliteten i en blandning

Blandningsprocessen är en slumpartad process där material systematiskt distribueras och omställs (Sommer 1981). Den resulterande distributionen av partiklar eller komponenter kan beskrivas statistiskt. Generellt så är ett uttryck för blandningsgraden avsedd att indikera de variationer som existerar i blandningen. Variationskoefficienten kan t.ex. användas som ett uttryck för blandningens kvalitet. Efter mycket lång blandningstid så kommer koncentrationen i hela volymen vara likformig.

Ett prov som tas ifrån en blandning kan endast approximativt reflektera distributionen av komponenterna i blandningen. Desto fler prov som analyseras desto bättre blir approximationen. Då antalet prov som analyseras är få blir det antagna felet stort i den statistiska analysen. Detta fel uttrycks i ett konfidensintervall som utgör gränserna mellan vilket det statistiska värdet ligger. Konfidensintervallets storlek beror på antalet prov som analyseras och den statistiska tillförlitligheten.

För att belysa svårigheterna med att beskriva en blandning återges nedan ett exempel hämtat ur Reilly et al. (1994). Figur 4.1 beskriver skillnaden mellan en icke slumpvis blandning av partiklar och en slumpvis blandning av partiklar. De båda blandningarna är uppdelade i ett antal delar eller "undervolymer". Om en blandning är homogen så måste varje undervolym ha samma komposition. Figur 4.1b visar en homogen, icke slumpvis distribution av 50 % vita och 50 % svarta partiklar. Blandningen är indelad i 36 undervolymer med 16 vita resp. svarta partiklar. Sannolikheten att en blandningsprocess kan distribuera partiklarna på ett sådant sätt är mycket liten. Det är mer sannolikt att det bästa en blandningsprocess kan åstadkomma är en distribution enligt Figur 4.1a. Varje undervolym består där av ett olika antal vita eller svarta partiklar. En analys av endast ett prov i denna blandning resulterar i ett resultat som påvisar att de vita och svarta partiklarna inte är fullständigt blandade. En fortsatt slumpvis blandning kommer dock inte att medföra någon förbättring.



Figur 4.1 a) En slumpvis blandning av partiklar. b) En icke slumpvis blandning av partiklar. (efter Lacey 1943 och Rielly 1994).

En fullständig blandning skulle kunna definieras som det stadium där alla prover som tas ur blandningen innehåller samma proportioner eller egenskaper som hela blandningen. Figur 4.1b visar således en fullständig blandning mellan två komponenter. En sådan blandning är inte möjlig att utföra i praktiken. Blandningen i Figur 4.2a består inte av åtta vita resp. svarta partiklar i varje "undervolym" fastän partiklarna är slumpartat distribuerade. Exemplet visar att det inte går att definiera en fullständig blandning utan att beakta variationer i kompositionen eller egenskaperna samt provstorleken.

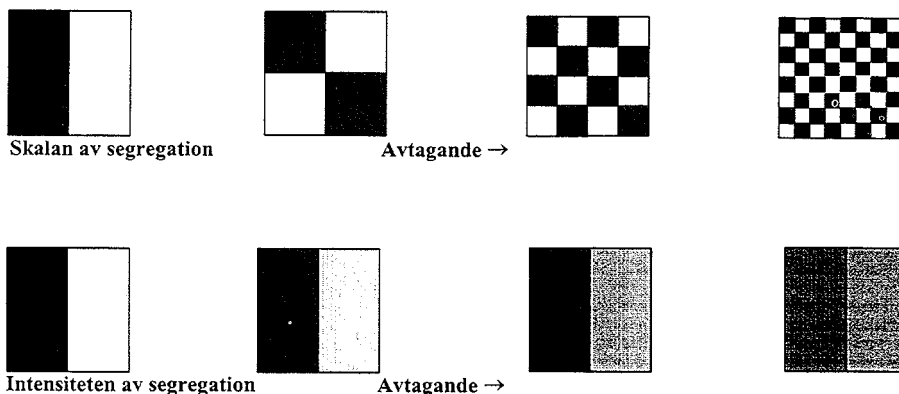
4.3 Skalan av betraktelse

Kvaliteten hos en blandning beror av skalan inom vilken den betraktas (Lloyd 1981). En blandning, t.ex. en partikelsuspension, kan till synes vara homogen då den betraktas okulärt. Om blandningen däremot betraktas i t.ex. ett mikroskop är det märkbart att partiklarna inte är jämnt distribuerade. Blandningsgraden kan således endast bestämmas då en lämplig skala på betraktelsen har upprättats. Skalan av betraktelsen i sin tur bestäms av tillämpningen för produkten. I blandningar där molekylär diffusion är involverad som en blandningsmekanism måste man även ta hänsyn till att blandningsprocessen kan fortgå även fast den mekaniska blandningen är avslutad. Blandningsgraden förbättras med tiden i en sådan process och tidpunkten för en uppskattning av blandningskvaliteten har inverkan på resultatet. Storleken på de prover som tas ur en blandning måste således relateras till den aktuella blandningsprocessen och produktens tillämpning. Praktiskt sett kan man endast uppskatta skalan av betraktelse, men konceptet är användbart för att definiera kvaliteten i en blandning. En fastställd skala av betraktelse begränsar storleken eller volymen på de prover som skall analyseras för en uppskattning av kvaliteten i en blandning.

4.4 Skalan och intensiteten av segregation

En objektiv definition eller uppmätning av blandningskvaliteten måste beskriva distributionen av komponenterna i blandningen och hur ökningen av gränsyteareorna mellan de blandade komponenterna har utvecklats (Schofield 1974).

Danckwerts (1952, 1953) lade fram två kriterier för blandning som kan behandlas kvalitativt och kvantitativt. Det första är skalan av segregation som är ett mått på storleken av oblandade klumpar av ren konsistens och är ett mått på en genomsnittlig storlek. Då klumparna rörs och bryts upp reduceras skalan av segregation. Det andra kriteriet är intensiteten av segregation som beskriver effekten av molekylär diffusion i blandningsprocessen. Det är ett mått på skillnaden i koncentration mellan närliggande klumpar i flödet. Se Figur 4.2.



Figur 4.2 Skalan och intensiteten av segregation (efter Poux et al. 1991)

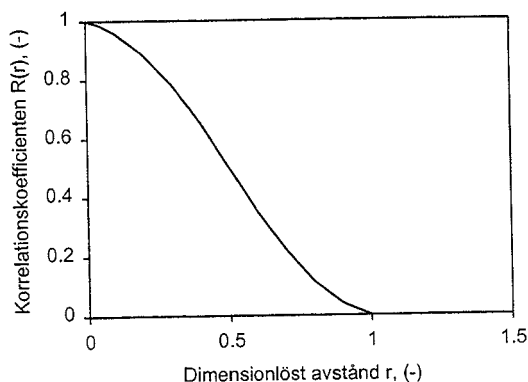
Betrakta en blandning med två vätskor A och B. Koncentrationen av respektive vätska i en punkt ges av a respektive b . Medelkoncentrationen i hela blandningen är \bar{a} och \bar{b} för respektive vätska. Således är

$$a + b = 1, \quad \bar{a} + \bar{b} = 1 \quad (4.1)$$

För en blandning bestående av enbart vätska A blir således koncentrationerna $a = 1$ samt $b = 0$. Korrelationskoefficienten kan definieras som

$$R(r) = \frac{\overline{(a_1 - \bar{a})(a_2 - \bar{a})}}{\overline{(a - \bar{a})^2}} \equiv \frac{\overline{(b_1 - \bar{b})(b_2 - \bar{b})}}{\overline{(b - \bar{b})^2}} \quad (4.2)$$

där a_1 , och a_2 är koncentrationerna av vätska A i två punkter 1 resp. 2, med avståndet r mellan punkterna. Korrelationskoefficienten $R(r)$ ger information om medelvärdet av produkten av koncentrationsvariansen från medelvärdet mellan två punkter 1 och 2. Nämnaren i uttrycket kallas variansen av a (eller b) och uttrycks ibland som σ_a^2 eller σ_b^2 (dessa är lika). Korrelationskoefficienten $R(r)$ antar värden normalt mellan 0 och 1.



Figur 4.3 Korrelationskoefficienten för en blandning (efter Danckwerts 1952).

Enligt Danckwerts (1952) finns det två sätt att mäta upp skalan av segregation i en blandning, dels baserat på avstånd och dels baserat på volym. Längdskalan av segregation S , definieras som

$$S = \int_0^{\infty} R(r) dr \quad (4.3)$$

Längdskalan av segregation S , är arean under kurvan $R(r)$ i Figur 4.3. Volymskalan av segregation V , definieras som 2π gånger arean under kurvan $r^2 R(r)$,

$$V = 2\pi \int_0^{\infty} r^2 R(r) dr \quad (4.4)$$

Skalan av segregation är ett användbart koncept för blandningar med grovkorniga material där individuella partiklar är särskilda utan kemiska bindningar dem emellan. Konceptet ger däremot lite information om intensiteten av segregationen. I blandningar med finkorniga material måste hänsyn tas till molekylär diffusion.

För att ta hänsyn till molekylär diffusion i en blandning presenterade Danckwerts (1952) en andra definition för blandningsgraden som baseras på koncentrationsvariansen för en komponent i blandningen. Medelkoncentrationen och variansen av komponent A i en blandning tecknas som

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (4.5)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \quad (4.6)$$

där a_i är koncentrationen av A i prov i och n är antalet prover. Variansen σ^2 beskriver hur koncentrationen A varierar i blandningen men representerar endast en skattning av den verkliga variansen. För en fullständigt segregerad blandning är variansen (Lacey 1943)

$$\sigma_0^2 = \bar{a}\bar{b} = \bar{a}(1 - \bar{a}) \quad (4.7)$$

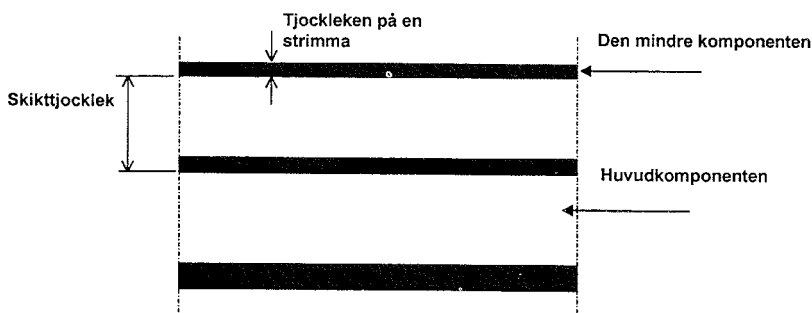
Intensiteten av segregation definieras som (Danckwerts 1952)

$$I = \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} = \frac{\sigma^2}{\bar{a}(1 - \bar{a})} \quad (4.8)$$

Enligt konceptet med intensiteten av segregation så är $I = 1$ för en fullständigt segregerad blandning och $I = 0$ för en homogen blandning. Effekten av förändringar i skalan av segregation och intensiteten av segregation visas i Figur 4.2. Blandningen blir mer diffus då intensiteten av segregation minskar medan en minskning av skalan av segregation minskar storleken på de blandade partiklarna och gör blandningen mer homogen.

I system där kemiska reaktioner är inblandade är blandning i mikroskopisk skala viktig, för utan den kommer endast reaktioner ske på ytan av klumpar i blandningen. Vid t.ex. jetblandning reduceras skalan av segregation av turbulent rörelse, medan skalan av intensitet reduceras genom molekyllär diffusion. När solida partiklar blandas in kommer deras partikelstorlek att påverka skalan av segregation och hur den reduceras.

Vid laminär blandning av två material kan tjockleken hos skikten vara ett mått på blandningskvaliteten (skalan av segregation) enligt Figur 4.4. Skiktens tjocklek kan relateras till effektiviteten i molekyllär diffusion mellan de två materialen (intensiteten av segregation) för att på sådant sätt ge en bild av erforderlig blandningsgrad för den aktuella applikationen.



Figur 4.4 Tjockleken på skiktningen som ett mått på blandningskvaliteten (Edwards 1992)

Blandningsresultatet beror alltså av skalan av vår betraktelse. Om en grov blandning är tillräcklig för ett tillfredsställande resultat spelar molekyllär diffusion en liten roll. Molekyllär diffusion är en långsam process och är svår att få effektiv vid laminär blandning i högväskösa medier, t.ex. tunga partikelsuspensioner.

4.5 Blandningsindex

Med utgångspunkt från koncepten för skalan av segregation och intensiteten av segregation enligt Danckwerts (1953) har det utarbetats en mängd olika blandningsindex. De flesta typer av blandningsindex är främst användbara för blandning av solida material. Ett 40-tal olika blandningsindex har sammanställts av Poux et al. (1991) och en jämförelse mellan några av dessa är utförd av Fan och Wang (1975), Fan et al. (1979) och Reilly (1994).

Danckwerts definition av intensiteten av segregation antar att en perfekt blandning har en koncentrationsvarians som är lika med noll. Det existerar dock en liten koncentrationsvarians beroende på att det är ett finit antal partiklar i ett prov taget från en blandning. För en fullt slumpmässig blandning (en stokastisk blandning) med lika stora partiklar är koncentrationsvariansen (Lacey 1954)

$$\sigma_R^2 = \frac{\bar{a}(1-\bar{a})}{n_p} \quad (4.9)$$

där n_p är antalet partiklar i varje prov och \bar{a} är medelfractionen av komponent A i blandningen.

I alla typer av blandningar är (Poux et al. 1991)

$$\sigma_R^2 > \sigma^2 > \sigma_0^2 \quad (4.10)$$

Antag att i ett initialt skede är de binära komponenterna fullständigt segregerade med en koncentrationsvarians σ_0^2 . Lacey (1954) definierar där ett blandningsindex som

$$M = \frac{\text{Den (mängd) blandning som skett}}{\text{Den (mängd) blandning som kan uppnås}} \quad (4.11)$$

$$= \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_R^2}$$

Enligt Lacey's blandningsindex så har en fullt segregerad blandning värdet noll och en fullt slumpmässigt fördelad blandning värdet ett. Vid blandningar med vätskor kan koncentrationsvariansen för en fullt slumpmässig blandning, σ_R^2 antas vara lika med noll och vi erhåller ett blandningsindex som definieras som (Miles 1962)

$$M = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} \quad (4.12)$$

Blandningsindexet enligt Miles (1962) ovan, är relativt okänsligt för olika blandningskvaliteter eftersom en dåligt dispergerad blandning har en koncentrationsvarians som är närmare σ_R^2 än σ_0^2 . Detta innebär att detta blandningsindex i regel ligger i intervallet 0,75-1,0 oavsett dispergeringsgrad. Ett mer känsligt blandningsindex är definierat som (Rose & Robinsson 1965)

$$M = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (4.13)$$

Ett antal liknande blandningsindex har presenterats i litteraturen vilka har sammanställts av Poux et al. (1991). Några av dessa visas i Tabell 4.1. Det gemensamma för dessa blandningsindex är att de främst har tillämpats på blandningar med fasta material. Analysen har utvecklats med förutsättningen att blandningen är ett binärt system med lika stora partiklar där alla partiklar har samma densitet. I praktiken så består blandningar av olikformade partiklar med olika densiteter och det medför att koncentrationsvariansen för en fullt slumpmässig blandning σ_R^2 , blir olika beroende om analysen baseras på antalet partiklar eller vikten av de olika partiklarna.

Det har också utvecklats ett antal blandningsindex som inte enbart baseras på definitionerna för σ , σ_0 och σ_R . Dessutom har ett antal index presenterats som baseras på experimentella arbeten. Ett antal sådana blandningsindex visas i Tabell 4.2.

I samband med ytstabilisering har man använt begreppet blandningsgrad för att bedöma effektiviteten i blandningsprocessen (Assarsson 1972, Sherwood 1993). Stabiliserat material som blandats i fält delas i två grupper. Materialet i den ena gruppen blandas en gång till, fast med en laboratorieblandare. Från de båda grupperna prepareras provkroppar och efter 7 dygn utförs tryckförsök. Utifrån resultaten från tryckförsöken beräknas den uppnådda blandningsgraden enligt följande:

$$\text{Blandningsgrad} = \frac{\text{Hållf. för icke efterblandat mtrl.}}{\text{Hållf. för efterblandat mtrl.}} \times 100\% \quad (4.13)$$

Tabell 4.1 Blandningsindex för binära blandningar baserade på statistiska analyser (Efter Poux et al. 1991)

Författare	Uttryck	Fullt segregerad	Fullt blandad
		$\sigma = \sigma_0$	$\sigma = \sigma_R$
Lacey (1943)	$M = \frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma_0 - \sigma_R}$	0	1
Lacey (1954)	$M = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_R^2}$	0	1
Miles (1962)	$M = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2}$	0	1
Rose & Robinson (1965)	$M = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0}$	0	1
Ashton & Valentin (1966)	$M = \sqrt{\frac{\ln \sigma_0^2 - \ln \sigma^2}{\ln \sigma_0^2 - \ln \sigma_R^2}}$	0	1

Tabell 4.2 Blandningsindex (efter Poux et al. 1991)

Författare	Uttryck	Kommentar
Legatt (1951)	$M = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{\bar{x}}$	
Izykowski (1956)	$M = \frac{|x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}}$	
Coulson & Maitra (1950)	$M = 1 - X$	X : procentandelen oblandat material
Lastovtsev et al. (1962)	$M = \sqrt{\frac{\sum (C_i - C_0)^2 n_i}{C_0^2 (n-1)}}$	C_0 : Koncentrationen av en komponent för en ideal blandning. C_i : Koncentrationen av komponent i . n : Antalet prover. n_i : Antalet prover med koncentrationen C_i .
Adams & Baker (1956)	$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$	
Iinoya et al. (1985)	$M(t) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\frac{x_i(t)}{x_\infty} - 1 \right]^2}$	$x_i(t)$: Volymfraktionen eller koncentrationen av specificerade partiklar detekterade vid tidpunkten t . x_∞ : Det förväntade värdet vid en ideal blandning.
Gray (1957)	$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum (I - \bar{I})^2$	I : Avläst värde från sond. \bar{I} : Medelvärdet för de avlästa värdena.

Blandningseffektiviteten kan också uppskattas genom att jämföra den hållfasthet som erhålls för prover som prepareras i laboratorie med den hållfasthet som erhålls för prover som tagits från fält. Effektiviteten i blandningen uttrycks med hjälp av K_h (Kezdi 1979):

$$K_h = \frac{\sigma_{u,\text{fält}}}{\sigma_{u,\text{lab}}} \times 100\% \quad (4.14)$$

där $\sigma_{u,\text{fält}}$ är tryckhållfastheten efter 7 dygn för prover som är stabiliserade och packade i fält och $\sigma_{u,\text{lab}}$ är tryckhållfastheten efter 7 dygn för prover som är stabiliserade och packade i laboratorie under liknande förhållanden. Enligt Baghdadi & Shihata (1999) är K_h vanligtvis i storleksordningen 60-80 %.

4.6 Uppmätning av blandningskvalitén

De teoretiska metoder som presenterats i kapitel 4.4 och 4.5 bildar en bas för uppskattningen av blandningsgraden i en blandning. En uppskattning av blandningsgraden bör

byggas på koncepten för skalan och intensiteten av segregation, alternativt någon form av definierat blandningsindex. Vid uppmätning av blandningsgraden måste provtagning ske och resultatet påverkas bl.a. av antalet prover, provernas storlek, mätteknik och analysmetod.

Antalet prover som tas ur blandningen är kopplat till den analysmetod som används. Desto färre prov som analyseras desto osäkrare blir uppskattningen av blandningsgraden. Med ett litet antal prov går det att uppskatta konfidensintervallet för medelvärden med en bestämd sannolikhet genom att använda en t-distribution (Johnson 1994). Det finns tabeller som anger t-distributionen som funktion för sannolikheten för fel. Med ett större antal prover minskar värdet för t och det ökar då den tillåtna sannolikheten. För statistiska analyser av koncentrationsvarianserna krävs dock ett relativt stort antal prover. Poux et al. (1991) rekommenderar att 20-40 prover bör tas från en blandning för att ge en korrekt information om blandningsgraden.

Prover måste tas från olika delar av blandningen för att man skall få en helhetssyn av blandningsprocessen. För att få en tillfredsställande bild av blandningsgraden måste således prover tas enligt fastställd metodik beroende på den aktuella blandningsprocessen. En lämplig metodik för provtagning kan således skilja sig från en blandningsprocess till en annan. Harnby (1972) presenterade en metodik för provtagning som går ut på att prover tas slumpvis ur blandningen. Metodiken garanterar att prover tas från representativa delar ur blandningen.

Hur inverkar partikelstorleken på blandningskvalitén? Poole et al. (1964) visar med försök att partikelstorleken har en inverkan på variationskoefficienten i en blandning. Försöken visade ett linjärt samband för olika typer av blandningar. Bourne (1968) visar att variansen i en blandning inte bara beror av partikelstorleken utan också av formen hos partiklarna. För komplexa blandningar med solida material där kemiska reaktioner är inblandade finns dock inga teoretiska samband publicerade som behandlar partikelstorlekens inverkan.

En uppskattning av blandningsgraden baserad på koncepten för blandningsindex bygger på att man kan uppskatta koncentrationsvarianser. Med antagandet att fel orsakade av provtagnings- och analysproceduren är oberoende av varandra kan koncentrationsvariansen i en blandning tecknas som (Yip och Hersey 1977, Orr 1979)

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{blandning}}^2 + \sigma_{\text{analys}}^2 + \sigma_{\text{provtagning}}^2 + \sigma_{\text{renhet}}^2 \quad (4.15)$$

där,

$\sigma_{\text{blandning}}^2$ = Varians beroende på blandningen.

σ_{analys}^2 = Varians beroende på analysmetoden.

$\sigma_{\text{provtagning}}^2$ = Varians beroende på provtagningsmetoden och provstorleken.

σ_{renhet}^2 = Varians beroende på hur rena proverna är.

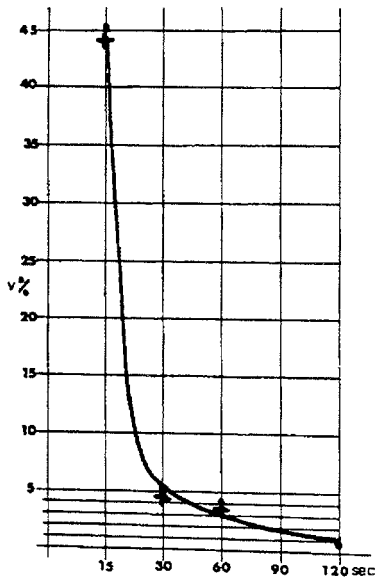
Bidraget till det totala felet från provtagningen och analysmetoden kan vara betydande (Yip och Hersey 1977, Orr 1979). Vid en studie av hur t.ex. en blandningsprocess inverkar på blandningsgraden, är det således viktigt att kunna uppskatta inverkan av analysmetoden, provtagningsmetoden samt se till att proverna inte är förorenade.

Det finns en mängd olika sätt att mäta blandningsgraden i en process. Några av de parametrar som ofta mäts och används för att bedöma blandningsgraden och processens tillstånd inom processindustrin är (AIChE 1987):

- Blandningstid
- Densitet
- Kornstorleksfördelningen
- Agglomerat bildning
- Flytegenskaper
- Kemiska/fysikaliska egenskaper
- Temperatur
- Tryck
- Flödesgrad
- Volym
- Fasproportioner

Blandningstiden är den tid som erfordras för att blandningen av de ingående substanserna skall uppnå en specificerad grad av likriktighet. Blandningen sägs då vara blandad (Edwards 1992). Kriteriet används speciellt vid blandning av blandningsbara vätskor. När resultatet av en blandningsprocess skall bedömas är det viktigt att göra ett noggrant beaktande av den teknik som används för att bedöma blandningsgraden. Ofta är blandningstiden given i en process (t.ex. en given stighöjd, mm/varv vid djupstabilisering) och den kan vara mycket subjektiv. En blandningstid har endast en mening om den uppnådda blandningskvaliteten vid processens slut är väl definierad.

Svårigheterna att mäta och uppskatta skalan av segregation vid blandning av vätskor har medfört att det är populärt att använda mycket enkel statistik där man jämför koncentrationsvariansen i olika punkter med medelvärdet (referens). Ett sätt är att mäta koncentrationen av t.ex. ett spårämne och studera t.ex. variationskoefficienten med tiden, Figur 4.5. Praktiska blandningstider kan uppmätas med en rad olika tekniker, t.ex. syrabas indikator, variationer i den elektriska ledningsförmågan, temperaturvariationer och ljusabsorptionsteknik (AIChE 1979, Edwards et al. 1992).



Figur 4.5 Variationskoefficienten som funktion av blandningstiden för en mätpunkt i en blandningsprocess (efter Ries 1978).

Det är svårt att karaktärisera prestationen hos en blandare eftersom den ofta utför flera funktioner samtidigt. Blandare bedöms i regel utifrån den färdiga produkten, ofta av praktiska orsaker. En mängd kriterier används för att definiera en väl blandad produkt eller ett likformigt dispergerat tillstånd och ofta är de inte direkt relaterade till distributionen av koncentrationer eller fasproportioner i blandningen. Praktiska mätmetoder för att uppmäta skalan och intensiteten av segregation för väl blandade prover omfattas inte i vanliga rutinanalyser. Blandningsprocessen bedöms alltså ofta utifrån produktens egenskaper vilka är beroende av fler faktorer än enbart effektiviteten i blandningsprocessen. Ett exempel på detta är då man bedömer blandningsgraden utifrån hållfasthetsparametrar.

I blandningar med t.ex. visköst elastiska material, partikelsuspensioner med höga partikelkoncentrationer, flera komplexa material och/eller blandningar där relativt snabba kemiska reaktioner är inblandade, så kan det vara svårt att mäta egenskaper under blandningsprocessen.

Ett vanligt förekommande sätt att bedöma blandningsprocessen är att studera tillförd energimängd per volymsenhet. I fluider med hög viskositet har viskositeten och rotationshastigheten liten effekt på antalet rotationer per volymsenhet som erfordras för att uppnå blandning (Godfrey 1985). Godfrey skriver att blandningsförloppet beror endast av antalet rotationer hos blandningsverktyget. Relationen mellan blandningens kvalitet och blandningstiden är av första ordningen. Blandningsgraden är oberoende av viskositeten

men kan reduceras av antingen pseudoplastiska eller visköst elastiska egenskaper. Enligt Godfrey (1985) är både kraftkonsumtionen och blandningstiden viktig för blandningsgraden. Den energi som erfordras för en föreskriven blandningsgrad kan uttryckas som en produkt av kraftkonsumtionen och blandningstiden enligt (Lindley 1991b):

$$E_w = P_0 \times t_m \quad (4.16)$$

där: E_w = Totala energin, Nm

P_0 = Ineffekten, W

t_m = Blandningstiden, s

I blandningsprocesser där produktens egenskaper är en funktion av tillförd energimängd per volymenhet är det möjligt att utföra försök i mindre skala med likartad geometri och på sådant sätt studera blandningsprocessen i skala.

Det är viktigt att dokumentera förutsättningarna vid studier av blandningsresultat. Vid observationer av blandningsgrader kan nämligen mindre faktorer ha stor betydelse, såsom vilken mätutrustning som använts och var den har varit placerad. Mätningar av blandningsresultat bör följande typer av data finnas med (AIChE 1979):

- Driftförhållanden
- Beskrivning av utrustningen
- Diverse utrustning och prestanda
- Matningsegenskaper
- Egenskaper hos produkten
- Tryck, temperatur, flöde, rotationshastighet
- Kraftkonsumtionen

För att det skall vara möjligt att utveckla metoder för uppmätning och analys av blandningsgraden i en blandning är det viktigt att alla praktiska försök dokumenteras mycket noggrant. En studie av utvecklingen av blandningsindex och olika metoder för uppmätning av olika parametrar inom processindustrin visar att det är viktigt att studier publiceras och diskuteras. Föreliggande litteraturstudie visar att det ligger mycket arbete och lång tid av forskning bakom den kunskap som finns inom processindustrin. Det är således viktigt att snabbt skapa ett diskussionsforum (skriftligt och granskningsbart) för att bygga upp ett system av lämpliga kriterier för blandning och tillförlitliga mätmetoder för uppskattning av tillståndet i en blandning.

5. Reologi

5.1 Inledning

Vid alla typer av processer där man blandar olika material är det av vikt att känna till, eller åtminstone ha en god kunskap om de ingående materialens reologiska egenskaper, för att skapa de nödvändiga grundförutsättningarna för en förståelse av blandningsprocessen. Det finns ett mycket brett spektra av processer där det varierar hur detaljerade de reologiska data måste vara för att produkten skall uppnå de ställda kraven/önskemålen. Vid vissa processer är det nödvändigt att de ingående materialen har de rätta reologiska egenskaperna för att t.ex. en kemisk reaktion skall ske eller för att de rätta cirkulationsmönstren skall utvecklas. Vid andra processer kanske det räcker med att t.ex. viskositeten är under ett gränsvärde för att säkerställa cirkulation eller turbulenta strömningar.

Då de reologiska egenskaperna i de ingående materialen i en blandningsprocess är kända kan man utvärdera vilka blandningsmekanismer som är nödvändiga för att produkten skall erhålla de rätta egenskaperna. När väl de nödvändiga blandningsmekanismerna är kända kan man bestämma vilka blandningsprocesser som kan vara lämpliga. Utgångspunkten för alla blandningsprocesser är således materialens reologiska egenskaper.

Lösa leror medför ingenjörstekniska utmaningar eftersom de varierar i sammansättning och egenskaper. Det är mycket svårt att bestämma en leras reologiska egenskaper i samband med t.ex. djupstabilisering. Bara det att geologin och vattenkvoten varierar i en och samma lokal gör det svårt att bestämma de reologiska egenskaperna i jorden under blandningsprocessen. I detta kapitel belyses en del av den kunskap som finns tillgänglig om lerors reologiska egenskaper i en ansats för ökad förståelse för blandningsmekanismer vid pelarstabilisering.

Kunskaperna om de reologiska egenskaperna i suspensioner bestående av kombinationer av lera, luft, kalk och cement är mycket begränsade. Detta beror delvis på att de reologiska egenskaperna inte studeras och uppmäts i samband med de rutinmässiga laboratorieinblandningar som utförs i samband med pelarstabilisering. Den idag använda metoden (Carlsten & Ekström 1995) för laboratorieinblandad jord medför inga möjligheter att studera de reologiska egenskaperna under blandningsprocessen. Eftersom denna utrustning i regel alltid används i samband med forsknings- och utvecklingsprojekt medför detta att kunskapen är mycket begränsad. En annan orsak är att det är svårt att kvantitativt mäta reologiska egenskaper med den teknik och utrustning som idag finns tillgänglig. Denna problematik diskuteras i detta kapitel.

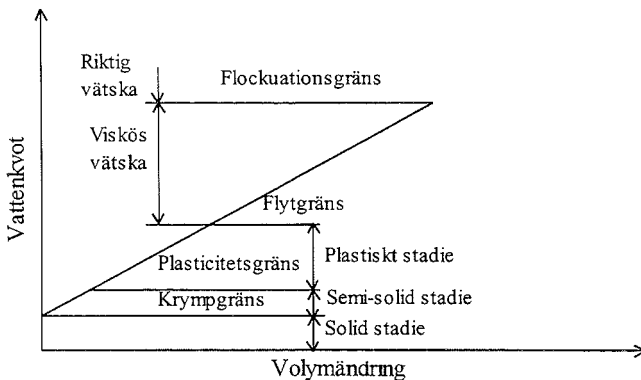
5.2 Reologiska egenskaper

Visköst elastiska egenskaper

Lera är ett heterogent material som består av elastiska och bräckliga solida komponenter. Dessa är separerade av osammanhängande ytor från vätskan och luften i porerna. Lera har mycket komplexa reologiska egenskaper som beror bl.a. av (Gillott 1987):

1. De fysikaliska egenskaperna hos vattnet i yt-zonen mot mineralen, mängden vatten och kompositionen av närvarande lösningar.
2. Graden av aggregatbildning och cementering av mineralen.
3. Mineralens uppbyggnad.
4. Orientering och densitet/packningsgrad
5. Mekanisk, fysikalisk och kemisk växelverkan mellan mineralen och mellan de i porerna inneslutna lösningarna och luften.

Ett idealt plastiskt material som belastas över flytspänningen deformeras kontinuerligt och erhåller permanenta deformationer. Över en viss vattenkvot har leror plastiska egenskaper medan torr lera endast visar på liten eller obefintlig plasticitet (Gillott 1987). Plasticiteten hos en lera påverkas också av mineralens komposition, beskaffenheten av utbytet av joner, mineralkristallernas storlek, mineralens storleksfördelning, mängden vatten, koncentrationen av joner i porerna och den geologiska historien. Inom jordmekaniken används begreppet plasticitetsindex för att beskriva graden av vatteninnehåll över vilken plastiska egenskaper observeras, Figur 5.1.



Figur 5.1 Relation mellan vattenkvot och volymändring i ett lermaterial (efter Gillott 1987).

Alla leriga jordar visar tidsberoende mekaniskt beteende som kan beskrivas som visköst elastiskt (t.ex. Hvorslev 1960, Adeyeri et al. 1970). När ett visköst elastiskt material utsätts

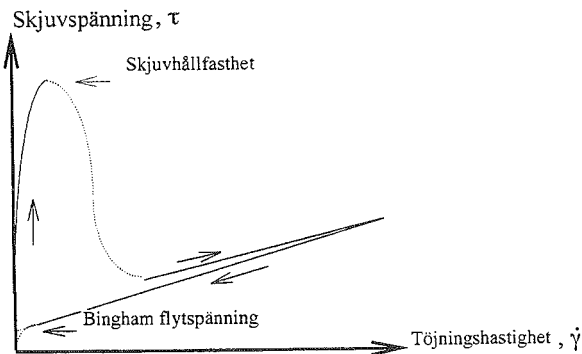
för en mekanisk påverkan lagras en del av energin såsom elastisk energi och återstående energi frigörs som viskös energi, värme. Den frigjorda energin leder till permanenta deformationer medan den lagrade energin kan bidra till en dämpning och delvis återhämtning av deformationerna. Ett visköst elastiskt material har således både elastiska (Hooke´s lag) och viskösa egenskaper (Newton´s lag). Det enklaste fallet kan beskrivas med följande samband enligt Meyer (1874):

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\mu_0} \quad (5.1)$$

(Hooke´s lag) (Newton´s lag)

- där,
- $\dot{\gamma}$ = Töjningshastigheten ($d\gamma/dt$), s^{-1}
 - τ = Skjuvspänningen, Pa
 - $\dot{\tau}$ = Derivat av skjuvspänningen ($d\tau/dt$), $Pa \cdot s^{-1}$
 - G = Skjuvmodulen, Pa
 - μ_0 = Viskositeten vid $\dot{\gamma} = 0$, $Pa \cdot s$

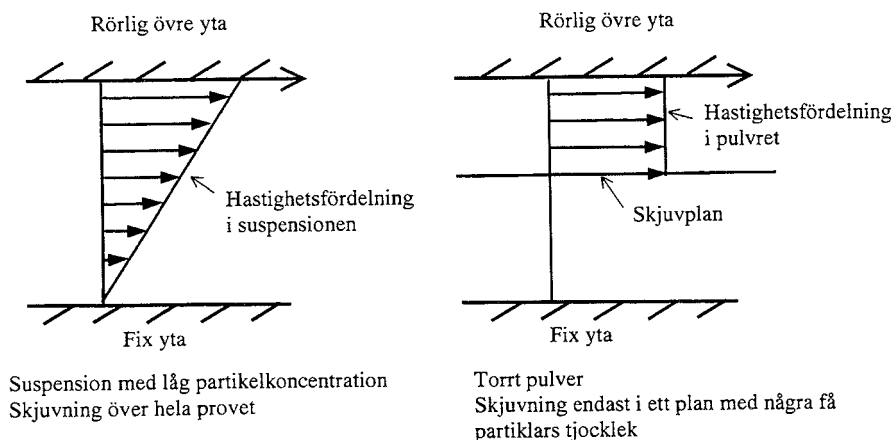
Figur 5.2 visar schematiskt förloppet då ett visköst elastiskt och plastiskt ostört material utsätts för en gradvis ökad skjuvspänning. Det som händer i det initiala skedet är en tävling mellan strukturell uppbrytning och omformering (Walters 1980, Nakajima 1994). Materialet deformeras allt snabbare då spänningen gradvis ökas. Vid den maximala spänningen kan inte materialet längre omformas. Strukturen är så uppbrotten att vidare deformation blir allt snabbare även vid låga spänningar. Egenskaperna hos materialet blir allt mer likt en vätska. Den maximala skjuvspänningen i figuren förhåller sig bra med den skjuvhållfasthet som uppmäts med t.ex. penetrometer eller kompressionsprov.



Figur 5.2 Schematisk framställning av strukturell uppbrytning i ett visköst elastiskt och plastiskt material som utsätts för gradvis ökad skjuvspänning (efter Walters 1980).

Under inverkan av laminär skjuvning reduceras viskositeten i en lersuspension som en följd av att lerpartiklarna följer en mer parallell orientering (Gillott 1987). Frigjord vätska som varit innesluten i porer hjälper den strukturella nedbrytningen vid skjuvning. Skjuvningen minskar å andra sidan storleken på strukturerna vilket kan leda till en ökning av kollisioner mellan partiklar. I en del system kan detta ha en dominerande effekt på viskositeten.

Granulat- visköst beteende förekommer då ett material med hög partikelkoncentration har både solida materialegenskaper och viskösa flödesegenskaper (Cheng & Richmond 1978). Under skjuvning kan visköst beteende beskrivas med ett spänning- töjnings- hastighets- samband. Sambandet är oberoende av normalspänningen om inte trycket är extremt högt. Viskösa material antas normalt vara icke kompressibla. Torra solida material karakteriseras av att skjuvspänningen är beroende av normalspänningen och skrymdensiteten och inte beroende av töjningshastigheten. Vidare karakteriseras de av att de är kompressibla. Vid skjuvning av ett material som har endast viskösa flödesegenskaper utvecklas en kontinuerlig hastighetsprofil medan skjuvning av ett torrt pulver resulterar i ett skjuvplan som är endast några få partiklar tjockt, se Figur 5.3. Skjuvhållfastheten hos ett material med hög partikelkoncentration kan förväntas vara beroende av både töjningshastigheten och normalspänningen. Vid skjuvning kan hastighetsprofilen ha en mängd avbrott. Praktiskt sett så betyder det för t.ex. tunga suspensioner att kraftöverföringen från ett blandningsredskap hindras och det är svårt att skapa de materialrörelser som är nödvändiga för att blandning av materialen skall ske (Nagata et al. 1972).



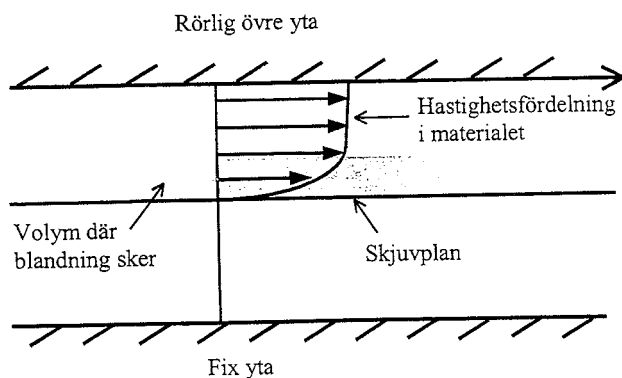
Figur 5.3 Hastighetsprofilen vid skjuvning av en suspension med låg partikelkoncentration och ett torrt pulver.

Också hos leror är uppkomsten av glidplan eller glidytor karakteristiskt, då de utsätts för en snabb skjuvande rörelse. Figur 5.4 visar blandningsmekanismen laminär skjuvning i en partikelsuspension med hög halt av solida material, t.ex. en lera. Figuren visar hastighetsfördelningen i materialet då den övre ytan rör sig och den undre ytan är fix. Relativ rörelse i materialet, som är förutsättningen för blandning, sker bara i själva glidytan och i en mycket begränsad volym alldeles ovan. Ovanför denna volym rör sig materialet som en stel kropp och under glidytan sker ingen rörelse alls.

Även om rörelserna och blandningsmekanismerna runt ett blandningsredskap i praktiken är mer komplicerade än vad Figur 5.4 visar, så ger figuren en förklaring till varför det är svårt att skapa rörelser i jorden då den blandas med bindemedel. Då ett blandningsredskap roteras i jorden skapas rörelser endast i bladens närhet. På grund av jordens visköst elastiska egenskaper kan inte krafter och rörelser propagera ut från blandningsredskapet.

En glidyta kan också utvecklas i direkt anslutning till den övre rörliga ytan. Detta fenomen som inom reologin kallas för "slip" inträffar då den övre ytan är slät eller glatt. Faktorer som har inverkan på detta fenomen är bl.a. materialtyp, partikelstorlek, geometri, hastigheten, skjuvspänningarna mot ytan, partikelkoncentrationen, flytspänning och viskositet. I lösa konsoliderade jordar i plastiskt tillstånd är det en påtaglig risk för att detta fenomen uppkommer.

Viskoelasticitetsteori är en mycket etablerad vetenskap där det skrivits mängder av böcker som sammanfattar ämnesområdet och beskriver egenskaper hos olika material (bl.a. Drozdov 1998, Haddad 1995, Lakes 1998, Tschoegl 1989). En mycket omfattande sammanställning av lerors egenskaper, reologiska modeller och tillämpningar inom ingenjörsgéologin är utförd av Gillott (1987). Coussot 1997 har skrivit en monografi som sammanställer dagens kunskapsnivå avseende reologiska egenskaper hos ler- vattensuspensioner med tillämpning på jordflytning i samband med skred.



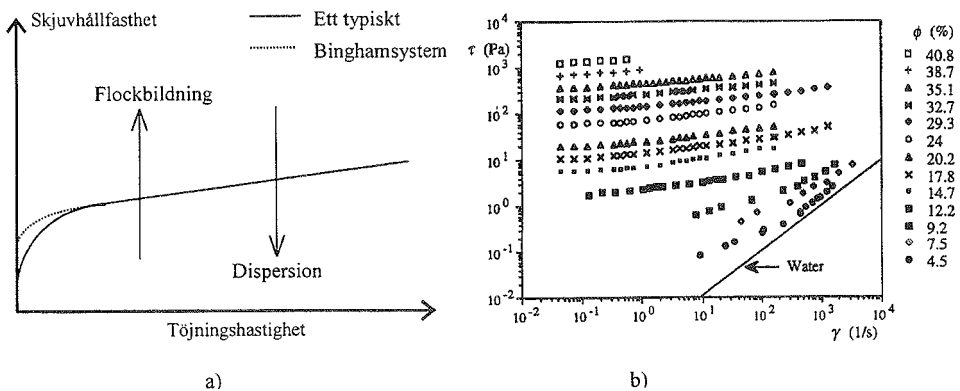
Figur 5.4 Laminär skjuvning av ett material med flytspänning och hög koncentration av solida partiklar.

Faktorer som påverkar de reologiska egenskaperna

Det kan vara svårt att skapa rörelser i en lera även om den är fullt uppbruten och betar sig som en vätska. Leran har fortfarande en flytspänning som måste överskridas för att leran skall sättas i rörelse och rörelse skall uppstå, Figur 5.4.

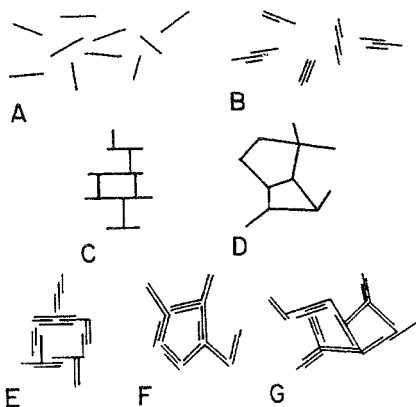
I partikelsuspensioner verkar hydrodynamiska och icke- hydrodynamiska krafter såsom London- van der Waals krafter (Giesekus 1983). Växelverkan av denna typ sker mellan olika partiklar och mellan partiklar och vätskefasen. Desto högre partikelkoncentrationen blir desto mer tar de icke- hydrodynamiska krafterna över och suspensionen erhåller egenskaper som är icke- Newtonskt. Suspensionen har en flytspänning som ger suspensionen egenskaper som ett solid material då spänningarna i materialet ej överskrider flytspänningen.

Vid ett fullt uppbrutet tillstånd och vid höga vattenkvoter kan lersuspensioner antas ha flödesegenskaper enligt Binghammodellen (Nickel 1976; Locat 1992). Vid skjuvspänningar över Bingham's flytspänning τ_B ökar töjningshastigheten snabbt med ökad skjuvspänning, se Figur 5.5. I lersuspensioner är styrkan hos interpartikulära bindningar, typen av partiklarnas orientering och uppbyggnad (Figur 5.4), partiklarnas jämviktsavstånd en funktion av van der Waals- London krafter och styrkan och tjockleken av de elektriska dubbellaagren på ändarna och ytorna på lerpartiklarna. Dessa i sin tur är bestämda av mineraltypen, jonernas egenskaper och koncentrationen av elektrolyten i systemet (Nickel 1976). Flytspänningen beror starkt av lerkoncentrationen för de flesta lersuspensioner. Flytspänningen beror också av elektrolytkoncentrationen, men dess påverkan är varierande för olika lersuspensioner. Ett exempel på skjuvspänningen som funktion av töjningshastigheten och partikelkoncentrationen visas i Figur 5.5b.



Figur 5.5 a) Förhållande mellan skjuvspänning och skjuvgradienten för ett Bingham system och för en typisk lersuspension (efter Nickel 1976).

b) Flödeskurvor för en kaolinsuspension med olika partikelkoncentrationer ϕ (Caussot 1997).



Figur 5.6 Terminologi och modeller för partikelförhållanden i lersuspensioner (efter Van Olphen 1977).

- (A) "Dispergerad" och "deflockulerad".
- (B) "Aggregation" men "deflockulerad".
- (C) Kant-mot-yta flockulerad men "dispergerad".
- (D) Kant-mot-kant flockulerad men "dispergerad".
- (E) Kant-mot-yta flockulerad och "aggregation".
- (F) Kant-mot-kant flockulerad och "aggregation".
- (G) Kant-mot-yta och kant-mot-kant flockulerad men "aggregation".

Leror visar på mycket skiftande skjuvhållfasthetsegenskaper med varierande vattenkvot. När andelen vatten är stor beter sig leror som fluidsuspensioner även om växelverkan mellan partiklarna, joner och molekyler i suspensionen gör lerans egenskaper ovanliga. Om vatteninnehållet minskar ökar konsistensen. Det icke viskösa beteende en lera har vid vattenkvoter under flytgränsen kan förklaras med att lermineralen är förbundna i kontakt-ytor eller länkade mot varandra (Allam & Sridharan 1984). Vid laboratorieförsök där de reologiska egenskaperna studerats har det visat sig att rörelserna i lersuspensionen minskar med minskat vatteninnehåll (Torrance 1986), d.v.s brottzonen är begränsad till en del av den förväntade tvärsnittsytan.

Komamura & Huang (1974) studerade flytegenskaper i lerjordar med vattenkvoter både under och över flytgränsen. Denna studie visade att viskositeten i en lera kan minska dramatiskt när vattenkvoten överskrider flytgränsen. Orsaken till detta hänförs till en abrupt strukturell omvandling vid flytgränsen. En sensitiv jord tappar snabbt skjuvhållfasthet då den utsätts för rörelse och rörelsen sker i glidytor.

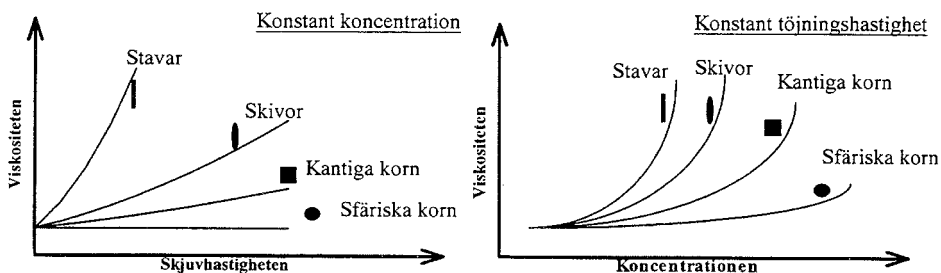
Vid ett tidigt skede antas lerpartiklarna arrangeras relativt öppet och vara löst packade. Förändringar med tiden sliter upp den öppna vävnaden ur jämvikt. Lerpartiklarna håller dock ihop p.g.a. cementation, elektrokemiska bindningar, tryck och sammankopplingar orsakade av ömsesidiga ingripanden av partiklar som hindrar fri rotation. När leran störs eller rörs om antar partiklarna en mer packad konfiguration som är närmare jämvikt med

de rådande förhållandena. Eftersom vatteninnehållet är konstant blir avlagringen övermättad och kan flyta som en viskös vätska (Gillott 1987).

Förändringar av pH-värdet har direkta effekter på graden av flockbildningen och lösligheten av mineralkomponenterna (Bentley 1979). Men inverkan, på de reologiska egenskaperna, av förändringar av pH-värdet är liten i förhållande till inverkan av vattenmängden i lersuspensionen.

För ett ekvivalent flytindex tenderar mer grövre jord att ha högre viskositet (Locat 1992). Vid ungefär samma flytindex kan alltså flytspänningen variera med kornstorleken. Flockbildning av lermineralen resulterar i en ändring av kornstorleksfördelningen.

Figur 5.7 visar principiellt hur olika partikelkoncentrationer och olika partikelformer påverkar viskositeten i fluider.



Figur 5.7 Partikelkoncentrationens och partikelformens inverkan på de reologiska egenskaperna (efter Mork 1994).

Partiklarnas storlek och form påverkar i högsta grad de reologiska egenskaperna i en partikelsuspension. Normalt finns det flera partikelstorlekar i ett system så att fördelningen inverkar. Dessutom kan partikelfördelningen förändras över tiden vilket gör förloppet mycket reologiskt komplicerat. Det finns vissa optimala kornstorleksfördelningar som ger minimal eller maximal viskositet för samma mängd fasta partiklar.

Finkorniga partiklar har större specifik area än grovkorniga. Eftersom de kemiska reaktionerna vid stabilisering med kalk och cement i stor utsträckning är ytreaktioner med lermineral och vatten kan detta ha betydelse för stabiliseringsresultatet. Men eftersom molekylär diffusion är en långsam process är det mycket viktigt att de solida partiklarna är fullt dispergerade i blandningen.

Inom en rad tillämpningsområden används tillsatsmedel, vanligtvis reaktiva kemikalier, för att förändra de reologiska egenskaperna i syfte att underlätta eller effektivisera blandningsprocesser och hanteringen av blandningar. Exempel på sådana tillämpningar är blandning av gummi (Grossman 1997), betongtillverkning (Betonghandbok 1994) och industri där man blandar material i pulverform (Kaye 1997).

Vid tillsättning av bindemedel i lösa jordar kan tillsatsmedel t.ex. användas för att dispergera jorden för att på så sätt undvika klumpbildning. Jorden erhåller då en flytande karaktär. Vidare kan aggregatbildande tillsatsmedel användas för att skapa ett mer granulat material med reducerad flytspänning. Valet av tillsatsmedel beror av en rad faktorer men huvudsyftet är att undvika ett plastiskt tillstånd i blandningen.

5.3 Uppmätning av de reologiska egenskaperna

Kvantitativa uppmätningar av de reologiska egenskaperna i blandningar är en naturlig del av kvalitetskontroll, utveckling av blandningsredskap och forskning och utveckling av olika materialsammansättningar i industriella tillämpningar i processindustrin (Walters 1980). Reologiska mätmetoder har t.ex. bidragit till utvecklingen av injekteringsmedel och betongtyper (t.ex. Håkansson 1993, Mork 1994). Vad gäller lösa jordars reologiska egenskaper finns en mängd litteratur som beskriver sensitiva lerors reologiska egenskaper i ostört tillstånd och då speciellt vid långsamma deformationer (geoteknisk litteratur). Däremot har det inte utförts publicerade studier som behandlar lösa jordars reologiska egenskaper vid ostört eller delvis omrört tillstånd vid stora töjningshastigheter.

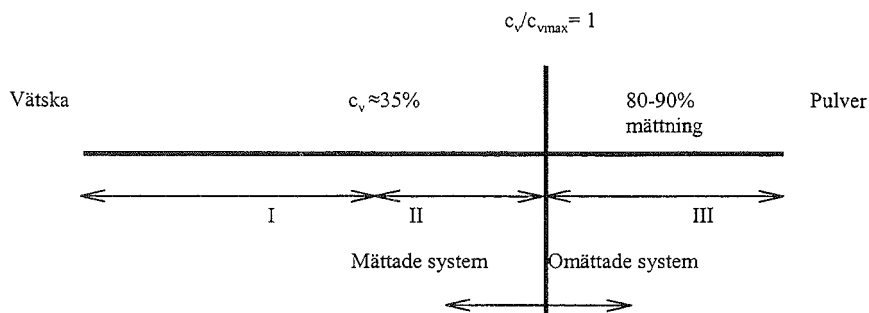
Partikelsuspensioner kan delas in i tre regioner enligt Mork (1994), Tabell 5.1. För att uppmäta de reologiska egenskaperna för respektive region används instrument enligt Tabell 5.2.

Tabell 5.1 Översikt över olika partikelsystem (efter Mork 1994).

Region I	Suspensioner med låg till medel koncentration. Kan bli behandlad som pseudohomogent
Region II	Flytegenskaperna regleras av packningseffekter. Suspensionerna kan uppvisa granulat- viskösa egenskaper
Region III	Omättade, kompressibla trefasmaterial. Viskometrar och reometrar kan ofta inte användas

Tabell 5.2 Använda instrument för olika områden (efter Mork 1994).

	Reologi	Geoteknik
Aktuell region	I + II	III (II)
Använda instrument	Viskometer Reometer	(1) Skjuvbox (2) Skjuvcell (3) Triaxialapparat



Figur 5.8 Klassificering av olika system utifrån partikelkoncentrationen, c_v (efter Mork 1994).

Figur 5.8 visar hur system skiftar från rena vätskesystem till pulversystem. Exempelvis så kommer cementpasta- och betongsystem in i område II och III. I område II kan systemet visa ett granulat- visköst beteende, d.v.s suspensionen uppför sig som en blandning av pulver och vätska, vilket leder till problem vid studier av de reologiska egenskaperna.

För att kunna studera de reologiska egenskaperna för system tillhörande grupp III används normalt triaxutrustning, skjuvbox o.d. Vid snabba deformationsförlopp uppkommer glidytor som följd av materialets visköst elastiska egenskaper, t.ex. enligt Figur 5.4.

Lersuspensioner har partikelkoncentrationer som medför att de i regel tillhör grupp II eller III, enligt Figur 5.8. Lersuspensioner har generellt icke-Newtonskt flödesbeteende. Vid vatteninnehåll över flytgränsen och vid fullt omrört tillstånd kan leror studeras med reologiska mätmetoder typ reometrar. Det är dock osäkert om data från sådana försök överensstämmer med lerors beteende i naturligt tillstånd.

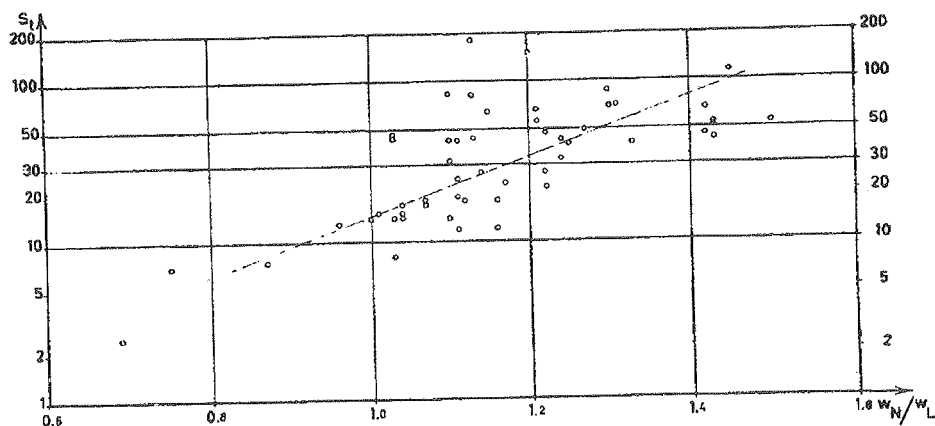
Kanadensiska forskare har studerat sensitiva lerors reologiska egenskaper (Locat & Demers 1988, Locat 1992, Coussot 1997). Forskningen har utförts i samband med studier av rasmaterial vid stora skred. Hastigheten hos skred kan vara i storleksordningen 10-20 m/s. Reologiska laborieförsök har utförts för att beskriva förhållanden mellan indexparametrar för jordar och deras flödesegenskaper. Försöken visar mycket intressanta förhållanden mellan viskositet, flytspänning, omrörd skjuvhållfasthet och flytindex. Dessa förhållanden är begränsade till leriga jordar med vattenkvoter över flytgränsen (flytindex >1). Sambanden kan användas för att t.ex. värdera rörligheten i slamflöden.

Det finns en linjär korrelation mellan den omrörda skjuvhållfastheten uppmätt genom konförsök och flytspänningen (Torrance 1987). En viskometer kan användas för att uppskatta omrörd leras skjuvhållfasthet under gränsen för konförsökets mätområde (1070 Pa). Begränsningen är att det linjära sambandet mellan den omrörda skjuvhållfastheten och flytspänningen måste bestämmas för varje material och förhållande.

Uppkomsten av glidytor när en lös jord utsätts för relativt snabba rörelser är en orsak till att det är svårt att utföra reologiska mätningar. En och samma jord kan ha en uppsättning av olika reologiska egenskaper beroende på graden av omrörning.

5.4 Reologiska egenskaper vid delvis omrört tillstånd

Effekten av full omrörning av en lera kan beskrivas med dess sensitivitet. Sensitiviteten definieras som förhållandet mellan skjuvhållfastheten i ostört och i fullt omrört tillstånd. Skjuvhållfastheten bestäms med enaxliga tryckförsök, vingsond eller konförsök. I princip alla normalkonsoliderade och lätt överkonsoliderade leror uppvisar sensitiva egenskaper (Gillott 1987).



Figur 5.9 Relationen mellan sensitiviteten och kvoten mellan den naturliga vattenkvoten och flytgränsen för ett antal varviga leror (Osterman 1965).

Söderblom (1974) presenterade ett förslag till ny klassificering av kvickleror. Bakgrunden var att det existerar kvickleror med olika mekaniska egenskaper, d.v.s. de uppför sig olika vid yttre mekanisk påverkan. Vanligtvis benämns leror som kvicklera när dess sensitivitet är större än 50. Söderblom menade att leror kan brytas ned mer eller mindre snabbt och att detta bör tas i beaktande vid klassificering av leror.

En approximativ klassificering av kvickleror i grupper med relativa tal togs fram, rapiditetstal. Långsam nedbrytning ger lågt rapiditetstal och snabb nedbrytning ett högt. För att bestämma rapiditetstalet för en lera använde Söderblom Casagrande flytgränsutrustning. Ett lerprov med höjden 40 mm och diametern 50 mm får falla 10 mm, 250 gånger. Lerprovet studeras okulärt och rapiditetstalet R_n bestäms utifrån en skala 1-10, där $R_n=1$ betyder att lerprovet ej visuellt påverkats av försöket och $R_n=10$ betyder att hela provet är omformat till en vätska. Rapiditetstalet bedöms alltså subjektivt och kan inte relateras till någon jordparameter.

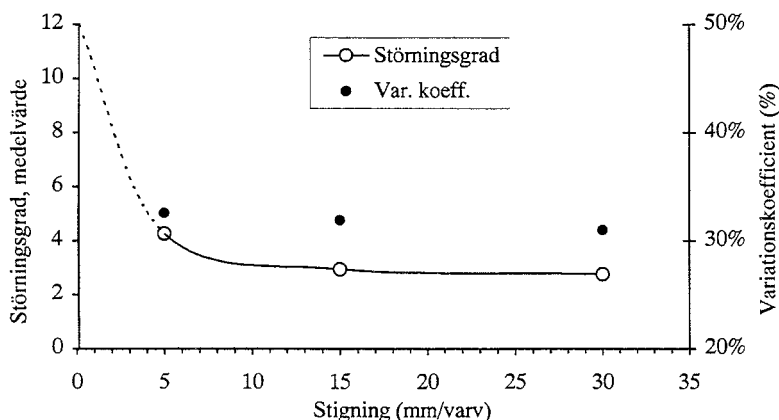
I samband med studier av jordrörelser orsakade av neddrivning av pålar uttryckte Massarsch (1976) reduktionen av skjuvhållfastheten vid partiell omrörning som störningsgraden, DR (disturbance ratio). Störningsgraden DR definieras som

$$DR = \frac{\tau_{\text{ostörd jord}}}{\tau_{\text{delvis omrörd jord}}} \quad (5.2)$$

där $\tau_{\text{störd jord}}$ är den odränerade skjuvhållfastheten i ostörd jord och $\tau_{\text{delvis omrörd jord}}$ är den odränerade skjuvhållfastheten i leran vid en viss grad av mekanisk störning. Massarsch (1976) rekommenderar användandet av störningsgraden DR vid analysen av pålningsproblem hellre än sensitiviteten.

Störningsgraden kan användas vid enklare reologiska studier av olika jordar och deras beteende beroende av inverkan av mekanisk påverkan, t.ex. olika grader av omrörning. Effektiviteten hos olika typer av blandningsverktyg kan studeras eftersom ett större blandningsarbete ökar störningsgraden i en jord. Det är t.ex. enkelt att utföra fallkonförsök eller vingförsök med miniatyrvinge, i samband med laboratorieförsök där jordar har utsatts för olika mängder av mekaniskt arbete.

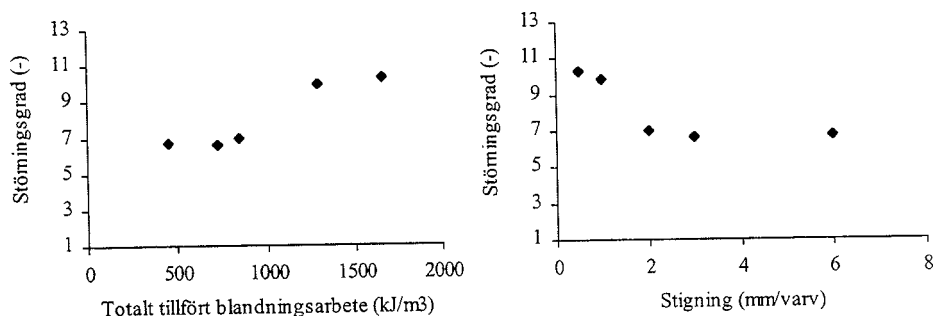
I Appendix B redovisas en studie av blandningsarbetets inverkan på blandningsgraden. I denna studie utfördes en serie försök där blandningsverktyget roterades med olika stigning i jorden utan att införa något bindemedel. Vingsonderingar med en fickvingsond med diametern 25 mm och höjden 50 mm utfördes över ett antal pelartvärnsnitt för att utvärdera den störningsgrad i jorden som blandningsverktyget åstadkommer. Försöken utfördes i en grå, något gyttjig lera som var sulfidfläckig. Denna jord hade mycket låg rapiditet vilket innebär att den är relativt okänslig för omrörning. Resultaten i Figur 5.10, visar att det är svårt att med dagens blandningsverktyg vid pelarstabilisering i Sverige, bryta upp jordens struktur och på så sätt förändra de reologiska förutsättningarna under blandningsprocessen. Trots ett relativt stort blandningsarbete, stigning 5 mm/varv, så var störningsgraden endast i storleksordning, DR= 4. Vid en fullt uppbruten struktur är störningsgraden, DR= 12-13, vilket motsvarar sensitiviteten för den aktuella jorden. Det krävs enligt denna studie ett betydligt större arbete för att jordens struktur skall brytas upp.



Figur 5.10 Störningsgraden och variationskoefficienten som funktion av stigningen hos ett blandningsverktyg (egna försök, Appendix B).

Studien av blandningsverktygets inverkan på störningsgraden, Appendix C, kompletterades med laborieförsök. I samband med en studie av blandningsarbetets inverkan på tryckhållfastheten (Larsson et al. 1999, Appendix C), utfördes en serie försök där jordprover blandades utan bindemedel. Studien utfördes med den utrustning och den jord som finns redovisad i Appendix C. Störningsgraden är uppmätt med konförsök och kan variera mellan 1 och sensitiviteten, vilken är uppmätt till 13 för den aktuella jorden. Den studerade jorden är en sulfidlera med vattenkvot 107 %, flytgräns 100 % och skjuvhållfasthet 14,7 kPa enligt konförsök. En mer detaljerad redovisning av studien är redovisad i Walter (1998).

Figur 5.11 visar resultaten från laborieförsöken och de visar också att det krävs ett omfattande blandningsarbete för att bryta upp strukturen i den studerade jorden. Resultaten visar dock att störningsgraden är i storleksordningen 7 vid ett relativt litet blandningsarbete.



Figur 5.11 Störningsgraden som funktion av tillfört blandningsarbete (egna försök).

5.5 Reologiska egenskaper vid inblandning av kalk och cement

Partikelsuspensioner är normalt mycket komplexa ur reologisk synpunkt. Solida partiklar av typ kalk och cement suspenderade i en lersuspension är ett gott exempel på ett mycket komplext system. Under blandningsförloppet vid pelarstabilisering påverkas dessutom de reologiska egenskaperna av kemiska reaktioner.

Det finns inga publicerade vetenskapligt utförda studier som behandlar de reologiska egenskaperna i en jord under blandningsprocessen av kalk och cement i samband med djupstabilisering med kalkcementpelare. Den kunskap som idag finns avseende de reologiska egenskaperna är av empirisk karaktär och allt för ofta i form av hörsägnar.

Nedan beskrivs mycket kortfattat de kemiska reaktionerna som sker då lösa jordar blandas med kalk respektive cement och hur de kan påverka de reologiska egenskaperna i blandningen.

Inblandning med kalk

Kalk började användas för över 5000 år sedan för att stabilisera jord (Greaves 1996). Utvecklingen av tekniken ytstabilisering tog dock fart på 1940-talet i USA och används sedan dess i stor omfattning, spec. i samband med vägbyggnad. Användandet av kalk vid olika typer av grundläggningstekniker finns beskrivna av bl.a. Rogers & Glendinning (1996), Sherwood 1993 och British Lime Association (1990).

Mängder av artiklar har behandlat de kemiska reaktionerna och egenskaper vid inblandning av kalk i jord. Nyligen utförda sammanställningar av dessa arbeten är bl.a. Locat et al. (1990), Bell (1988), Sherwood (1993), West & Carder (1997). De kemiska reaktionerna som sker är

- 1 Jonbyten
- 2 Flockbildning och aggregatbildning
- 3 Karbonatisering
- 4 Pozzolana reaktioner

De två första reaktionerna leder till en omedelbar förändring av jordens plasticitet och kan ha en betydande inverkan på de reologiska egenskaperna under det mekaniska blandningsskedet. När osläckt kalk, CaO , blandas med en jord, tar kalken upp fukt från jorden och bildar kalciumhydroxid, Ca(OH)_2 . Eftersom kalken tar upp 32 g vatten för varje kilo kalk reduceras vattenkvoten i jorden. Den värme som utvecklas under denna reaktion kan också påverka blandningsförloppet.

Den lösta kalciumhydroxiden är sedan tillgänglig för jonbyten med joner i lermineralen (Na^+ , K^+ , H^+). Jonbytet leder till att lermineralen flockas och plasticitetsgränsen ökar. Beroende på den initiala vattenkvoten i jorden kan jordens egenskaper förändras dramatiskt.

Vid blandning faller inte kohesiva lösa jordar sönder i elementära partiklar såsom granulata material. Istället formas skikt eller klumpar av jord vars storlek beror på blandningsprocessens effektivitet. Inom tillämpningsområdet ytstabilisering är det väl känt att det är svårt att blanda kalk och cement med lösa plastiska jordar (Petry & Wohlgemuth 1988). Vid inblandning av kalk förändras strukturen till en mer granulat struktur. Den omedelbara struktumvandlingen hos klumparna är dock lokaliserad till ytan på klumparna (Lindh & Ydrevik 1978). Leran tenderar att röras ihop till kulor (pellets) som är belagda med bindemedel och det kan vara svårt att bryta upp denna struktur. En studie utförd av Van Ganse (1974), visar med laboratorieförsök, att de första reaktionerna sker mycket snabbt, för laboratorieinblandade prover, inom loppet av några få minuter efter inblandning. En annan intressant iakttagelse från denna studie är att de bildade kalk- jord klumparna bibehåller sin form i stor utsträckning när sedan blandningen knådas och packas. En aggregatbildande effekt leder till att jorden kan ta upp mer vatten vilket också kan leda till att blandningen blir ineffektiv men också fördelaktig avseende packning. Effekten beror av den initiala vattenkvoten i jorden.

Det är svårt att blanda torrskorpelera med kalk på ett effektivt sätt. Erfarenheter från ytstabilisering är att vid inblandning bryts torrskorpeleran sönder i stora, hårda klumpar som är mycket svåra att sönderdela (Lindh 1977). Endast i samverkan med tillfört vatten är det möjligt att sönderdela lerklumparna.

Inblandning med cement

Cement har en mycket positiv effekt främst avseende hållfasthetstillväxten i lösa jordar och har därför börjat användas mer och mer i samband med t.ex. ytstabilisering och pelarstabilisering. Användandet av cement i samband med ytstabilisering finns beskrivna av bl.a. Sherwood 1993 och Portland Cement Association (1990).

På samma sätt som för stabilisering av jordar med kalk har det publicerats mängder av artiklar som behandlar de kemiska reaktionerna och egenskaper vid inblandning av cement i jord. Nyligen utförda sammanställningar av dessa arbeten är bl.a. Petry & Wohlgemuth (1988), Sherwood et al. (1993). Det är främst två processer som sker när cement blandas in i en lös jord. Den primära processen är hydratisering av cement som leder till att jorden hårdnar. Cementpartiklarna binder samman de angränsande jordklumparna och bildar ett mer eller mindre kontinuerligt skelett av hårt material som omgärdar en matris av oförändrad jord. Vid hydratation av cement bildas kalciumhydroxid och kalciumjonerna reagerar med lermineralen. Vid denna sekundära process bildas också hårdnande material.

De kemiska reaktionerna som sker då cement blandas in i jord är inte alls lika snabba som när osläckt kalk blandas in i jord. Cementen antas därför inte drastiskt påverka de reologiska egenskaperna under blandningsprocessen. Cementpartiklarna påverkar dock de reologiska egenskaperna på så sätt att det är ett torrt pulver som blandas med jorden och därmed ökar partikelkoncentrationen. Blandningsresultatet är således mycket beroende av hur blandningsprocessen lyckas bryta upp jordens struktur och fördela cementet.

Vid ytstabilisering där man vill stabilisera leriga jordar med cement är det lämpligt att före cementstabiliseringen blanda in 1,5-2,5 % kalk (Cementa 1973). Detta gör man eftersom det är svårt att sönderdela leriga jordar i erforderlig utsträckning på arbetsplatsen. Med en inblandning med kalk får jorden en kornig struktur och kan sönderdelas lättare med en mindre maskininsats. Nackdelen med denna metod är att den medför två separata iblandningsmoment och därmed ett fördyrat arbete.

6. Pelarstabilisering

6.1 Inledning

Djupstabilisering med kalkcementpelare eller pelarstabilisering är en metod där binde- medel ofta i form av kalk och/eller cement blandas in mekaniskt i en jord. En rad olika metoder har utvecklats i världen och idag går de under det samlade namnet "The deep mixing method" (t.ex. Terashi 1998, Porbaha 1998). I föreliggande rapport används namnet pelarstabilisering som ett svenskt samlingsnamn för de olika metoderna. Den mekaniska blandningen sker i regel med roterande blandningsverktyg bestående av paddlar eller skruvar. Bindemedlet är i pulverform eller förblandat med vatten (eng. slurry). I regel formas pelare i jorden som har bättre hållfasthets- och deformationsegenskaper än den om- givande orörda jorden.

I föreliggande kapitel förs en diskussion kring dagens blandningsförfarande med utgångspunkt från den uppdelning som görs i Figur 6.1. Diskussionen utgår från den metod som främst används i de skandinaviska länderna och går under namnen kalk-, kalk/cement- eller cementpelare. De olika delprocesserna i blandningsprocessen beskrivs och diskuteras. Vidare förs en diskussion kring de faktorer som påverkar blandningsprocessen. Ett antal blandningsverktyg som används i främst Japan och Sverige diskuteras under ett separat avsnitt. Slutligen diskuteras några karakteristiska defekter som uppkommer i pelare p.g.a. blandningsprocessen.

6.2 Kort historik

Första gången metoden presenterades internationellt var 1975, då två artiklar var in- skickade till samma konferens. Den ena kom från Sverige, Broms & Boman (1975) och den andra kom från Japan, Okumura & Terashi (1975). Metoden hade utvecklats parallellt i de två länderna (Okumura 1997). De första tidskriftsartiklarna publicerades av Broms & Boman (1977 och 1979) och behandlade applikationer, egenskaper och design.

Under initiativ av vägingenjören Kjell Paus utvecklades från 1967 kalkpelarmetoden i Sverige. Metoden gick ut på att in situ blanda jorden med osläckt kalk och på så sätt erhålla pelare av hårdnande kohesionsmaterial (Boman & Broms 1975). Bindemedel studerades genom laborieförsök utförda på Statens geotekniska institut (SGI) och efter utformning av ett lämpligt installationsförfarande installerades provpelare på SGI's provfält vid Skå- Edeby. Den första utrustningen bestod av en borrhög som monterats på en Volvo- traktor, Figur 6.22a. Antalet projekt som utfördes i de skandinaviska länderna var relativt få fram till slutet av 1980-talet då utvecklingen av maskiner tog fart på allvar i de Nordiska länderna. Utvecklingen den utrustning som används i de skandinaviska länderna är utför- ligt beskriven av Bredenberg (1999).

Parallellt med den svenska utvecklingen av metoden utfördes från 1967 forskning och utveckling i Japan i form av laboratorieförsök och modellförsök (Schaefer et al. 1997). Försöken utfördes av "Port and Harbor Institute of the Japanese Ministry of Transportation" i syfte att utveckla en metod för djupstabilisering av marina leror under havsbotten. I Japan har det varit en enorm utveckling av utbyggnaden av nya landområden genom att fylla upp havsbotten med fyllnadsmassor. Det första projektet utfördes 1974 i Japan och det var då kalkpelare som installerades. I Japan utvecklades också "den våta metoden" vilket innebär att bindemedlet, oftast cement, förblandas med vatten och blandas i jorden i vätskeform. 1975 utfördes det första projektet med "den våta metoden" (Kawasaki et al. 1981) och 1977 etablerades "CDM Association" för att koordinera utvecklingen av metoden genom ett samarbete mellan industrin och forskningsinstitut.

1976 startade utveckling och forskning på djupstabilisering där torrt cementpulver används som bindemedel. 1981 utfördes det första projektet (Schaefer et al. 1997). 1980 utvecklades tekniken med osläckt kalk i pulverform som bindemedel. Utvecklingen utfördes av "Ministry of Construction" (Terashi 1998). Metoden var mycket lik den svenska kalkpelarmetoden.

Pelastabilisering var en mycket framgångsrik metod i Japan och under 1980-talet utfördes omfattande forskning och utveckling i form av laboratorie- och fältförsök. Detta medförde att metoden fick en snabb utveckling och ett relativt stort antal organisationer och företag har utvecklat egna blandningsprocesser vilket har lett till att installations-tekniken varierar.

Enligt Bruce et al. (1998a, 1998b) kommer orginalkonceptet för metoden från USA, där man 1954 använde en enkel skruv för att blanda bindemedel i Jorden. Handy & Williams (1967) redogjorde för resultat från en stabilisering av lös jord efter ett skred i Iowa, USA, "the Aurora Avenue landslide". Fem hundra borrarade hål med diametern 150 mm fylldes med osläckt kalk och vatten. Redan 1960 användes dock en liknande metod i Oklahoma där man i samband med ett motorvägsprojekt fyllde borrarade hål (ϕ 230 mm) med släckt kalk och vatten (Handy & Williams 1967). Metoden fick dock sin nuvarande utformning från utvecklingen i Japan och Sverige. 1986 återintroducerades metoden med en Japansk teknik (Bruce 1996) och sedan 1997 finns den svenska tekniken representerad i USA (Bruce et al. 1998).

Utveckling av metoden har också skett i Italien och England (Paviani & Pagotto 1991, Harnan 1993). En översikt över olika tekniker världen över är sammanställd av Bruce et al. (1998b, 1999).

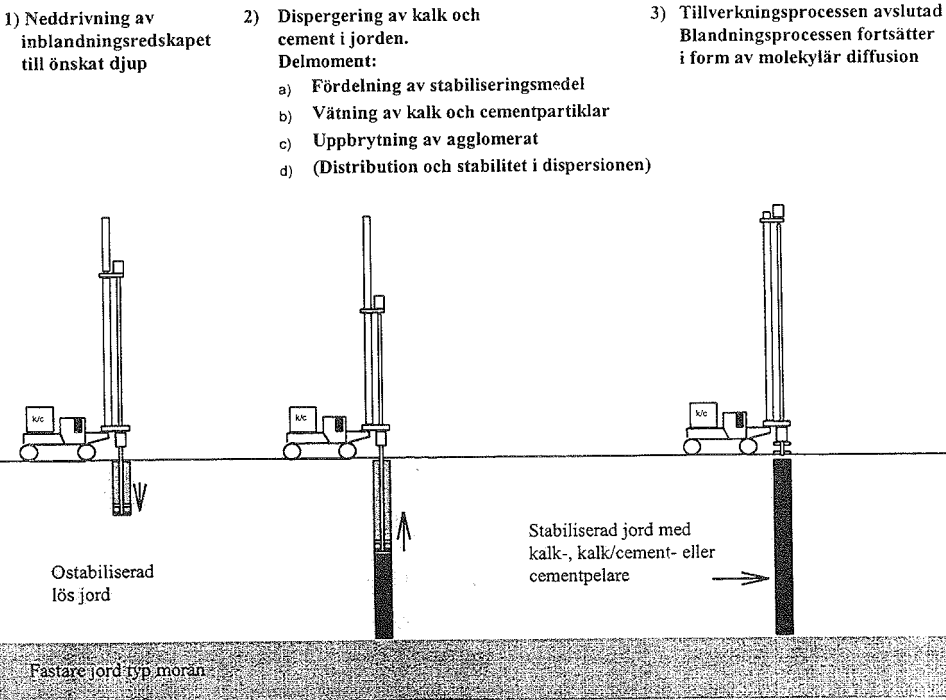
6.3 Blandningsprocessen

Blandningsprocessen vid pelastabilisering är mycket komplex med många olika moment och en mängd faktorer som påverkar processen och dess resultat. Det är svårt att helt särskilja de olika mekanismerna vid blandningsprocessen, men det är viktigt att förstå hur de olika mekanismerna påverkar varandra.

Syftet med blandningsprocessen är att dispergera bindemedlet i jorden på ett sådant sätt att de kemiska reaktionerna i jorden kan ske under så goda förutsättningar som möjligt. För att allt bindemedel aktivt skall verka till att stabilisera jorden måste alla partiklar i bindemedlet vara jämnt dispergerat i hela pelarvolymen. Vidare bör bindemedlet vara jämnt fördelat över pelartvårsnittet så att spridningen avseende hållfasthets- och deformationsegenskaperna inte blir för stor. En stor spridning försvårar inte bara förutsägelser från laboratorieförsök utan också den produktionsmässiga kontrollen. Effekten kan bli att "man tappar kontrollen över processen och dess resultat".

Tillverkningsprocessen vid pelarstabilisering illustreras översiktligt i Figur 6.1. Blandningsprocessen kan delas in i tre huvudsakliga delmoment:

- 1) Neddrivning av blandningsverktyget till önskat djup.
- 2) Dispergering av bindemedlet.
- 3) Molekylär diffusion.



Figur 6.1 Blandningsprocessen vid pelarstabilisering.

Neddrivning av blandningsverktyget

Under det första skedet av blandningsprocessen roteras blandningsverktyget ned i jorden till önskat djup. Neddrivningsprocessen kan utföras på ett sådant sätt att jordens struktur bryts ned till en sådan grad att förutsättningarna för efterföljande moment i blandningsprocessen påverkas. En fullt uppbruten struktur i jorden kan påverka de verksamma blandningsmekanismerna positivt eftersom det då är lättare att skapa de rörelser i jorden som är en förutsättning för blandning av materialen. De blandningsmekanismer som kan påverkas är:

- a) Molekylär diffusion. En uppbyggnad av lerans struktur gör lermineralen och vätskefasen mer åtkomliga för kemiska reaktioner.
- b) Laminär blandning. Förutsättningarna för laminär skjuvning förbättras i och med att lersuspensionens elastiska motstånd reduceras. Laminär skjuvning är en bra blandningsmekanism för uppbyggnad av agglomerat och underlättar molekylär diffusion.

Vid dagens blandningsförfarande är det stor risk att en stor andel av den energi som används under dispersionsprocessen åtgår till att bryta upp lerans struktur. Laminär blandning fungerar troligtvis sämre då lersuspensionen kan motstå deformation genom elastiskt motstånd och hög flytspänning.

Det är dock osäkert om en fullt uppbruten struktur i jorden medför enbart positiva effekter för hållfasthetstillväxten. En fullt uppbruten struktur i kombination med låg blandningsgrad (stora koncentrationsvarianser) kan leda till att jordens låga skjuvhållfasthet i relativt stora skikt/klumpar har negativ inverkan på pelarens totala hållfasthetsegenskaper.

Dagens blandningsredskap har paddlar som i regel har en liten vinkel mot horisontalplanet. Detta medför att neddrivningen av redskapen går enkelt, d.v.s det åtgår lite energi för att skruva ned redskapet. Konsekvensen är naturligtvis den att det också tillförs relativt lite energi till nedbrytningsprocessen av jorden. För att åstadkomma de erforderliga skjuvkrafter som krävs för en nedbrytning av jordens struktur erfordras en rörelse i materialet. Stora töjningshastigheter kan skapas runt paddlarna genom att öka deras vinkel mot horisontalplanet så att jorden tvingas i rörelse, ”knådas”, både i axiell- och tangentiell riktning runt paddlarna. Höga rotationshastigheter kan vara gynnsamma för nedbrytningsprocessen. Men det kan vara svårt att rotera redskapet med höga hastigheter då paddlar med stor vinkel mot horisontalplanet används eftersom motståndet och därmed skjuvkrafterna ökar. Man kan också öka antalet skjuvzoner genom att t.ex. borra hål i paddlarna, använda fler paddlar, skränka bladen eller utforma redskapet som en raka (med tänder).

En viktig frågeställning är om ett ökat omrörningsarbete vid neddrivningen av blandningsverktyget verkligen resulterar i bättre förutsättningar för blandningsprocessen kontra den kostnadsökning detta kan medföra. Det är idag osäkert hur mycket omrörningsarbetet vid neddrivningen påverkar blandningsresultatet i förhållande till andra faktorer. Idag drivs redskapet ned normalt med 100 mm/varv och det är tveksamt om jordens

struktur påverkas nämnvärt. Det är dessutom tveksamt om det är ekonomiskt att bryta upp jordens struktur innan bindemedlet tillförs.

Dispersionsprocessen

Processen där bindemedlet dispergeras i jorden kan delas upp i fyra steg (Parfitt & Barnes 1992):

- a) Inblandning och fördelning av bindemedel
- b) Vätning av de solida partiklarna
- c) Uppbrytning av agglomerat
- d) Distribution

I praktiken överlappar dessa skeden varandra och det kan därför vara svårt att särskilja skedena genom visuella observationer.

a) Inblandning och fördelning av bindemedlet

Det är mycket viktigt att utforma blandningsredskap på ett sådant sätt att bindemedlet fördelas på ett så bra sätt som möjligt över hela tvärsnittet under inblandningsskedet. På så sätt undviks stora koncentrationsvarianser, uppbyggnaden av agglomerat underlättas och långa blandningstider undviks eftersom fördelning och distribution av bindemedel sker under samma process. En effekt av de komplexa reologiska egenskaperna i en lersuspension är att det är svårt att på kort tid, fördela ett bindemedel över ett pelartvärsnitt genom mekanisk blandning, se Figur 5.6. Det är därför viktigt att bindemedlet fördelas jämnt över tvärsnittet i ett tidigt skede under blandningsprocessen.

I de skandinaviska länderna används främst bindemedel i pulverform som distribueras från tankar, via slangar, ned till blandningsverktyget, med tryckluft som bärande medium. Bindemedlet blåses ut genom ett hål i Kellystången alldeles ovanför blandningsverktyget, vanligtvis såsom Figur 6.20 visar. Bindemedlet fördelas genom de kaviteter som bildas i jorden av pneumatisk spräckning samt till viss del i de kaviteter som bildas av blandningsredskapet då det roterar i jorden. Storleken och formen på dessa kaviteter som bildas beror bl.a. av lufttrycket, spänningsförhållandet i jorden, de reologiska egenskaperna hos jorden och bindemedlet, blandningsverktygets geometriska utformning samt blandningens intensitet. För att undvika stora agglomerat (klumpar med svaga bindningar) och ansamlingar av bindemedel är det mycket viktigt att bindemedlet fördelas jämt över hela pelarsektionen under detta skede av Blandningsprocessen.

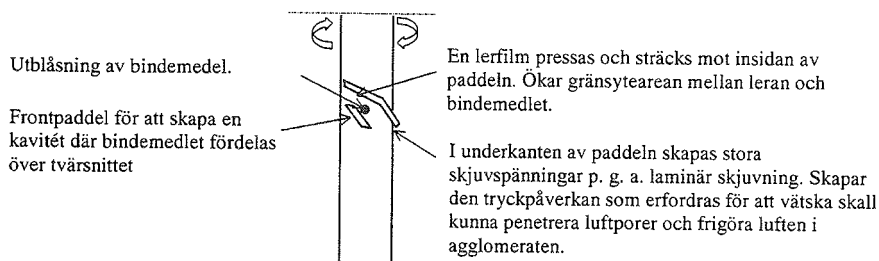
Inblandning och fördelning av bindemedlet med lufttryck är i sig en blandningsmekanism eftersom relativa rörelser mellan jorden och bindemedlet skapas. En relativt stor energimängd tillförs då lufttrycket spräcker upp jorden. Tyvärr är kunskapen angående denna blandningsmekanism mycket begränsad. Det finns ett stort behov av att öka denna kunskap eftersom denna blandningsmekanism är signifikant för blandningsprocessen. Om bindemedlet sprids jämnt över tvärsnittet direkt vid inblandningen så har blandningsverktyget som främsta uppgift att bryta upp de agglomerat som bildas. Risker för att blandningsverktyget inte klarar av att distribuera bindemedlet minskar.

b) Vätning av de solida partiklarna

När ett bindemedel i pulverform blandas med en jord, innehåller pulverklumparna innesluten luft som måste ersättas med vätska. Vid t.ex. kalk- och cementreaktioner dras vätska från omgivande jord genom diffusion. För att inte luften skall förbli innesluten måste mekaniskt arbete tillföras, men det kan vara svårt, även med mekanisk hjälp, att frigöra luft om agglomerat eller aggregat har formats. Vättningsprocessen gynnas av blandningsredskap som åstadkommer stora tryck- och skjuvspänningar i jorden.

Vättningsprocessen kan inte ske spontant eftersom kalk- och cementpartiklarna inte har tillräckligt hög densitet för att sjunka ned i lersuspensionen. En hög partikelkoncentration, en komplex fördelning, luft som komponent och kemiska reaktioner under blandningsprocessen leder till att blandningen har extremt komplexa egenskaper. Som tidigare nämnts i Kapitel 2.6 så påverkas vättningsprocessen bl.a. av vätskefasens egenskaper, ytans karaktär, agglomeratens intermediära dimensioner och det mekaniska systemets tryckpåverkan på komponenterna. Lerans reologiska egenskaper (bl.a. lerhalt och vattenmängd) har stor betydelse för vättningsprocessen. En fullt nedbruten struktur i leran frigör vatten som kan väta kalk och cementpartiklarna. Dessutom får lermineralen en större aktiv gränsytearea mot stabiliseringsmedlet som är gynnsamt för molekylär diffusion.

I Figur 6.2 visas en principiell utformning av en paddel på ett blandningsverktyg som är utformad så att en lerfilm pressas mot insidan på paddeln där också stabiliseringsmedlet kommer i kontakt med jorden. Principen är hämtad från redskap som är speciellt utformade för att väta solida partiklar, se Figur 3.6. Bindemedlet fördelas längs tvärsnittet i en kavitet som skapas av en frontpaddel. I samband med att lerfilmen sträcks längs bladet ökar gränsytearean mellan de blandade komponenterna. Under paddeln skapas stora skjuvspänningar och rörelser i materialen som ger den tryckpåverkan som erfordras för att vätska skall kunna penetrera luftporer och frigöra luften i agglomeraten.



Figur 6.2 Principutformning av paddel på blandningsredskap där bindemedlet vätas mot en lerfilm.

Vid djupstabilisering, särskilt i jordar med vattenkvoter under flytgränsen (flytindex < 1), kan vättningsproblem tillsammans med bristfällig mekanisk blandning leda till klumpbildning med innesluten luft i pelarna. Ett sätt att då undvika luft och effektivisera

vättningsprocessen är att förblanda stabiliseringsmedlet med vatten, d.v.s. utföra blandningen i två steg. Metoden går under namnet "den våta metoden" där främst cement förblandas med vatten till ett cementslam. Vid tillämpningar där funktionen kräver hög nivå på likformighet avseende blandningsgrad och där flytindex är lägre än 1, kan det vara lämpligt att använda "den våta metoden".

Vid stabilisering av lösa jordar med flytindex över 1, kan "den våta metoden" påverka blandningsprocessen negativt eftersom klumpar eller delar av jordmaterialet dras runt i blandningen utan att nämnvärt påverkas av blandningsredskapet. Det är då viktigt att utforma redskap som åstadkommer rörelser med hög intensitet, gärna turbulenta rörelser.

Vättningsprocessen är nära kopplad till packningsprocessen av blandningen av jord och bindemedel. Då luft blandas in i jorden blir blandningsverktygets förmåga att packa blandningen allt viktigare. Packningsprocessens inverkan på blandningsprocessen diskuteras i slutet av Kapitel 6.4.

c) Uppbrytning av agglomerat

Då bindemedlet är inblandat, fördelat och partiklarna är vätade bör de bildade agglomeraten brytas upp innan de kemiska reaktionerna kommer igång. Om inte partiklarna är jämnt dispergerade i blandningen bildas stora aggregat med koncentrationsvarianser och dålig blandningskvalitet som följd. Om inte partiklarna är dispergerade kommer heller inte alla partiklar i stabiliseringsmedlet att fullständigt medverka till en jämn hållfasthetstillväxt i hela den stabiliserade volymen.

Agglomerat bryts upp genom att skjuva jorden eller genom att skapa stora tryckkrafter. För att åstadkomma tillräckligt stora skjuv- eller tryckkrafter måste blandningen sättas i rörelse. För att säkerställa en god uppbyggnad av agglomerat då blandningen har egenskaper liknande en deg, bör redskap användas som arbetar som knådare eller kvarnar, enligt erfarenheter från processindustrin. För att skapa knådande effekter i blandningen kan man använda paddlar med en relativt stor vinkel mot horisontalplanet, $\approx 45^\circ$. Paddeln åstadkommer då rörelser både i tangentiell- och axiell riktning. Det är fördelaktigt att skapa rörelser i flera riktningar eftersom leriga jordar har visköst elastiska egenskaper. Det finns då en risk att blandningsredskapet endast skapar rörelser i direkt anslutning till bladen, d.v.s. jorden "flyter" i ett tunt skjuvplan nära redskapet enligt Figur 5.6.

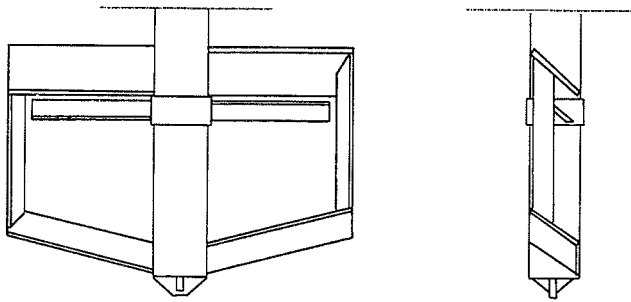
Beroende på de reologiska egenskaperna i jorden och de verksamma blandningsmekanismerna, beror effektiviteten i dispersionsprocessen främst av följande två faktorer:

- 1) Den effektiva töjningen i blandningen. Denna faktor kan uttryckas som funktion av antalet rotationer (varv/m) eller stigningen (mm/varv) hos blandningsverktyget.
- 2) Intensiteten i blandningen, agitationen. Denna faktor kan uttryckas som en funktion av blandningsverktygets rotationshastighet (varv/min).

En hypotes i sammanhanget är att då intensiteten i blandningen är tillräckligt stor för att bryta upp agglomerat är det den effektiva töjningen som är mest signifikant för en bättre blandningskvalitet. Då intensiteten i blandningen är för låg för att bryta upp agglomerat så har den effektiva töjningen föga betydelse eftersom agglomeraten bara flyttas runt. Enligt

denna hypotes är det jordens reologi som avgör huruvida stigningen och rotationshastigheten inverkar på processen.

För att skapa erforderliga rörelser och skjuvspänningar i blandningen kan redskapen utformas som ankarblandare med två uppsättningar armar som opererar i olika riktningar eller kombinera ankarblandaren med paddlar som också opererar i olika riktningar, Figur 3.9 och 3.10. Ett sådant redskap skulle principiellt kunna utformas som i Figur 6.3. För att skapa stora skjuvspänningar i materialen kan man utforma redskapet så att de olika paddlarna roterar med olika hastigheter. Den mindre paddeln i figuren roteras då med en högre hastighet (högre töjningshastighet ger större skjuvspänningar i en suspension med viskösa egenskaper). Redskapet åstadkommer både stora skjuvspänningar och rörelse så att materialen kan omformas mellan skjuvningarna. De rådande blandningsmekanismerna är då främst laminär skjuvning och distributiv blandning.



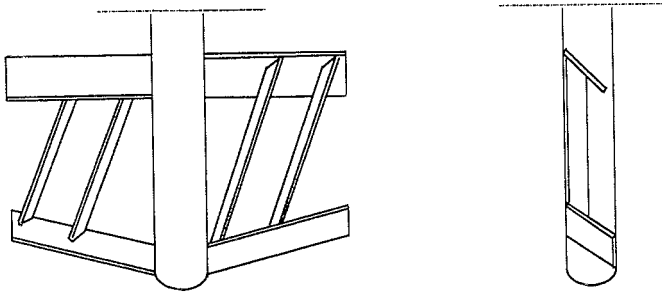
Figur 6.3 Principiell utformning av blandningsredskap där en ankarblandare kombineras med en paddel som opererar i motsatt riktning.

Då en fullt omrörd lös jord har flytindex >1 , kan vid gynnsamma förutsättningar turbulent strömning skapas i blandningen. Turbulenta strömningar ger god cirkulation och stora skjuvkrafter. Om det viskösa motståndet är litet i flödet går större andel av blandningsarbetet till uppbrytning av agglomerat. För att skapa turbulenta strömningar erfordras relativt höga rotationshastigheter. Vid låga rotationshastigheter finns risk att blandningsredskapet enbart flyttar runt agglomeraten utan att bryta upp dem.

I kapitel 5 diskuterades svårigheterna att åstadkomma rörelser i material med visköst elastiska egenskaper p.g.a. att intermediära krafter snabbt dör ut runt ett blandningsredskap. Redskapet skapar ingen nämnvärd rörelse i materialen och effekten blir att det solida tillsatta materialet lägger sig som skikt i jorden om blandningstiden är för kort. Det är alltså viktigt att utforma blandningsredskap på ett sådant sätt att materialen tvingas i rörelse och att laminär blandning uppkommer i en erforderlig volym runt redskapet. Då en paddel på blandningsredskapet har en liten vinkel mot horisontalplanet kan man förvänta sig att redskapet "skär igenom" leran utan att sätta en nämnvärd volym i rörelse. Risken att

dessa verktyg utför ett sämre blandningsarbete är alltså speciellt stor då vattenkvoten är runt flytgränsen och jorden har plastiska egenskaper eller då lerans struktur inte är tillräckligt nedbruten.

Vid en process när agglomerat bryts upp behöver flödeselementen omformera sig mellan varje omgång de utsätts för skjuvning. I ett turbulent flöde är detta inget problem eftersom flödeselementen befinner sig i en slumpartad rörelse i ständigt olika rörelseriktningar. I ett jordmaterial med visköst elastiska egenskaper kan flödeselementen få svårt att omformera sig om rörelsen i blandningen är begränsad. Ett sätt att kringgå detta problem är att utsätta blandningen för kontinuerligt varierande skjuvriktningar där efterkommande skjuvpåverkan sker i ett annat plan än det föregående. Ett exempel på hur ett sådant redskap principiellt kan utformas visas i Figur 6.4. Detta redskap är också så utformat att bladen växelvis skapar inåt- och utåtgående rörelse i flödet från redskapsaxeln.



Figur 6.4 Principiell utformning av blandningsredskap som kontinuerligt skapar skjuvning i olika plan.

Om paddlarna förses med tänder erhålls också skjuvning i flera plan. Tänderna underlättar också penetreringen av torrskorpan under neddrivningsskedet. Ett ytterligare sätt att åstadkomma fördelaktig skjuvning är att utforma paddlarna med hål för att erhålla extensionellt flöde där den skjuvande förmågan ökar.

d) Distribution

Distribution är den process då de uppbrutna agglomeraten slumpvis distribueras ut i blandningen. Denna process sker normalt samtidigt som föregående process.

Om inte bindemedlet fördelas i tillräcklig omfattning under de föregående stegen i processen kan man förvänta sig långa blandningstider eftersom det är svårt att åstadkomma rörelser i alla typer av jordar. Distributionen av bindemedel gynnas av att jorden är fullt uppbruten, har hög vattenkvot och låg viskositet och fungerar endast då blandningsverktyg används som kan åstadkomma stora rörelser i jorden.

Molekylär diffusion

Då tillverkningsprocessen är avslutad och pelaren är installerad i jorden, fortsätter blandningsprocessen som molekylär diffusion. Då det existerar koncentrationsvarianser i en annars likformig massa i lösningsform, tenderar dessa varianser att minska med tiden för att slutligen försvinna. I ett homogent system måste denna process, som kallas diffusion, slutligen få till stånd likformighet i koncentrationer av olika material i hela systemet.

De idag vanligaste bindemedlen, kalk och cement, har olika egenskaper avseende molekylär diffusion. Då kalk reagerar med vatten bildas kalciumhydroxid som i löst tillstånd förbättrar blandningsgraden genom diffusion. Cement däremot reagerar med vatten och bildar hårdnande produkter som fyller porerna mellan jordens partiklar. Molekylär diffusion är en mindre signifikant blandningsmekanism för cement och detta leder till att cement erfordrar en högre grad av dispersion än kalk. Petry & Wohlgemuth (1988) skriver att cement inte är lämpligt bindemedel för lösa plastiska jordar vid ytstabilisering om inte blandningskvalitén är mycket god.

Diffusionen av kalcium från pelaren ut i den ostabiliserade jorden eller från delar av pelaren med hög koncentration av kalk ut i klumpar av jord med lägre koncentration i pelaren beror av vattenkvoten, mineralhalten, permeabiliteten, lerhalten samt portalet (Thompson 1966).

Mekanismen molekylär diffusion av kalkjoner i jord påvisades och diskuterades i tidsskrift så tidigt som 1939 av Jenny & Overstreet (1939). Forskningen tog dock fart först under 1960- talet då kalkstabilisering började användas allt oftare i samband med ytstabilisering av terrasser vid vägbyggnation. Den kanske mest omfattande studien från den tiden är Davidson et al. (1965). Trots att en mängd studier publicerats sedan 1960- talet är det idag oklart hur molekylär diffusion fungerar som blandningsmekanism och hur stor inverkan den har i samband med djupstabilisering med kalkcementpelare. Nedan redovisas en översikt av några av de studier som utförts avseende molekylär diffusion av kalk i lös jord.

Shen, Miura & Koga (1997) presenterade resultat från analyser från prover tagna i den lösa jorden mittemellan installerade cementpelare (den våta metoden, 140kg/m^3). Pelarna hade diameter 1140 mm och var installerade i ett rutnät med sidan 1500 mm. Resultaten visade att den störning i jorden som åstadkoms av installationsprocessen snabbt återhämtar sig p.g.a. diffusion av katjoner. En månad efter installation hade den omgivande jorden en något högre hållfasthet än den ursprungliga jorden. Vid pelarstabilisering i lös jord uppkommer vertikala sprickor i jorden. Detta kan förklaras med att ett porövertryck som skapas i den omgivande jorden orsakad av lateralt tryck från injektionen av bindemedel samt den skjuvning av jorden som blandningsverktyget åstadkommer (Shen & Miura 1999). Dessa sprickor bildar kanaler för bindemedlet att migrera och kan vara en förklaring till att man kan uppmäta en förhöjd koncentration av katjoner långt ut i den omgivande ostabiliserade jorden.

Mathew & Narasimha Rao (1997) studerade diffusionen av kalciumjoner i en marin lera från Indien med flytgräns och pasticitetsgräns på 63 resp. 22 %. Studien utfördes i laboratorie där osläckt kalk fylldes i hål med diameter 50 mm. Pelare installerades i rutnät med inbördes avstånd 400 mm. pH-mätningar samt uppmätning av kalkhalten i punkter mitt mellan pelarna visade att kalk hade migrerat över hela jordvolymen. På 60 dagar hade kalciumoxidhalten ökat från 1 % till 2,5 %. pH-värdet hade ökat från 7,5 till 10.

Rajasekaran & Narasimha Rao (1996 & 1997) och Narasimha Rao & Rajasekaran (1996) studerade diffusionen av kalk från en centriskt placerad kalkpelare (hål fyllt med osläckt kalk) med diametern 50 mm i en tank med diametern 600 mm. En marin lera från Indien användes med flytgräns och plasticitetsgräns på 85 resp. 53 %. Kalciumhalten i jorden var 0,2 %. Kalciumhalten, 45 dygn efter installation, varierade från ett medelvärde på 2,5 %, 25 mm utanför pelaren, till 1,65 % på ett avstånd motsvarande 5 gånger pelardiametern. Författarna drar slutsatsen att hållfasthets- och deformationsegenskaperna förbättrades över ett radiellt avstånd på 4 till 6 gånger pelardiametern.

I samband med studier av kalkpelares lämplighet att stabilisera slänter i England har Rogers & Glendinning (1994) presenterat resultat från laboratoriestudier av diffusion av kalk i "lower Lias clay". Jorden packades i skikt i en box med dimensionerna 1000x500x500 mm. Ett hål med diametern 50 mm fylldes med osläckt kalk. Prover togs på olika avstånd från pelaren vid olika tidpunkter. Resultaten visade att migration av kalk skett maximalt 20-30 mm ut från pelaren. Vid senare utförda fältförsök fylldes 2,5 - 3 m djupa hål med diameter 63 resp. 200 mm med osläckt kalk (Rogers & Glendinning 1997). Resultaten visade på liknande resultat. En zon, 30 mm ut från pelarperiferin, hade märkbart styvare och torrare karaktär. Runt pelarna hade radiella, vertikala sprickor uppkommit med längden c:a 50 mm och bredden 2-5 mm.

I samband med forskning kring ytstabilisering av lösa jordar med kalk har det utförts ett antal studier av molekyllär diffusion. Fohs & Kinter (1972) utförde en studie där en kalkslurry stod i kontakt med packad jord i små block. Resultaten från denna studie visade att migration av kalk skett på en sträcka upp till 20-30 mm och är således i samma storleksordning som resultaten erhållna av Rogers & Glendinning (1994, 1997).

En mycket omfattande studie av diffusion av kalk och cement i små klumpar av lös jord är presenterad av Stocker (1975). Studien visar bl.a. att kalk migrerar genom 40 mm tjocka klumpar. Förmodligen har vattenströmning i materialet en positiv effekt på kalkvandringen då vattnet är ett medium för molekyllär diffusion (Lindh & Ydrevik 1978).

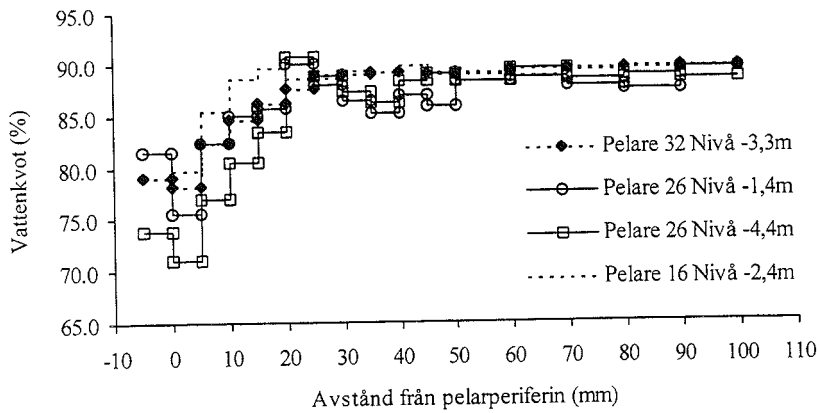
I samband med en omfattande studie av möjligheten att stabilisera lösa jordar med polymetriskt hydroxidaluminium, OH-Al, studerades förändringar i jordens egenskaper och sammansättningen i jordens porvatten, utanför stabiliserade pelare (Bryhn et al. 1988). Pelarna installerades med den Svenska kalkpelarmetoden. Diffusion av katjoner antingen tillsatta genom bindemedlet eller från jonbyten, ökade den omrörda skjuvhållfastheten i en zon upp till 86 cm ut från pelarperiferin. En studie av diffusion av kalk i laboratorie visade däremot att bindemedlet OH-Al endast påverkade en zon av 100 mm från den stabiliserade

jorden (Bryhn et al. 1984). Samma typ av försök utfört med kalk som bindemedel visade att zonen som påverkats av diffusion var endast c:a 30 mm.

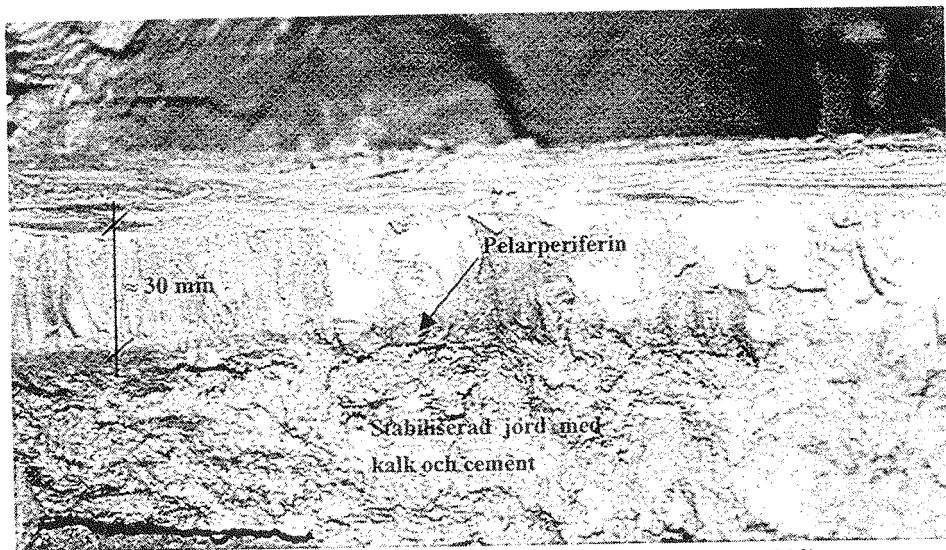
Åhnberg et al. (1995) utförde en serie laboratorieförsök där kalk resp. cementstabiliserad jord placerades i cylindrar med ostabiliserad jord om ömse sidor. Resultaten visade att transporten av kalciumjoner var större för kalkstabiliserad jord än för cementstabiliserad jord. En osäkerhet i resultaten gjorde det svårt att bedöma diffusionens utbredning, men den uppskattades att vara begränsad till några centimeter. Vidare kunde ett tunt skikt av lösare lera observeras mellan den stabiliserade och ostabiliserade jorden. Detta lösare skikt bedömdes ha orsakats av en krympning hos det stabiliserade materialet. Försöken kompletterades med fältförsök där en lera i Ljungskile stabiliserades med 50 % kalk och 50 % cement. En lösare lera observerades närmast pelaren vilket ansågs ha orsakats av en minskning av salthalten i leran.

Joshi et al. (1981) presenterade en studie där en kalkslurry (släckt kalk) injekterades in i en bentonit- resp. kaolinslurry. Migration av kalciumjoner studerades genom hållfasthetsprovning, elektronmikroskop och röntgen. Resultaten visade att hållfastheten påverkades c:a 30 mm in i jorden från kalkkällan. En ökning av kalciumjonkoncentrationen kunde dock detekteras upp till 75 mm in i jorden, vilket tyder på att fronten av migrerade kalciumjoner ligger betydligt längre in i jorden än den front där de geotekniska parametrarna påverkas.

I samband med en studie av blandningskvalitén i ett antal kalkcementpelare, redovisad i Kapitel 7, uppmättes vattenkvoten i jorden alldeles utanför pelarperiferin. Ett antal pelare togs upp med ett delat provtagningsrör med diametern 900 mm. Eftersom pelarna hade betydligt mindre diameter, 600 mm, följde relativt ostörd jord med. Vattenkvoten uppmättes i prover tagna var 5:e millimeter ut till 100 mm från pelarperiferin. Resultaten från fyra provtagningssektioner visas i Figur 6.5. Jordens egenskaper samt installationsdata för pelarna redovisas i Kapitel 7. Resultaten visar att vattenkvoten påverkats i en zon 30 mm ut från pelarperiferin och detta stämmer relativt väl överens med flertalet av de studier som är presenterade ovan. Den yta av leran som stod i direkt med pelaren, en c:a 5 mm bred zon var mycket styv. Zonen 5-30 mm var också den märkbart styvare än den omgivande lösa leran, Figur 6.6. En intressant iakttagelse är att vattenkvoten är något lägre i jorden alldeles utanför pelarperiferin än i pelaren (0-5 mm). Orsaken till detta kan vara den portrycksökning som sker i jorden vid den mekaniska blandningen och att jorden konsoliderats p.g.a. en vattentransport från jorden in mot pelaren då bindemedlet hydratiseras. Det hårdnande pelarmaterialet har i sin tur ökat något i volym och utsätter därmed den omgivande jorden för en radiell konsolidering. Pelarmaterialet har således inte konsoliderats i samma utsträckning som den omgivande jorden vilket lett till att vattenkvoten är något högre i pelaren.



Figur 6.5 Vattenkvoten i omgivande lera, uppmätt på olika avstånd från pelarperiferin (egna försök 1998).



Figur 6.6 Gränzonen mellan pelare och omgivande jord (egna försök 1998).

6.4 Påverkande faktorer

Blandningsprocessen vid kemisk pelarstabilisering är en mycket komplex process. En rad faktorer påverkar processen och dess resultat:

- Jordens och bindemedlets reologiska egenskaper samt mängden bindemedel.
- Tryckförhållandena i jorden vid pelarinstallationen.
- Utmatningstrycket och mängden luft.
- Blandningsredskapets geometriska utformning.
- Blandningsarbetet. Stigningen och rotationshastigheten hos blandningsredskapet.
- Konsolideringsspänningen, packningsarbetet, temperaturen och vattentillgången påverkar den molekylära diffusionen.

I detta avsnitt presenteras och diskuteras studier som utförts där främst inverkan av de faktorer som har anknytning till blandningsverktyget studerats, d.v.s. stigningen och rotationshastigheten hos blandningsredskapet. Vidare diskuteras inverkan av bindemedel, konsolideringsspänningen och packningsarbetet. Jordens reologiska egenskaper diskuteras främst i kapitel 5.

Blandningsarbetet

Det är idag väl känt att den effektiva töjningen i blandningen (stigningen hos blandningsverktyget) har inverkan på blandningsprocessen och dess resultat. Med ökad blandningstid ökar den effektiva töjningen och bindemedlet dispergerar i större utsträckning i blandningen. Många studier har dragit denna slutsats i samband med preparering av provkroppar i laboratorie, utan att närmare studerat inverkan av denna faktor, t.ex. Locat et al. (1990), Åhnberg et al. (1995). Däremot är det få studier utförda med huvudsyfte att studera enskilda faktorer som påverkar blandningsprocessen.

I de skandinaviska länderna används stigningen (mm/varv) på blandningsverktyget som ett mått på blandningstiden. Den effektiva töjningen i blandningen är en funktion av stigningen. Intensiteten i blandningen, agitationen, är en funktion av rotationshastigheten. I Japan däremot används i stället neddrivningshastigheten (m/min), uppdragningshastigheten samt rotationshastigheten som mått på blandningstiden. För att erhålla ett mått på blandningstiden måste parametrarna kombineras och antalet rotationer per meter pelare T , kan beräknas enligt (Yoshizawa 1997):

$$T = \sum M \times \left\{ (N_d/V_d) + (N_u/V_u) \right\} \quad (6.1)$$

där,

$\sum M$ = Antalet blad på blandningsverktyget

N_d = Rotationshastigheten på blandningsverktyget vid neddrivning (varv/min)

V_d = Neddrivningshastigheten (m/min)

N_u = Rotationshastigheten på blandningsverktyget vid uppdragning (varv/min)

V_u = Uppdragningshastigheten (m/min)

I Japan distribueras ofta en del av bindemedlet då blandningsverktyget roteras ned i jorden. Tekniken är speciellt använd då bindemedel i flytande form används. Bindemedlet hjälper då blandningsverktyget att röra om jorden. Bindemedel i torr form kan också distribueras på detta sätt för att utnyttja blandningsverktyget effektivare. För att ta hänsyn till att endast en del av bindemedlet distribueras då blandningsverktyget roteras ned kan följande uttryck användas för att beräkna antalet rotationer per meter pelare, T (Hayashi & Nishikawa 1999):

$$T = \sum M \times \left\{ (N_d/V_d) \times (W_i/W) + (N_u/V_u) \right\} \quad (6.2)$$

där,

W_i = Mängden bindemedel som distribueras då blandningsverktyget roteras ned (kg/m^3)

W = Total mängd bindemedel (kg/m^3)

I Sverige används stigningen (mm/varv) på blandningsverktyget som ett mått på blandningstiden. Antalet rotationer per meter pelare T, kan beräknas som

$$T = \sum M \times \left\{ (1/s_d) + (1/s_u) \right\} \times 1000 \quad (6.3)$$

där,

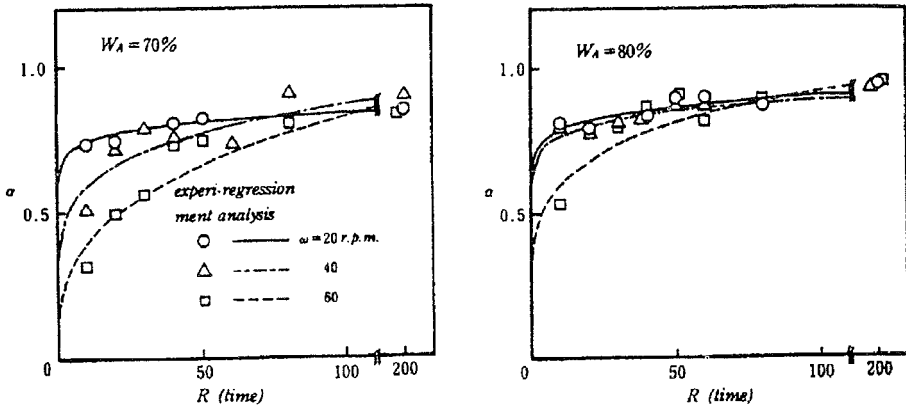
$\sum M$ = Antalet blad på blandningsverktyget

s_d = Sjunkningen på blandningsverktyget vid neddrivning (mm/varv)

s_u = Stigningen på blandningsverktyget vid uppdragning (mm/varv)

När man i Japan studerar inverkan av olika rotationshastigheter så varieras således både den effektiva töjningen och intensiteten i blandningen. Det är således svårt att separera de två parametrarna utifrån Japanska studier eftersom man ökar rotationshastigheten för att erhålla längre blandningstider.

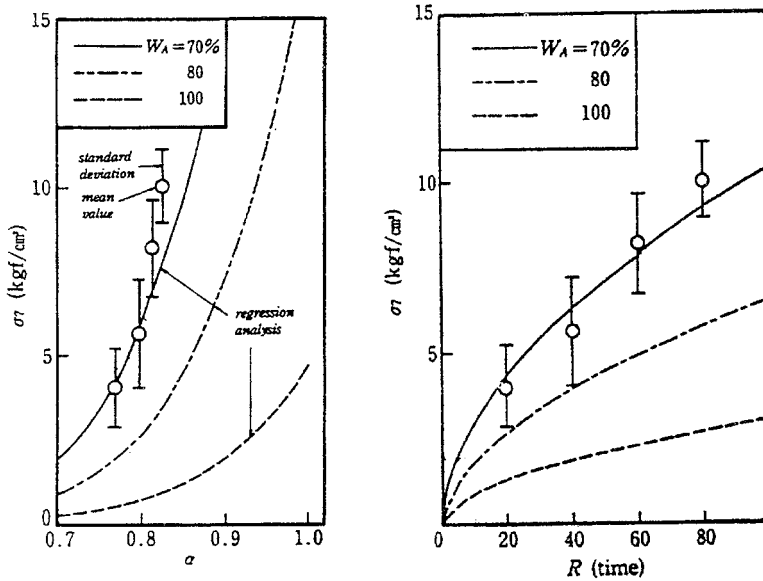
Muro et al. (1987a, 1987b) studerade inverkan av blandningstid och rotationshastighet i en serie laboratorieförsök där blandningsprocessen simulerades med två olika typer av utrustningar. Försöken utfördes med en kaolinlera och cement som bindemedel. Figur 6.7 visar resultat där blandningsgraden α utvärderats som funktion av det totala antalet rotationer R hos blandningsverktyget. Blandningsgraden α i figuren motsvarar ett blandningsindex enligt ekvation 4.13, Kapitel 4. Vattenkvoten i blandningen användes som variabel för utvärderingen av blandningsgraden. Den initiala vattenkvoten i kaolinleran var 70 %. Försöken utfördes med tre olika rotationshastigheter 20, 40 resp. 60 varv/min. Blandningen utfördes i en cirkulär behållare med diametern 160 mm och höjden 160 mm. Blandningsverktyget roterades i ett horisontalplan, d.v.s. utan stigning.



Figur 6.7 Samband mellan blandningsgraden α och antalet rotationer R (Muro et al. 1987b).

Resultaten visar tydligt att blandningstiden eller antalet rotationer har en stor inverkan på blandningsgraden, speciellt vid korta blandningstider.

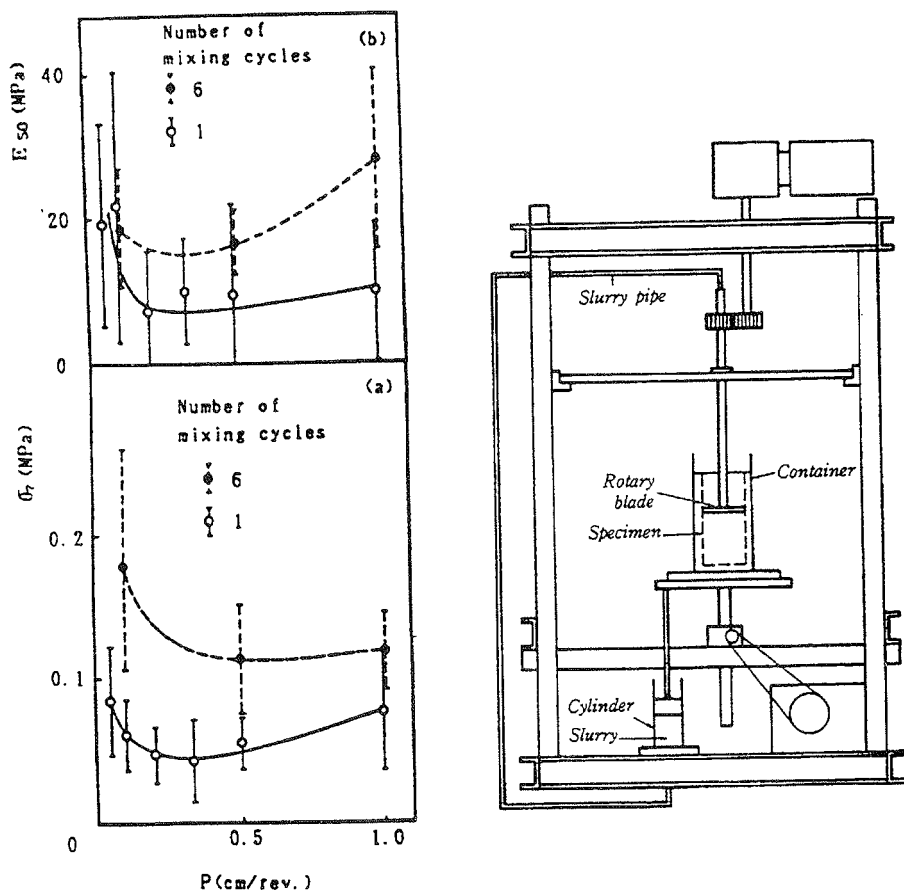
För att studera blandningsarbetets inverkan på hållfastheten i den laboratorieblandade jorden utfördes enaxliga tryckförsök. Figur 6.8 visas sambanden mellan blandningsgrad, antalet rotationer på blandningsverktyget och den enaxliga tryckhållfastheten.



Figur 6.8 a) Samband mellan tryckhållfastheten σ och blandningsgraden α .
 b) Samband mellan tryckhållfastheten σ antalet rotationer R .
 (Muro et al. 1987b).
 (Anmärkning: $1 \text{ kgf/cm}^2 = 100 \text{ kPa}$)

Resultaten visar i denna studie att blandningsgraden och antalet rotationer hos blandningsverktyget har en mycket stor inverkan på tryckhållfastheten. Blandningsgraden är proportionell mot logaritmen på antalet rotationer. Liknande resultat har rapporterats av Baker (1954), i samband med laboratorieblandning med en lerig silt stabiliserad med cement.

Vidare utförde Muro et al. (1987a, 1987b) blandningsförsök för att studera förhållandet mellan blandningsarbetet och den enaxliga tryckhållfastheten då ett upp och nedgående blandningsverktyg användes i en behållare med diametern 157 mm och höjden 400 mm. Figur 6.9 visar förhållandet mellan den enaxliga tryckhållfastheten, deformationsmodulen vid halva brottspänningen och stigningen på blandningsverktyget.

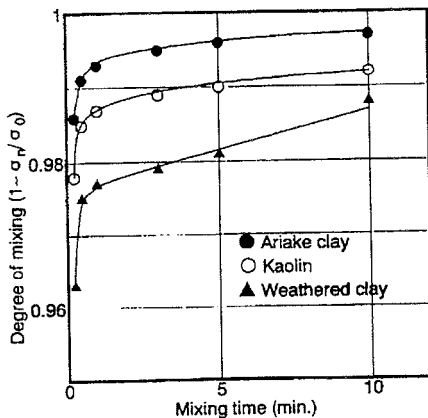


Figur 6.9 Samband mellan den enaxliga tryckhållfastheten σ , deformationsmodulen vid halva brottspänningen E_{50} och stigningen på blandningsverktyget P (Muro et al. 1987a)

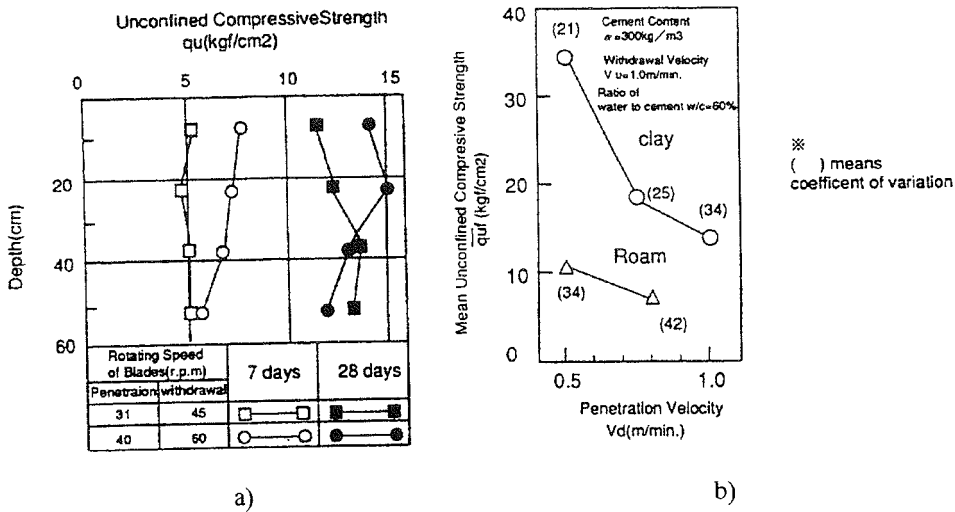
Figur 6.9 redovisar resultat som är svårare att utvärdera än de resultat som redovisas i Figur 6.8. Hållfastheten minskar något då stigningen minskar från 10 mm/varv till 2,5 mm/varv. Hållfastheten ökar dock sedan när antalet rotationer ökas (stigningen minskas) ytterligare. Det är dessutom en signifikant ökning av hållfastheten då antalet blandningscykler ökar från en till sex cykler. Det är givetvis svårt att dra några generella slutsatser ur försöken och författarna skriver att det krävs ytterligare studier för att förstå de mekaniska relationerna mellan blandningsgraden och deformations- och hållfasthetsparametrar. Det är dock helt klart att blandningsgraden har en inverkan på dessa parametrar.

En annan intressant studie av blandningsarbetets inverkan på blandningsgraden är presenterad av Nishida et al. (1996). Figur 6.10 visar resultat från inblandningsförsök där små cylindriska plastpärlor blandades med tre olika leror med olika sensitivitet. Genom att räkna koncentrationen av pärlor i olika delar av blandningen kunde blandningsgraden utvärderas. Också i denna studie är blandningsgraden utvärderad med blandningsindex enligt ekvation 4.13. Försöken visar att blandningsarbetet har stor inverkan på blandningsgraden vid korta blandningstider och att man kan förvänta sig en högre blandningsgrad i leror med hög sensitivitet.

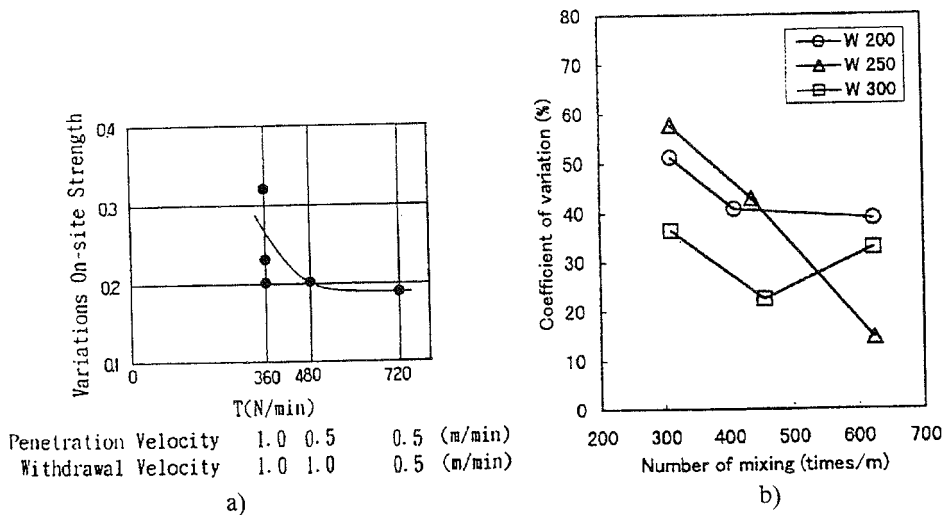
Yoshizawa et al. (1997) redovisar ett antal intressanta studier utförda i Japan främst under 1980-talet. Figur 6.11a visar resultat från en jämförelse mellan olika rotationshastigheter och dess inverkan på tryckhållfastheten i den stabiliserade jorden. Figur 6.11b visar resultat från en jämförelse mellan olika neddrivningshastigheter och dess inverkan på tryckhållfastheten. Dessa två studier visar att blandningstiden eller antalet rotationer hos blandningsverktyget har en inverkan på hållfastheten i den stabiliserade jorden. De visar dock inte om rotationshastigheten har inverkan på resultaten då antalet rotationer hos blandningsverktyget hålls konstant.



Figur 6.10 Samband mellan blandningstid och blandningsgrad (Nishida et al. 1996).



Figur 6.11 a) Samband mellan rotations hastighet och tryckhållfasthet (Nishibayashi et al. 1985, Yoshizawa et al. 1997). b) Samband mellan neddrivnings hastighet och tryckhållfasthet (Enami et al. 1986a, Yoshizawa et al. 1997).
(Anmärkning: 1 kgf/cm² = 100 kPa)

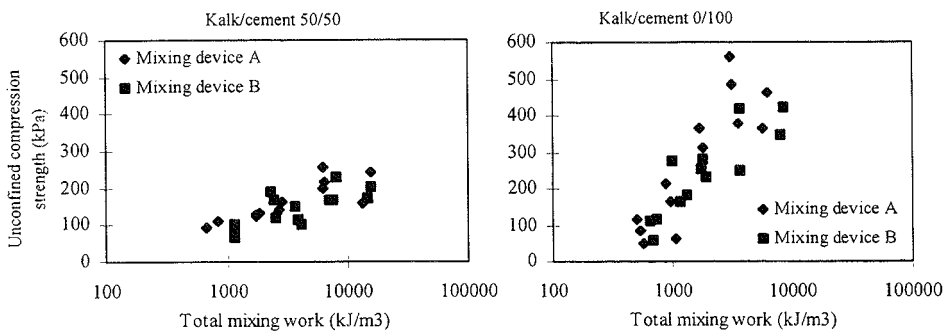


Figur 6.12 Sambandet mellan antalet rotationer hos blandningsverktyget och variationskoefficienten i uppnådd tryckhållfasthet. a) Mizuno et al. 1988, Yoshizawa et al. (1997). b) Hayashi & Nishikawa (1999).

Yoshizawa et al. (1997) redovisar också resultat från hållfasthetsprovningar på provbitar tagna från stabiliserad jord som visar att variationskoefficienten tenderar att minska då blandningstiden ökar, Figur 6.12a. Hayashi & Nishikawa (1999) redovisade resultat från både laborieförsök och fältförsök där blandningstidens inverkan på hållfastheten studerades för cementstabiliserad torv. Försöken visade att blandningstiden hade en signifikant inverkan på både hållfastheten och blandningsgraden. Då antalet rotationer hos blandningsverktyget ökades från 300 till 600 varv/meter minskade variationskoefficienten på för tryckhållfastheten från 40-60 % till 15-40 %, Figur 6.12b.

I Appendix C presenteras en laboriestudie av blandningsarbetets inverkan på den enaxliga tryckhållfastheten vid inblandning av cement resp. kalk/cement (Larsson et al. 1999, Walter 1998). Tryckhållfastheten användes i denna studie som ett mått på blandningskvaliteten med antagandet att hållfastheten ökar då bindemedlet är bättre dispergerat i en blandning. Också denna studie visar att blandningsarbetet har stor inverkan på tryckhållfastheten vid korta blandningstider, Figur 6.13.

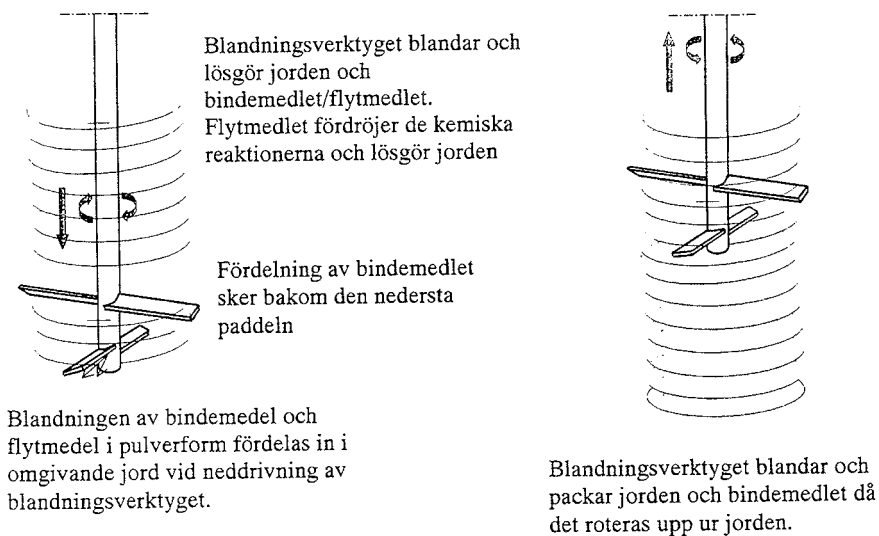
Omme et al. (1998) betraktade cementstabiliserad jord som ett två-fas material med delvis stabiliserad och delvis ostabiliserad jord. I en serie laborieförsök utvärderades förstärkningsgraden (blandningsgrad) som den stabiliserade ytan genom den totala ytan. Den stabiliserade ytan uppmättes med en planimeter. En kaolinlera stabiliserades med en cement-slurry. Pelare tillverkades i en cylinder med diametern 150 mm och höjden 150 mm. Resultaten från denna studie visade att förstärkningsgraden hade en stor inverkan på tryckhållfastheten. Ett linjärt samband erhöles mellan tryckhållfastheten och antalet rotationer hos blandningsverktyget.



Figur 6.13 Tryckhållfastheten som funktion av blandningsarbetet. Provkroppar med kalk/cement resp. cement som bindemedel (Larsson et al. 1999, Appendix C).

I de Skandinaviska länderna används nästan uteslutande bindemedel i torr form som distribueras in i jorden då blandningsverktyget roteras uppåt, enligt kapitel 6.3. Ett sätt att öka blandningsarbetet under blandningsprocessen är att distribuera bindemedlet då blandningsverktyget roteras ned i jorden. Detta skulle öka blandningsarbetet (antalet

rotationer per meter pelare) och endast öka tiden för pelartillverkningen något. En orsak till att denna teknik inte utnyttjas i de Skandinaviska länderna är att det är svårt och energi-krävande att blanda jorden med bindemedlet då bindemedlet fått tid att reagera med jorden. Problemet är speciellt stort då kalk används som bindemedel eftersom blandningen mycket snabbt granulerar. Ett sätt att undvika detta problem, men som ännu inte testats i Sverige, är att använda peptiseringsmedel (flytmedel) för att förändra de reologiska egenskaperna i blandningen. En principiell utformning av en sådan blandningsprocess visas i Figur 6.14. Peptiseringsmedlet kan användas för att bromsa de kemiska reaktionerna och på så sätt skapa en lös och lättblandad blandning. Det finns peptiseringsmedel i torr form som kan blandas in i ett bindemedel i pulverform. En ytterligare effekt är att det kan bli betydligt lättare att evakuera den luft som blandas in i jorden då blandningen beter sig som en vätska. Problem med evakueringen av luft diskuteras i kapitel 6.7. Ett mycket diskuterat problem är osäkerheten hur kvalitén är i botten av pelarna och om pelarna har anliggning mot underliggande fast jord. Genom att blanda in bindemedlet när blandningsverktyget roteras ned i jorden undviks problemet med anliggning mot underliggande fast jord eftersom bindemedlet kan distribueras ut i jorden i underkanten av blandningsverktyget.



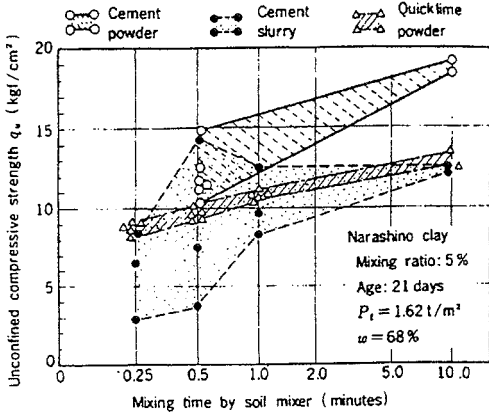
Figur 6.14 Principen för en blandningsprocess där bindemedlet och ett flytmedel pulverform blandas in i jorden då blandningsverktyget roteras ned i jorden.

Typ och mängd bindemedel

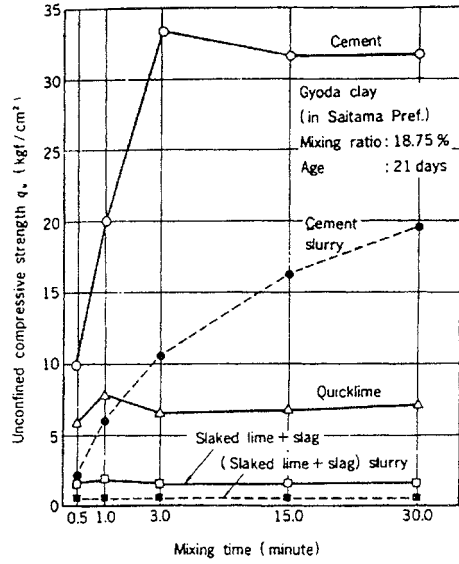
Walter (1998) samt Larsson et al. (1999) presenterade en mycket enkel utrustning där bindemedel blandades direkt i jordprover (standardhylsor 50x170mm) på laboratorie. Genom att blanda bindemedel i ostörd jord kan de reologiska parametrarna under blandningsprocessen studeras. Proverna blandades med två enkla geometriska utformningar på blandningsredskap. Genom att variera stighöjden på redskapen samt mäta vridmomentet under blandning kunde den totala blandningsenergin uppskattas. Resultaten visade att det åtgick i storleksordningen 2 gånger mer energi då bindemedlet bestod av en kalk/cement blandning (pulver) mot när bindemedlet var enbart cement. Eftersom blandningskvaliteten är mycket beroende av blandningsarbetet då bindemedlet utgörs av cement medför detta att man kan och bör använda blandningsredskap som bättre kan överföra energi till blandningen.

Också Chida et al. (1982) drar slutsatsen att bindemedelstypen inverkar på blandningsprocessen och dess resultat. Inverkan på hållfastheten av typ av bindemedel, pulver eller slurry, studerades på laboratorietillverkade provkroppar. Resultaten visade att då cement i pulverform användes som bindemedel ökade tryckhållfastheten som funktion av blandningstiden vid preparering av provkroppar. Då cement i pulverform användes som bindemedel ökade först tryckhållfastheten upp till en blandningstid runt 3 minuter. Vid längre blandningstider var tryckhållfastheten relativt konstant, Figur 6.15b. Vidare visade resultaten i Figur 6.15a, att spridningen i resultaten är större vid korta blandningstider då cement i pulverform och slurry användes. Tryckhållfastheten beror mindre av blandningstiden då osläckt kalk används som bindemedel, en slutsats som också Larsson et al. (1999) rapporterade.

Det är helt klart att mängden bindemedel påverkar hållfastheten i stabiliserad jord, men mängden bindemedel kan också påverka distributionen av bindemedel och spridningen i hållfasthet. Asano et al. (1996) studerade tryckhållfastheten och variationskoefficienten då man varierade bindemedelshalten för tre typer av bindemedel. Resultaten visade bl.a. att då en cementslurry användes så minskade variationskoefficienten från c:a 40 % till 20 %, då mängden bindemedel fördubblades. Också Matsuo et al. (1996) visade att variationskoefficienten sjönk i samma storleksordning då bindemedelshalten (cementslurry) fördubblades, Figur 6.16a. Resultaten antyder dock att spridningen påverkas mest vid låga bindemedelshalter. Vidare redovisar Matsuo et al. (1996) resultat från en studie som visar att variationskoefficienten ökar med ökat vatten-cement-tal vilket antyder att en ökad mängd inblandat vatten försämrar effektiviteten i blandningsprocessen, Figur 6.16b. Inverkan på blandningsprocessen med en ökad mängd inblandat vatten beror av jordens initiala reologiska egenskaper. Då vatten blandas in i en lös jord med hög vattenkvot kommer jorden brytas upp i klumpar som sedan relativt opåverkat dras runt i blandningen.

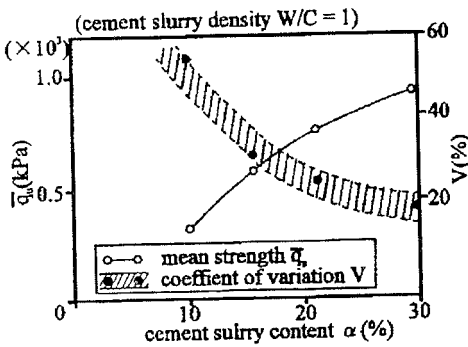


a) (Chida 1982).

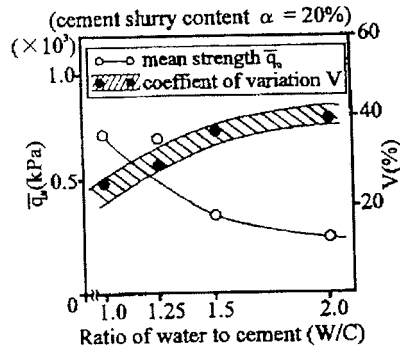


b) (Chida 1982).

Figur 6.15 Samband mellan tryckhållfastheten och blandningstiden för olika bindemedel.



a)



b)

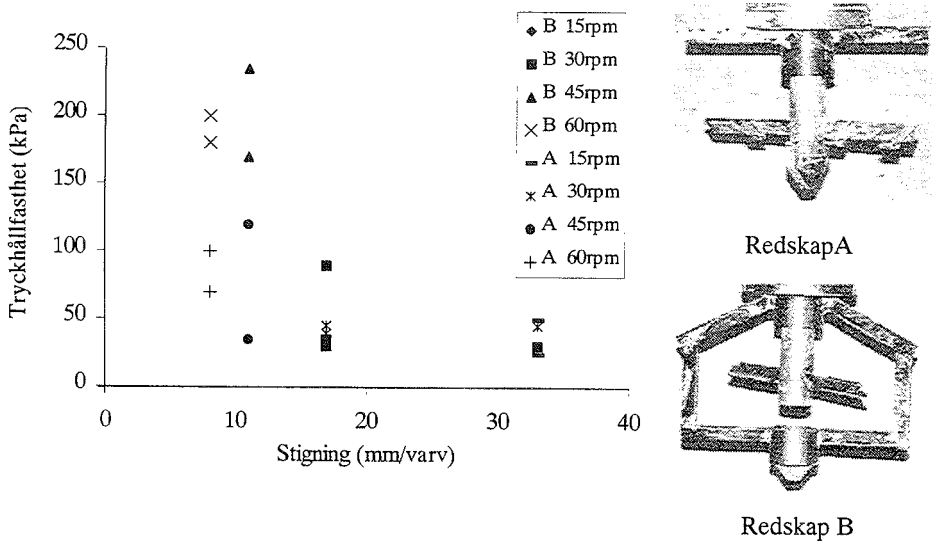
Figur 6.16 Variation i hållfasthet och variationskoefficient i stabiliserad jord då:

- a) Mängden bindemedel varieras. b) Vatten- cementtalet varieras i bindemedlet (Nishibayashi et al. 1988, Matsuo et al. 1996).

Verktygets utformning

Det har inte publicerats några vetenskapligt grundläggande studier av blandningsverktygets geometriska utformning och dess inverkan på blandningsprocessen i samband med pelarstabilisering. Det fåtal studier som presenterats angående blandningsverktygets utformning är av säljande karaktär och presenterade av enskilda företag i samband med konferenser eller i tidskrifter som är specialiserade på redskap, t.ex. Kisoko (Foundation Engineering and Equipment, Monthly).

Dong et al. (1996) studerade inverkan av blandningsverktygets geometriska utformning, blandningstiden och rotationshastigheten med en serie laboratorieförsök. Pelare med diametern 400 mm och höjden 1000 mm installerades i en lerig sand med tryckhållfasthet c :a 29 kPa. Bindemedlet var en cement-slurry. Två olika typer av blandningsverktyg användes, där typ A var ett verktyg med två nivåer med paddlar och typ B var ett verktyg där en paddel och en ramformad bladkonfiguration roterades i olika riktningar. Figur 6.17 visar tryckhållfastheten efter 7 dygn som funktion av stigningen för resp. verktyg.



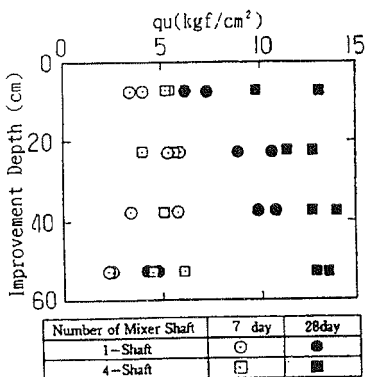
Figur 6.17 Sambandet mellan stigningen på blandningsverktyget och tryckhållfastheten (modifierad efter Dong et al. 1996).

Resultaten visar att stigningen eller antalet rotationer på blandningsverktyget har inverkan på tryckhållfastheten och att verktyg B troligtvis är effektivare än verktyg A. Författarna skriver också att blandningsgraden är bättre för högre rotationshastigheter utifrån visuella observationer. Tyvärr är det svårt att särskilja rotationshastigheten från antalet rotationer eftersom de lägre rotationshastigheterna använts då det var stor stigning

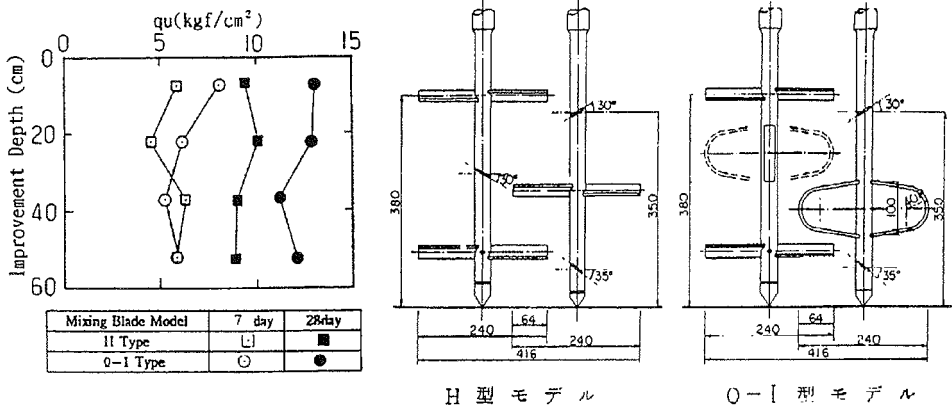
på redskapen och de högre rotationshastigheterna använts då det var liten stigning på redskapen.

Yoshizawa et al. (1997) redovisade ett antal studier där man studerat inverkan av blandningsverktygets geometriska utformning. Figur 6.18 visar en jämförelse av tryckhållfasthet som uppnås då ett redskap har ett eller fyra skaft. Ett exempel på redskap med flera skaft visas i Figur 6.31. Resultaten visar att man erhåller en mindre spridning och högre hållfasthet då man använde fyra skaft i stället för ett enskilt. Orsaken till detta är enligt författarna att angränsande skaft roterar i omvända riktningar vilket medför att det i den överlappande zonen sker en samverkande blandningseffekt. Den förbättrade blandningseffektiviteten kan också förklaras med att det skapas en knådande blandning mellan de olika bladen från de olika skaften.

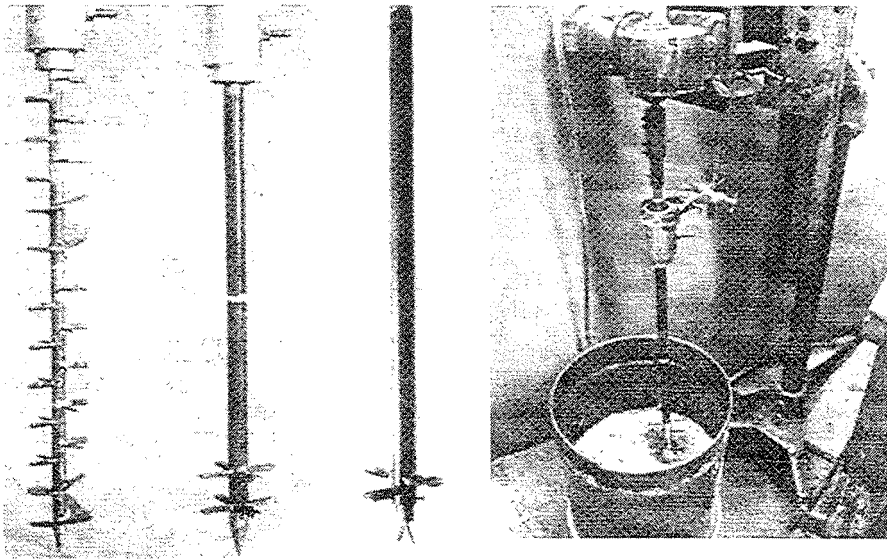
Vidare redovisar Yoshizawa (1997) resultat från en serie försök där man jämfört två olika konfigurationer på sex blad på ett blandningsverktyg med två skaft, Figur 6.19. Blandningsverktyget som betecknas "H" har sex horisontella paddlar. På blandningsverktyget som betecknas "0-1" har de två mellanliggande paddlarna byts ut mot två byglar. Byglarna skjuvar jorden i olika riktningar (jämför med Figur 2.5, Kapitel 2.5). Författarna skriver att dessa byglar är speciellt effektiva då jorden har hög viskositet (plastisk). Det måste dock påpekas att ersättandet med byglar medför att blandningsredskapet i denna studie försetts med fler blad.



Figur 6.18 Jämförelse av den tryckhållfasthet som uppnås då ett redskap har ett eller fyra skaft (Nishibayashi et al. 1985, Yoshizawa et al. 1997).



Figur 6.19 Jämförelse av den tryckhållfasthet som uppnås med två olika utformningar av ett blandningsverktyg (Nishibayashi et al. 1985, Yoshizawa et al. 1997).



Figur 6.20 Tre olika blandningsverktyg som studerades i laboratorie (Al-Tabbaa et al. 1999).

Al-Tabbaa & Evans (1999) och Al-Tabbaa et al. (1999) jämförde tre olika typer av blandningsredskap i samband med en serie laboratorie- och fältförsök. Det utfördes dock inte någon kvantitativ jämförelse mellan redskapen utan jämförelsen baserades på visuella observationer av blandningsresultaten. De tre blandningsverktygen som studerades i laboratorie visas i Figur 6.20. Verktyg 2 är en förenklad version av ett antal kommersiella verktyg. Verktyg 3 liknar verktyg 2 men har färre antal blad och är försedd med skärande

tänder i botten. Verktygen hade diameter 6-9 cm. Försök utfördes med både vattenbaserade bindemedel och bindemedel i pulverform. Resultaten visade att redskapen åstadkom en likvärdig blandning i ren sand. I sandig lera och kohesiva material var verktyg 2 betydligt mer effektivt än verktyg 1. Vidare erhöles ett bättre blandningsresultat då jorden förblandades innan bindemedlet tillfördes.

Det är viktigt att vid modellförsök studera inverkan av skaleffekter såsom små vertikala och horisontalspänningar i blandningen. Det finns risk att blandningsverktyget drar med sig blandningen uppåt då verktyget roteras och dras uppåt. Dessutom kan blandningen klumpa ihop sig mellan bladen, speciell då kalk används som bindemedel. Man har inte studerat eller kommenterat sådana effekter i de studier som presenterats ovan.

I samband med jordbruksforskning har man studerat hur diskar, t.ex. harvar, beter sig i jorden. Principen är att åstadkomma en så stor rörelse i jorden som möjligt till minsta möjliga energiåtgång, d.v.s samma princip som vid blandning av lösa jordar och bindemedel. Ali Al-Ghazal (1989) studerade inverkan av olika vinklar, diametrar, djup och avstånd mellan olika cirkulära skivor. Enkla modeller för samverkan mellan jord- och skivor utvecklades baserade på Mohr-Coulomb's brottkriterie. Begreppet specifikt motstånd (= kraft / area) användes för att uppskatta effektiviteten hos skivorna. Med modellförsök i stor skala studerades de olika faktorerna och resultaten visade att när faktorerna vinkeln, diametern, djupet och avståndet mellan olika cirkulära skivorna ökade så ökade arean där jorden störs och det specifika motståndet minskade.

Reologiska egenskaper i jorden

Blandning av finkorniga jordar och bindemedel är särskilt svårt när jorden är extremt kohesiv och seg, vid måttlig eller hög vattenkvot. Jordtypen och dess reologiska egenskaper har en betydande inverkan på effektiviteten i en blandningsprocess. Det är t.ex. relativt enkelt att med en begränsad kraftansträngning blanda cement med torr sand och åstadkomma en blandning med små koncentrationsvarianser. Det krävs däremot en betydligt större och intensivare blandningsinsats för att blanda in cement i en kohesiv lera. Det har tyvärr inte utförts några mer omfattande studier av jordens reologiska egenskapers inverkan på blandningsprocessen i samband med pelarstabilisering.

I samband med ytstabilisering har omfattande studier utförts med kalk och cement där tekniska egenskaper studerats (sammanställt av bl.a. Sherwood 1993). Egenskaperna hos djupstabiliserad lös jord är liknande de egenskaper som erhöles hos ytstabiliserad jord. Det som främst skiljer mellan djupstabilisering och ytstabilisering är att det är främst vattenmättad lös jord som djupstabiliseras och jorden packas därför normalt inte. Proceduren vid tillverkning av stabiliserad jord på laboratorie är också mycket lika. Av dessa orsaker diskuteras därför också erfarenheter från inblandning av kalk, cement i jord i samband med ytstabilisering.

På MIT (Massachusetts Institute of Technology, USA) utfördes i slutet av 1950-talet omfattande studier av bl.a. vattenkvotens inverkan på blandningsprocessen vid blandning av finkorniga jordar med kalk eller cement (Freitag et al. 1961). Laboratoriestudier visade

att vattenkvoten var en av de mest signifikanta faktorerna som påverkade både kraftkonsumtionen och tiden för att uppnå en viss blandningsgrad. Försöken visade att den mest gynnsamma vattenkvoten för att uppnå så snabb blandning som möjligt, med avseende på blandningsgrad, var en vattenkvot runt plasticitetsgränsen. Det var också vid denna vattenkvot där det erfordrades mest blandningsenergi. Tabell 6.1 visar hur vattenkvoten påverkar några blandningskaraktistika. Notera att det är lättast att blanda ett helt torrt pulver eller en vätska. Försöken visade också att rotationshastigheten på blandningsredskapen hade olika inverkan på blandningen beroende på vattenkvoten. Vid låg vattenkvot, under plasticitetsgränsen, erhöles den effektivaste blandningen när rotationshastigheten var låg. Då vatten kvoten var hög erhöles den effektivaste blandningen då rotationshastigheten var hög.

Tabell 6.1 Vattenkvotens inverkan på egenskaper i blandningsprocessen (Freitag et al. 1961).

Tillstånd	Ökande vattenkvot →					
	Pulver	Kulor och pulver	Kulor	Plastiskt	Klibbigt	Vätska
Energiåtgång	Låg	Låg till måttlig	Måttlig	Hög	Måttlig	Låg
Homogeniseringstakt	Snabb	Långsam	Mycket långsam	Snabb	Långsam	Snabb
Effektiviteten i utnyttjande av energi	Mycket hög	Gynnsam	Gynnsam till dålig	Dålig	Gynnsam till dålig	Hög

Freitag et al. (1961) rapporterade också resultat från försök avseende inblandning av tillsatsmedel för att förändra de reologiska egenskaperna i jorden. Försöken visade att energiåtgången och effektiviteten kunde påverkas signifikant genom inblandning av dispergeringsmedel eller aggregatbildande medel. Då jordens vattenkvot var över plasticitetsgränsen visade det sig att aggregatbildande medel var det mest effektiva för att reducera energiåtgången och öka effektiviteten i blandningen. Dispergeringsmedel ökade inte effektiviteten eller blandningsgraden men minskade energiåtgången för jordar med höga vattenkvoter.

Då osläckt kalk i pulverform, CaO, används som bindemedel förändras de reologiska egenskaperna mycket snabbt då kalken kommer i kontakt med ett jordmaterial. Jordmaterialet granulerar och kan bli svår att bearbeta. Om denna snabba kemiska reaktion inte är önskvärd kan peptiseringsmedel användas för att bromsa och försena reaktionsförloppet. En tillämpning är som tidigare nämnts då man distribuerar bindemedel in i jorden då blandningsverktyget roteras ned i jorden. Det har dock inte presenterats några studier som

visar huruvida peptisering är en effektiv metod för att förändra de geologiska egenskaperna i en blandning då osläckt kalk I i torr form används som bindemedel.

Nishida et al. (1996) redovisade resultat som belyste inverkan av sensitiviteten i jorden, Figur 6.10. Resultaten visade att man kan förvänta sig en högre blandningsgrad i leror med hög sensitivitet.

I Japan har det utförts studier av möjligheten att använda blandningsredskapet som ett geologiskt mätinstrument under blandningsprocessen (Hata et al. 1987, Aoi & Tsujii 1996). Genom att bl.a. uppmäta den tillförda energin under blandningsprocessen och relatera till jordens egenskaper kan metoden utvecklas enligt dessa författare.

Packningsarbete

Det har diskuterats när och hur stor last som kan läggas på markytan efter en pelarstabilisering. Det kan vara viktigt att lägga på en så stor konsolideringsspanning som möjligt i ett tidigt skede då de kemiska reaktionerna är som mest aktiva. I Sverige utförs normalt inget packningsarbete utöver det arbete som blandningsverktyget åstadkommer. Eftersom man i de Skandinaviska länderna främst använder luft som bärande media för ett bindemedel i pulverform, blåser man ut stora mängder luft i jorden. Om inte luften evakueras kommer redskapets packande förmåga få en stor betydelse för blandningsprocessen och hållfasthetstillväxten. Även en ytpackning kan ha betydande inverkan. Gränssytarean mellan bindemedlet och jorden är ett mått på blandningskvaliteten och effektiviteten i molekylär diffusion. Således har packningsarbetet inverkan på blandningsprocessen eftersom en ökad densitet minskar avståndet mellan bindemedlet och jorden. I Japan används främst förblandat bindemedel i vätskeform vilket leder till att packningsarbetet har ringa betydelse under förutsättningen att det är en vattenmättad jord som stabiliseras.

Vid ytstabiliseringsarbeten är packningen av det stabiliserade materialet ett av de viktigaste arbetsmomenten (Assarsson 1972). Det är väl känt att packningsarbetet och typ av packning har inverkan på densitet och hållfasthet för icke vattenmättade kohesiva jordar (t.ex. Bell 1977). En viktig faktor vid packning är tiden mellan inblandningen av bindemedlet och packningsarbetet ("aging" eller "mellowing"). Denna tid kan ha en inverkan på packningsegenskaperna och åstadkomma en minskning av hållfastheten i stabiliserad jord (t.ex. Uppal & Bhasin 1979, Sweeney et al. 1988, Sivapullaiiah et al. 1998a, Holt & Freer-Hewish 1998). Sivapullaiiah et al. (1998a) drar slutsatsen från egna utförda laboratorieförsök, att tiden mellan inblandningen av bindemedlet och packningsarbetet har olika inverkan på hållfasthetsegenskaperna beroende på bindemedelshalten (släckt kalk). Ju längre tidsfördröjning ju större blir hållfasthetsförlusten och ju lägre är den densitet som går att uppnå med packning. Vid låga mängder bindemedel har tidsfördröjningen en försumbar inverkan på densitet och hållfasthet. Vid större mängder bindemedel påverkas däremot hållfasthets- och packningsegenskaperna betydligt och man bör därför undvika tidsfördröjning mellan inblandning och packning enligt Sivapullaiiah et al. (1998b).

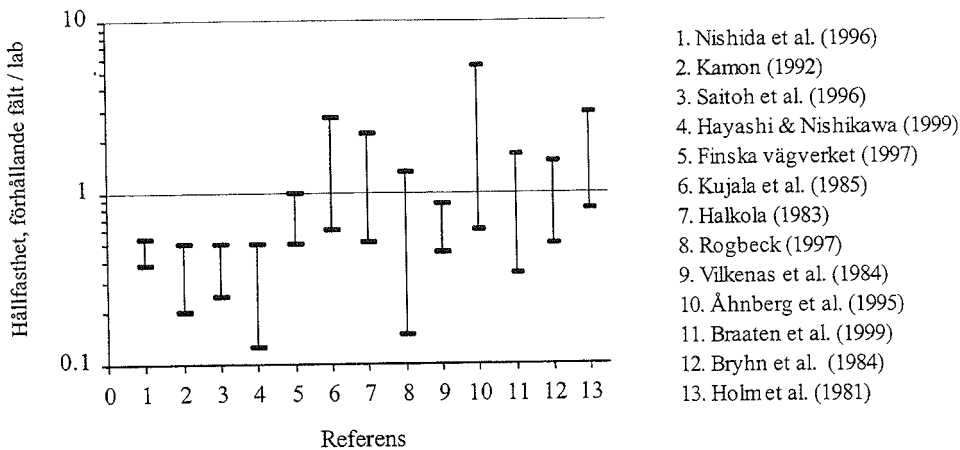
Också Lindh & Hjalmarsson (1975) drar slutsatsen från laboratorieförsök att vid hög cementhalt försämrats hållfastheten av en ökad tidsfördröjning. Tidsfördröjningen har särskilt stor inverkan på cementstabiliserad jord (Kezdi 1979). En studie presenterad av Sivapullaiah et al. (1998b) visar att bindemedlets sammansättning påverkar inverkan av tidsfördröjningen och det är därför svårt att dra några generella slutsatser.

Med ett roterande blandningsverktyg försett med paddlar eller liknande så är det redskapets knådande förmåga som avgör hur bra packningsarbetet blir. Det är viktigt att den tillförda energimängden från redskapet är riktad nedåt i blandningen, i axiell riktning. Vidare är det viktigt att ingen del av redskapet lyfter materialet eller får materialet att fastna i redskapet och därmed dras med uppåt.

6.5 Laboratoriefilosofi samt förhållande mellan laboratorieförsök och fält

Det är svårt och kostsamt att utföra studier av blandningsprocessen i fält. Det är därför lämpligt att det utförs fundamentala studier i laboratoriemiljö med kontrollerbara reologiska egenskaper hos materialen och enkla geometrier på blandningsredskapen. Sådana arbeten belyser de fenomen som sannolikt är de mest relevanta att studera i fält. De skall inte syfta till att ge data som är direkt applicerbara, men belysa resultat som föreslår nya angreppslinjer till mekanismen hos det verkliga problemet. Det är nödvändigt att laboratorieförsök har nära kontakt med de verkliga problemen för att säkerställa tillämpning av ny kunskap. Detta skulle också säkerställa att problem inte blir alltför förenklade. Tyvärr ger dagens metod för tillverkning av provkroppar i laboratorium föga kunskap om blandningsprocessen. Några av parametrarna enligt Kapitel 6.4 ligger långt utanför metodens (pelarstabilisering) tillämpningsområde. Exempel på detta är att man i laboratorium bereder provkroppar med fullt uppbruten jord och blandar proverna mångfaldigt mer än vad som är rimligt i fält. Med denna metodik lär vi oss ingenting om jordens reologiska egenskaper som är mycket viktiga parametrar för blandningsprocessen. Dagens laboratoriemetod fixerar främst på faktorerna typ- och mängd bindemedel. Laboratorieförsöken syftar främst till att ge besked huruvida det är möjligt att stabilisera en jord (Carlsten 1991).

En etablerad åsikt inom branschen för kemisk pelarstabilisering är att det inte går att simulera blandningsprocessen i laboratorium (t.ex. Terashi 1998, Bruce et al. 1998). Den enda variabeln som kan simuleras är typ och mängd bindemedel. Det finns dock en ambition att söka en empirisk relation mellan den hållfasthet som åstadkoms i laboratorium och den hållfasthet som åstadkoms i fält, baserad på ackumulerad erfarenhet. Sådana empiriska relationer går dock bara att hitta då de olika faktorerna i processen vid laboratorieförsök befinner sig inom tillämpningen för metoden. Eftersom de inverkanse faktorerna enligt kapitel 6.4 inte är oberoende av varandra, finns en stor risk att man drar felaktiga slutsatser då en eller flera av dessa parametrar hålls konstant långt utanför tillämpningsområdet.



Figur 6.21 Förhållandet mellan resultat erhållna i fält och resultat från laboratoriestabiliserad jord för ett antal rapporterade studier.

I Figur 6.21 redovisas några av de rapporterade relationerna mellan hållfasthet uppmätt i fält eller uppmätt på provkroppar upptagna från stabiliserad jord och hållfasthet uppmätt på laboratorietillverkade provkroppar. Denna redovisning är utförd för att belysa svårigheterna med att försöka använda erfarenheter från jämförelser mellan lab. och fält och sedan extrapolera erfarenheter till andra projekt. Det är givetvis svårt att använda sådana erfarenheter då man jämför resultat från försök med olika typer av testmetoder eller med ej likvärdiga förutsättningar. Förhållandet mellan hållfasthet, fält/lab., beror också på antalet försök.

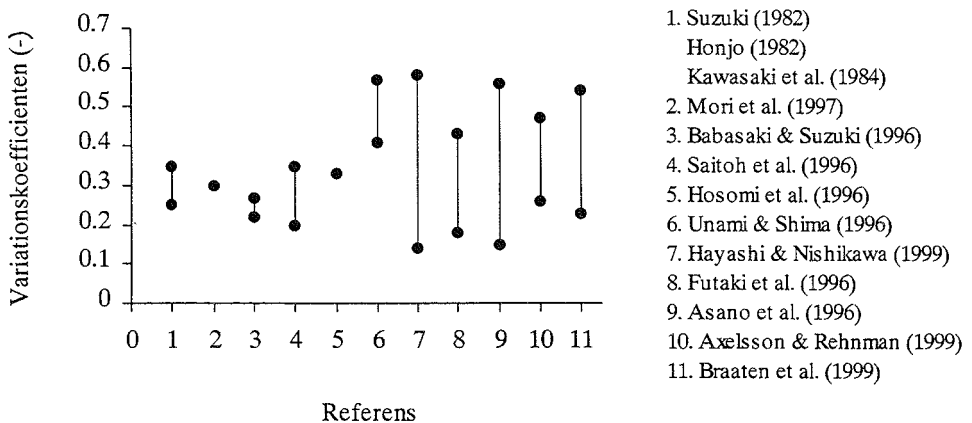
En jämförelse mellan resultat erhållna från laborieförsök och resultat från fältförsök eller försök utförda på provkroppar upptagna från stabiliserad jord i fält försvåras ytterligare av att blandningskvaliteten och därmed hållfastheten i den stabiliserade jorden varierar. I Japan används tryckförsök på kärnborrade prover från den stabiliserade jorden som ett redskap för kvalitetskontroll. Figur 6.22 visar resultat från ett antal rapporterade studier där variationskoefficienten utvärderats från tryckförsök. Resultaten från dessa studier visar att variationskoefficienten normalt är inom intervallet 0,2 till 0,4 men att större spridningar i resultaten kan observeras. Spridningen i plan, över tvärsnittet är i samma storleksordning enligt Suzuki (1982), Honjo (1982) och Kawasaki et al. (1984). Den stora variationen i variationskoefficienten och förhållande mellan laborieförsök och fältförsök, rapporterad av Hayashi & Nishikawa (1999) beror på att blandningstiden (antalet rotationer hos blandningsverktyget) varierades i studien.

Det tas sällan ett så stort antal prover ur stabiliserad jord i samband med projekt i Sverige att det går att utvärdera variationskoefficienten från t.ex. tryckförsök. Axelsson & Rehnman (1999) presenterade dock ett stort antal resultat från kalkcementpelare. Dessutom

redovisas i Figur 6.22 variationskoefficienten utvärderad från ett stort antal tryckförsök på provkroppar från kalkcementpelare i Norge, Braaten (1999).

Även med pelarsonder som testar en stor del av tvärsnittsytan på en pelare kan stora variationer mellan olika pelare erhållas. Kujala et al. (1985) rapporterar att standardavvikelsen är i storleksordningen 15-60 % av medelvärdet vid pelarsonderingar.

Ett syfte med dagens standarder för preparering av provkroppar i laboratorie är att den skall resultera i den bästa stabiliseringseffekten med avseende på blandningsgraden (Babasaki et al. 1997). Resultat bedöms som regel utifrån tryckförsök. Denna maximala blandningsgrad skall ses som ett index för den aktuella jorden och skall sedan korreleras mot fältdata. Det finns dock ett antal faktorer som visar att det inte är möjligt att se laboratorieförsök som den absolut maximala stabiliseringseffekten. I Kapitel 6.4 diskuterades ett antal faktorer som påverkar blandningsprocessen och dess resultat. Det torde vara helt klart att blandningsprocessen är extremt komplex och de olika faktorerna kan påverka processen olika under olika förhållanden. Ett exempel på detta är då man erhåller olika resultat från olika laboratorier även då de stabiliserat samma jord med samma mängd bindemedel (Edstam & Carlsten 1999). Det är ofta någon eller fler faktorer som skiljer laboratorierna åt. En standardiserad laboratoriemetod innebär dock inte att man erhåller bästa stabiliseringseffekten. En annan faktor som man bör beakta är att man under ett långt blandningsförfarande kan totalt förändra jordens struktur och i värsta fall råka ut för "överblandning". I samband med laboratorieinblandade provkroppar med torv, cement och slag rapporterade Pousette et al. (1999) att långa blandningstider hade negativ inverkan på stabiliseringseffekten. Orsaken ansågs vara att fibrerna i torven bröts upp.



Figur 6.22 Variationskoefficienten utvärderad från tryckförsök för ett antal rapporterade studier.

Temperaturen och vattenkvoten påverkar starkt egenskaperna vid lagring av provkroppar i laboratorie. En starkt bidragande orsak till skillnader mellan laboratorieförsök och fältförsök är att temperaturen skiljer sig under härdningsförloppet (Viatek 1997). Det diskuteras därför om det går att simulera temperaturförloppet i laboratorie och Viatek (1997) presenterar exempel på temperaturförlopp för olika bindemedel.

Då osläckt kalk används som bindemedel torkar blandningen och provet kan behövas vätas så att kalken kan hydratisera och vattenkvoten återställs (Brookes et al. 1997). Proceduren att simulera ett vattenflöde från omgivande jord in mot den stabiliserade jorden är relativt komplex. Försök utförda av Brookes et al. (1997) visade att en lång period av vätning av provkroppar ledde till att den stabiliserade jorden mjuknade vilket inte var karakteristiskt i fält.

Inom en rad andra tillämpningsområden/vetenskaper har man mer och mer gått över till att, i största möjliga mån, efterlikna de processer som återfinns i fält. Fyra exempel på sådana tillämpningsområden inom anläggningsbranschen är:

- 1) Kalkstabilisering/ytstabilisering (British Lime Association 1990). Den brittiska handboken anger att vid tillverkning av provkroppar i laboratorium är det viktigt att provkroppsbereidningen inte skiljer sig signifikant från fältförhållanden.
- 2) Beläggningsarbeten (VTI 1999). Man överger mer och mer provkroppstillverkningen enligt Marchallmetoden eftersom denna metod inte ger provkropparna egenskaper liknande egenskaperna i fält.
- 3) Jordpackning (Venkatarama Reddy & Jagadish 1993, Kouassi et al. 2000). Packning av jordprover på laboratorie enligt Proctor-metoden kritiseras allt mer eftersom denna packningsmetod inte efterliknar packningsarbetet i fält med hänsyn till tillförd energimängd och packningsmekanism.
- 4) Masstabilisering (Hoikkala et al. 1997). I Finland har en procedur för laboratorieinblandade prover med torv tagits fram där de faktiska lasterna i fält simuleras i laboratoriet

Den föreliggande litteraturstudien avseende laboratorieförsök visar att det finns krafter som verkar för en standardisering av inblandning och försök i laboratorie, där den rådande åsikten är att det inte går att simulera blandningsprocesser i laboratorie. Det finns också krafter som styr mot att försöka simulera olika faktorer i blandningsprocessen i laboratorie. I litteraturen behandlas dock i regel en faktor i taget. Det är ännu ingen som försökt att simulera hela blandningsprocessen.

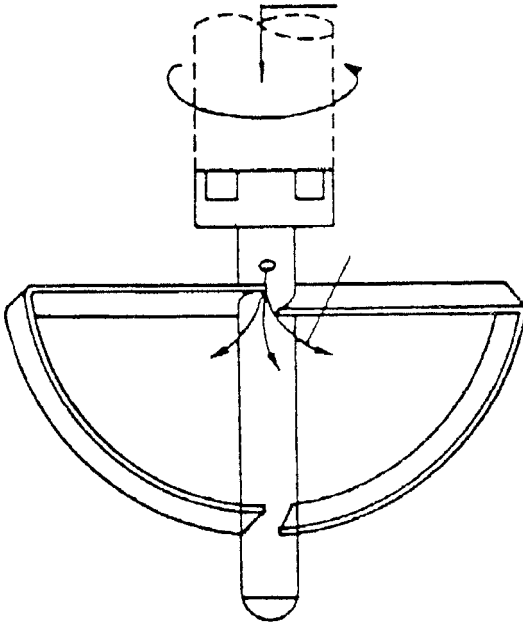
Om inte ambitionen är att öka kunskapen om blandningsprocessen vid kemisk pelarstabilisering i samband med laboratorieförsök kommer kunskapen avseende påverkande faktorer sannolikt att vara begränsad lång tid framöver. Detta kan givetvis leda till att det blir svårt att utveckla metoden vidare.

6.6 Blandningsredskap

Blandningsredskap i Skandinavien

Klassificering av dagens redskap

Det i dag mest använda blandningsredskapet i Sverige benämns som "normalverktyg" eller populärt "bygel", Figur 6.23. Det finns idag ett antal variationer som används men skillnaden vad gäller de grundläggande blandningsmekanismerna är små.



Figur 6.23 Normalverktyget eller bygel (Carlsten & Ekström 1995).

Själva grundutformningen hos redskapet med den bygelformade geometrin liknar blandningsredskap som tillhör gruppen ankarblandare, se Kapitel 3. Men det finns några avgörande skillnader som gör att de huvudsakliga blandningsmekanismerna skiljer sig åt.

Ankarblandare används för att blanda vätskor med hög viskositet, pastor och plastiska material. De lämpar sig mindre bra till att blanda visköst elastiska material där krafter som åstadkommer rörelser snabbt dör ut p.g.a. elastiskt motstånd och förmåga att motstå skjuvspänningar. Dessa egenskaper hos en blandning kan leda till att ankarblandare har svårt att åstadkomma rörelser i hela blandningen. Ankarblandare är försedda med paddlar som i regel är vertikala, runda eller vinklade $\approx 45^\circ$ mot horisontalplanet. Detta för att tvinga så stor volym som möjligt av de ingående materialen i rörelse runt bladen.

Bladen på "normalverktyget" har i regel mycken liten vinkel mot horisontalplanet ($\approx 10^\circ$ - 20°). Detta gör att redskapet har svårt att åstadkomma tangentiella rörelser i materialet, vilket är det huvudsakliga flödesmönstret för paddlar. Den lilla vinkeln mot

horisontalplanet hos "normalverktyget" gör att redskapet snarare går under gruppen propellrar. Propellrar åstadkommer främst axiella flöden, se Figur 3.1. (Jämför med takfläktar som skapar axiella flöden i rumsluften redan vid låga rotationshastigheter, men vid blandning i vätskor måste propellern operera med hög hastighet för att åstadkomma tillräckligt stora rörelser i vätskan.) Med utgångspunkt från denna klassificering kan "normalverktyget" klassas som en blandning mellan paddel och propeller.

Vid blandning i lösa jordar torde ingen nämnvärd rörelse uppkomma i suspensionen i axiell riktning med dagens redskap. De rörelser som "normalverktyget" skapar i tangentiell- och axiell riktning är begränsade till en mycket liten volym i nära anslutning till bladen, enligt Figur 5.6. Dispersionsprocessen av kalk- och cementpartiklar kräver att ingredienserna är i rörelse så att erforderliga skjuvkrafter uppkommer, materialen deformeras, agglomerat bryts upp och gränsytearean mellan komponenterna ökar och skalan av segregation reduceras. Utan rörelser i materialet kan inte de blandade komponenterna distribueras i blandningen.

För varje varv redskapets blad skär igenom ett element reduceras tjockleken på denna, d.v.s. blandningsprocessen fungerar som distributiv blandning. Tyvärr så ger "normalverktyget" inte de skivade elementen någon bra möjlighet till omfördelning mellan varje skivning. Dagens redskap skivar och omfördelar troligen inte heller elementen tillräckligt många gånger vilket erfordras för att distributiv blandning skall vara effektiv som blandningsmekanism. Distributiv blandning är i regel inte lämplig som huvudsaklig blandningsmekanism vid dispersion av solida partiklar i plastiska och visköst elastiska material där höga skjuvspänningar erfordras för att agglomerat skall brytas upp.

Den huvudsakligt rådande blandningsmekanismen för normalverktyget är distributiv blandning, samt laminär skjuvning i en mycket begränsad volym i nära anslutning till bladen. För redskapets huvudsakliga uppgift, att dispergera kalk- och cementpartiklar i jord, kan man tyvärr anta att "normalverktyget" inte är särskilt effektiv eller lämplig som blandningsredskap vid alla typer av tillämpningar där pelarstabilisering används. Speciellt vid blandning i mycket lösa leror med hög vattenkvot kan den begränsade förmågan att skapa rörelser i blandningen skapa problem.

Redskapsutveckling i Skandinavien

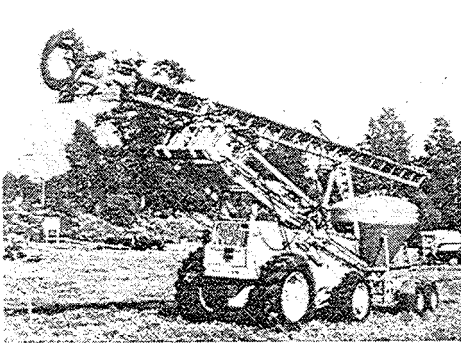
Utvecklingen av utrustning för pelarstabilisering i Sverige påbörjades i början av 1970-talet av Linden-Alimak AB och den första prototypen visas i Figur 6.24. BPA Byggnadsproduktion AB svarade för den marknadsmässiga anpassningen av metoden (Boman & Broms 1975). Under det tidiga skedet av utvecklingen provades olika typer av blandningsredskap och det redskap som visas i Figur 6.25a visade sig ge det bästa blandningsresultatet i främst lös lera. I fastare och grövre jordar gav ett mer skruvliknande verktyg ett bättre resultat. Målsättningen under det tidiga utvecklingsskedet var att erhålla en utrustning med hög produktionskapacitet. Under åren 1975 till 1979 provades flera typer av blandningsverktyg (Wikström 1979). Bl.a. provades ett blandningsverktyg med flera sned-

ställda vingar (paddlar) men det visade sig att leran fastnade kring verktyget och försvårade blandningen. Under detta utvecklingskede flyttades utmatningshålet från att ha varit placerat under den övre vingen enligt Figur 6.25a, till ett läge ovan vingen enligt Figur 6.23 och Figur 6.25b. Tyvärr är de tidiga försöken med olika redskap inte publicerade och det är därför inte möjligt att granska och kommentera försöksresultaten.

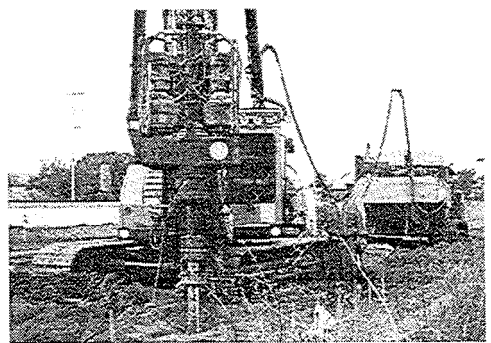
Sedan den första utvecklingen av blandningsredskap under 1970-talet har de flesta projekten utförts med blandningsredskap enligt Figur 6.23. Små variationer av detta blandningsverktyg illustreras i Figur 6.25b-d. Utvecklingen har varit mycket begränsad. På maskinsidan har dock utvecklingen varit dramatisk, vilket kan illustreras med Figur 6.24. Hur kommer det sig att utrustningen och blandningsprocessen in-situ är i princip densamma? Svaret på denna fråga kan vara den att det saknas fundamental kunskap om blandningsprocessen och de grundläggande blandningsmekanismerna. Varför saknas då denna kunskap efter nära 30 års erfarenheter?

Fram till 1990-talet användes metoden främst för att reducera sättnings och stabilisera relativt låga bankar. Från slutet av 1980-talet började dock metoden att tillämpas för att stabilisera schakter, skärningar och allt högre bankar. Kraven på kontroll ökade och man började schakta fram pelare för okulär besiktning och även hela pelare togs upp. I vissa fall uppvisade pelare en distribution av bindemedel som ej kunde accepteras av beställare. Ett svar på frågan kan alltså vara att problem avseende pelarkvaliteten inte aktualiserades förrän slutet av 1980-talet.

Utvecklingen av blandningsverktyg har varit långsam och en orsak till detta kan vara att det idag saknas incitament för entreprenörerna att utveckla nya redskap. Dagens upphandlingsförfarande med generalentreprenader och en anvisning som "rekommenderar" ett verktyg enligt Figur 6.23, leder till att det är svårt ekonomiskt för entreprenörerna att utveckla nya redskap. En annan förklaring har varit att slitaget på redskapen är stor och att mera komplicerade designar lätt går sönder (Bredenberg 1999).

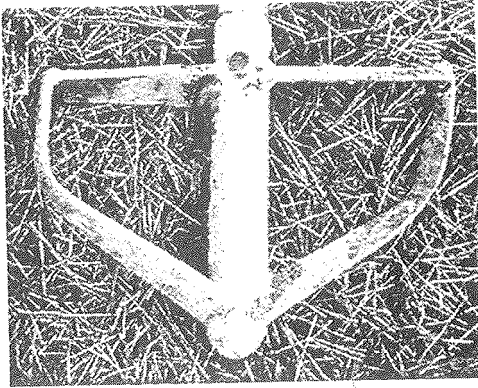
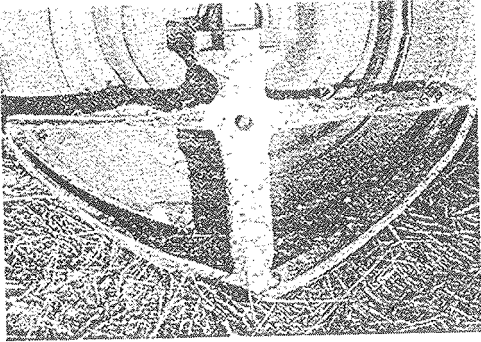


a) Kalkpelarmaskin (Broms & Boman 1975)



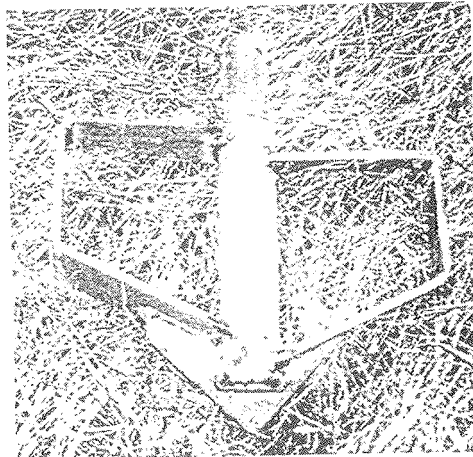
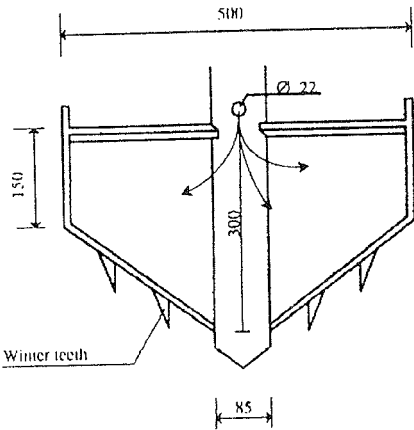
b) Kalkpelarmaskin, Junttan (Stabilatören 1999)

Figur 6.24 Utveckling på maskinsidan från den första prototypen till dagens maskintyp.



a) Blandningsverktyg från början av 1970-talet (Boman & Broms 1975)

b) Blandningsverktyg från slutet av 1990-talet (Foto: Morgan Axelsson)



c) Standardverktyg modifierat för vinterförhållanden (Rathmayer 1997)

d) Standardverktyg, Hercules (Johansson & Jons 1995)

Figur 6.25 Olika variationer på "normalverktyget".

Ett problem är att en förbättrad pelarkvalitet kan medföra att metoden blir dyrare. Det är idag väl känt att blandningsarbetet har en inverkan på pelarkvaliteten och hållfasthetsutvecklingen. Det kan vara svårt att utarbeta ett verktyg som utför ett bättre resultat men som inte kräver en större energiåtgång eller längre blandningstider. Det kan tyvärr vara så att om den pelarkvalitet som idag normalt erhålls inte kan godtas, måste en högre produktionskostnad accepteras som en följd av längre blandningstider och ökad energiåtgång.

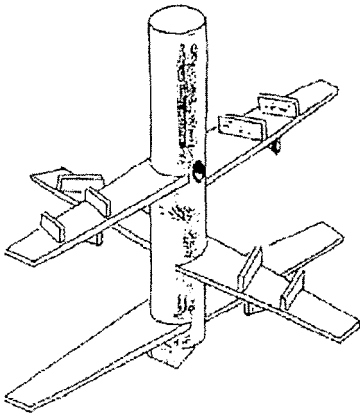
Det saknas idag redskap för uppskattning av blandningskvaliteten. Som diskuterats under sektion 4 bedöms och jämförs blandningskvaliteten ofta utifrån den färdiga produkten och ibland med metoder som inte är direkt relaterade till blandningsredskapets prestation. Svårigheterna att jämföra olika blandningsredskap i fält är således en ytterligare orsak till den långsamma redskapsutvecklingen.

Effektiviteten hos olika blandningsredskap kan variera beroende på jordens reologiska egenskaper. Det finns mycket lite kunskap om dessa egenskaper vid extremt snabba deformationsförlopp. Det beror dels på att det kanske inte funnits något större behov av sådan kunskap men också på att det är svårt att utföra sådana studier. För plastiska jordar och "långsamma" deformationer används reologiska instrument såsom skjuvboxapparater och treaxiella tryckapparater. För vätskor och fluider används reologiska instrument såsom kon- och plattviskosimeter. För konsoliderade orörda eller delvis omrörda lösa jordar utvecklas lätt glidytor (slip) enligt Figur 5.6 och det är då svårt att utvärdera några reologiska parametrar. Det är dock viktigt att poängtera att själva blandningsredskapet och blandningsprocessen som sådan är ett reologiskt mätinstrument vid kemisk pelarstabilisering. Om man mäter den tillförda kraften i systemet i form av vridmomentet så kan jordens reologiska egenskaper studeras.

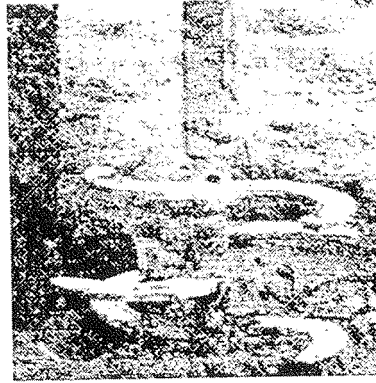
Det har dock gjorts ett antal försök att utveckla nya blandningsredskap. I regel sker försöken i mycket begränsad omfattning och mycket sällan rapporteras några resultat från sådana studier. Det är därför en stor avsaknad av erfarenheter i de Skandinaviska länderna av hur olika typer av redskap fungerar under olika förhållanden.

Figur 6.26a visar ett blandningsverktyg som har använts på många projekt av den största entreprenören i Sverige inom området. Det har dock inte kunnat visas att effektiviteten hos detta redskap skiljer sig från "normalverktyget". Om man studerar utformningen av dessa redskap torde dom inte skilja sig nämnvärt åt då de har paddlar med mycket liten vinkel mot horisontalplanet.

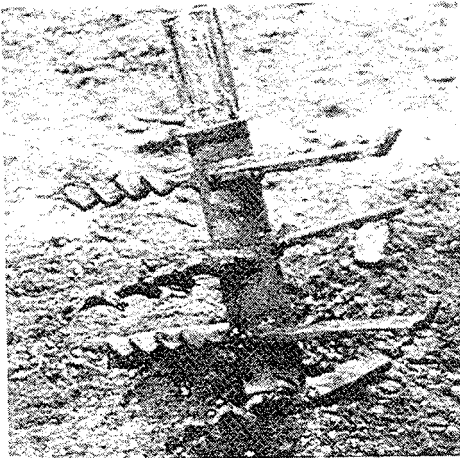
Figur 6.26b visar ett blandningsverktyg som använts i samband med cellstabilisering (Jelusic 1999, Rogbeck et al. 1999). Redskapet har böjda blad vilket leder till att jorden har svårare att fastna och dras med under blandningsprocessen. Detta fenomen kan vara särskilt påtagligt då man stabiliserar torv. Verktyget har dock en obefintlig vinkel mot horisontalplanet vilket medför att det har svårt att skapa rörelser i blandningen. Dessutom medför detta att verktygets packande förmåga är dåligt. Det vore dock intressant att studera verktygets effektivitet med blad som har större vinkel mot horisontalplanet.



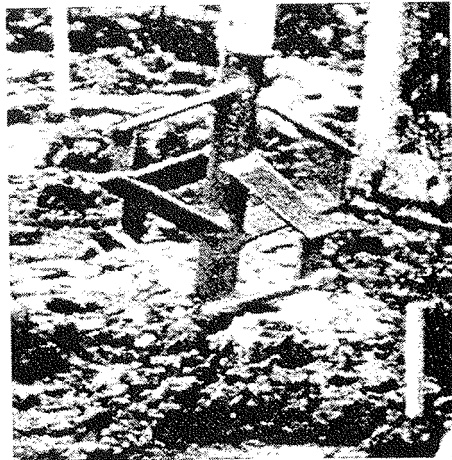
a) "Pinnborr", LC-Markteknik
(Larsson 1999)



c) Modifierat KC-blandningsverktyg som användes vid cellstabilisering
(Jelusic 1999)



c) Verktyg framtaget av Hercules-Norén
(Johansson & Jons 1995)



d) Dubbelvingat verktyg
(Johansson & Jons 1995)

Figur 6.26 Olika typer av blandningsverktyg som används eller har testats i de Skandinaviska länderna.

I samband med fältförsök som presenterades i ett examensarbete från Chalmers tekniska högskola i Göteborg, studerades ett antal olika utformningar på blandningsverktyg (Johansson & Jons 1995). Figur 6.26c visar ett verktyg där ett antal blad försätts med uppåtriktade kammar. Tanken är att blandningen skall pressas mellan dessa kammar samtidigt som materialet pressas nedåt och utåt från bladen. Tyvärr så har bladen ingen vinkel mot horisontalplanet, vilket innebär att verktyget lyfter blandningen uppåt under blandningsprocessen. Dessutom är avståndet mycket litet mellan de kammar som sitter på bladen vilket kan leda till att blandningen fastnar däremellan. Resultatet blir som Johansson & Jons (1995) observerade att detta blandningsverktyg drog med sig stora mängder av blandningen upp ur marken och stora hål uppstod. En annan konsekvens är att resterande material i pelaren blivit dåligt packat.

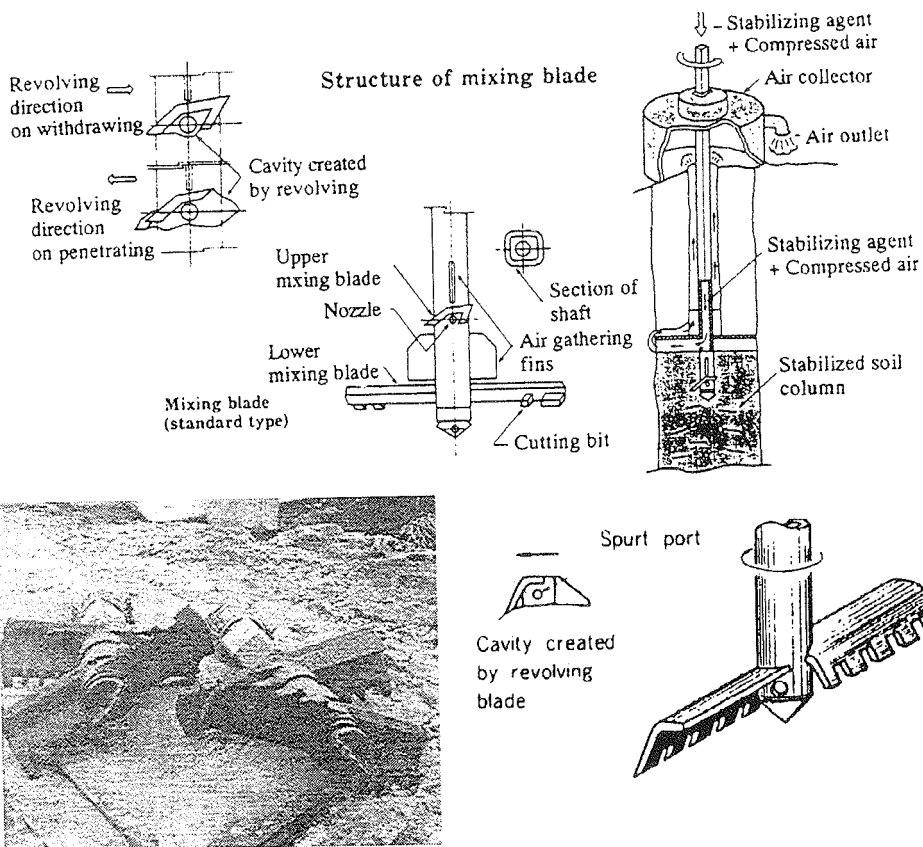
Figur 6.26d visar ett annat verktyg som studerades av Johansson & Jons (1995). Verktyget är utformat så att bladen är vinklade åt olika håll och på så sätt skapas skjuvning av blandningen i olika riktningar. Bladen på verktyget sitter dock relativt tätt och detta kan medföra att material fastnar däremellan.

Blandningsredskap i Japan

I Japan har det varit ett stort antal företag som har utvecklat olika varianter på metoden pelarstabilisering. Det har lett till att det finns ett stort antal varianter på blandningsredskap varav några visas och kort kommenteras i detta avsnitt. Det är viktigt att poängtera att det finns mängder av patent kring de utrustningar som utvecklats i Japan.

Den första metoden som utvecklades i Japan var ”den torra metoden” med osläckt kalk i pulverform som bindemedel och utvecklingen skedde parallellt med den utveckling som skedde i Sverige. Senare började Portland cement användas som förblandades med vatten. Enligt Saitoh et al. (1985) berodde denna utveckling på att man erhöll en mer likformig blandning i jorden med högre hållfasthet om bindemedlet blandades in i jorden i vätskeform. Metoden är att föredra vid ”svårare förhållanden” eftersom det blir lättare att mekaniskt blanda jorden (Bruce et al. 1998b). Pelarstabilisering med ”den våta metoden” har används i stor utsträckning i Japan speciellt i samband med marina projekt.

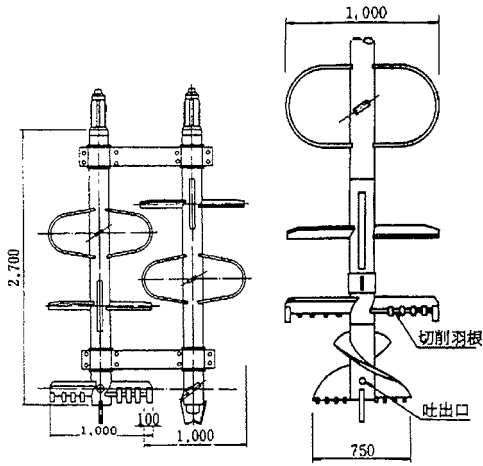
Figur 6.27 visar blandningsredskap som används vid pelarstabilisering med ”den torra metoden” och som bygger på principen att bindemedlet fördelas över pelartvärsnittet i den kavitet som bildas bakom bladen på blandningsverktyget när det roterar i jorden. Då rotationshastigheten ökar så ökar kaviteten i volym och skapar ett undertryck vilket underlättar processen vid tillverkning av pelare med stor diameter (Chida 1982). Vidare så medför denna process, enligt Chida (1982), att den inblandade luften ansluter sig till de yttre delarna av den kavitet som bildats. Luften evakueras sedan ut ur pelaren längs skaftet på blandningsverktyget.



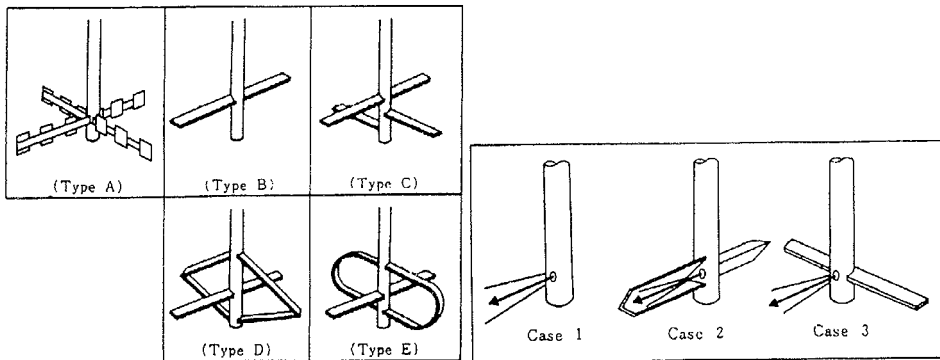
Figur 6.27 Blandningsverktyg där bindemedlet distribueras i den kaviteten som bildas bakom en paddel (Tateyama et al. 1996, Porbaha 1999 resp. Chida 1982).

Figur 6.28 visar ett blandningsverktyg som provades i början av 1980-talet (Nishibayashi et al. 1984). Verktöget och metoden kallades "Oval-DM". Detta verktyg är försedd med kombinationer av skruvar, grova- och tunna paddlar, tändar och byglar. Man testade vid den här tidpunkten också en rad olika grundutformningar på blandningsverktyg och olika sätt att inkorporera bindemedel i jorden, Figur 6.29. Bland annat testades metoden att låta bindemedlet distribueras över pelartvärsnittet i den kaviteten som bildas bakom en paddel på ett blandningsverktyg.

Det finns en rad olika sätt att injektera vattenbaserade bindemedel in i jorden. Ett vanligt tillvägagångssätt är att injektera en del av bindemedlet då blandningsverktyget roteras ned i jorden. Bindemedlet kan t.ex. injekteras från spetsen på en skruv eller paddel. När blandningsverktyget roteras ned i jorden bryter det upp jordens struktur och lyfter samtidigt jorden något, detta för att underlätta inblandningen. Resterande del av bindemedlet injekteras då blandningsverktyget roterar och lyfts uppåt. Typiska blandningsverktyg visas i Figur 6.30.



Figur 6.28 Oval-DM (Nishibayashi et al. 1984)



Figur 6.29 Olika typer av utformningar på blandningsverktyg och olika sätt att fördela bindemedlet in i jorden (Nishibayashi et al. 1984).

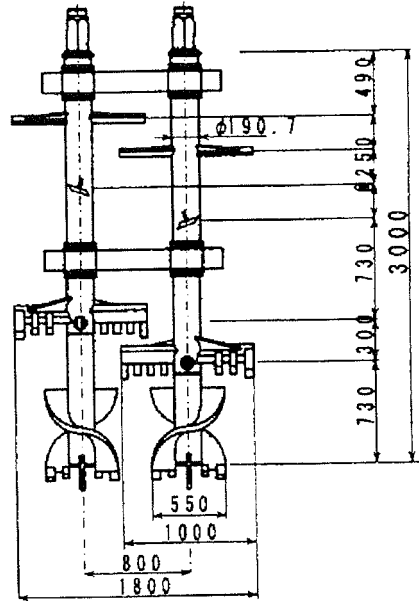
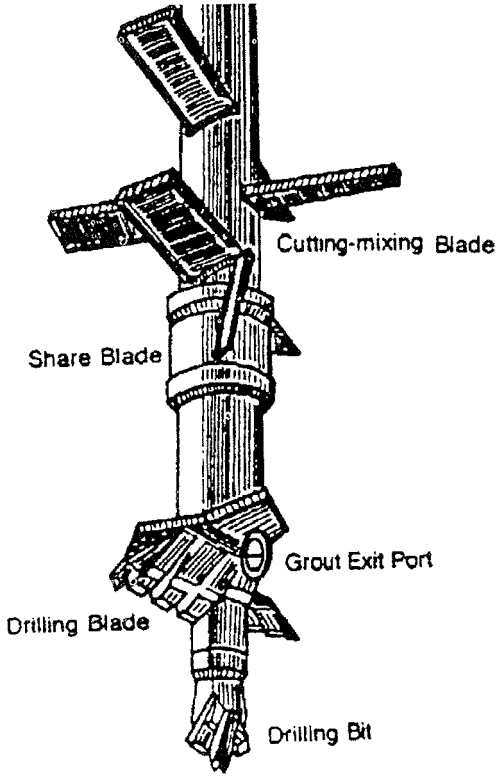
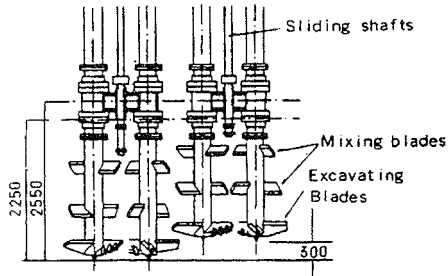


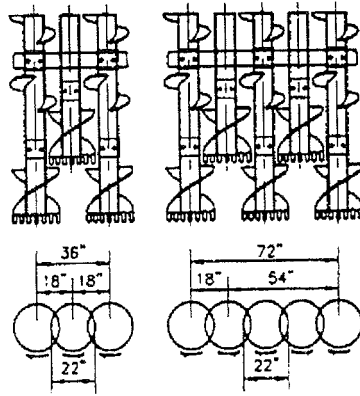
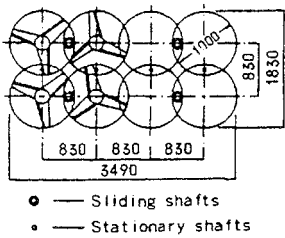
Fig. 2 Mixing Head

Figur 6.30 Blandningsverktyg vid "den våta metoden" (Taki & Bell 1998, Yoshida 1996)

I Japan installeras ofta flera pelare samtidigt med ett antal skaft och blandningsverktyg. På detta sätt kan man på ett rationellt sätt konstruera en rad olika konfigurationer såsom block, galler, väggar etc. (t.ex. Kawasaki et al. 1981, Nicholson 1998). Det är vanligt att armera dessa pelare med H-balkar (Shaefer et al. 1997). Figur 6.31 visar några olika typer av sammansättningar av blandningsverktyg.

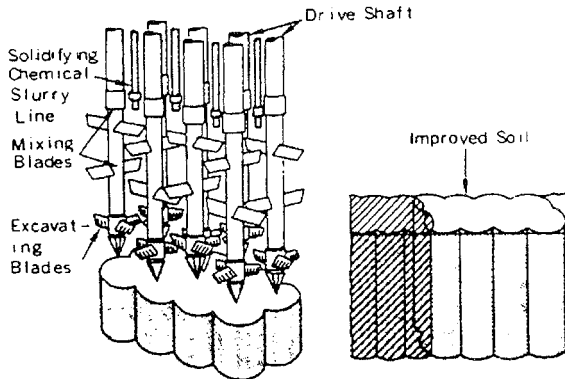


ig. 2.2(b) Deep Chemical Mixer

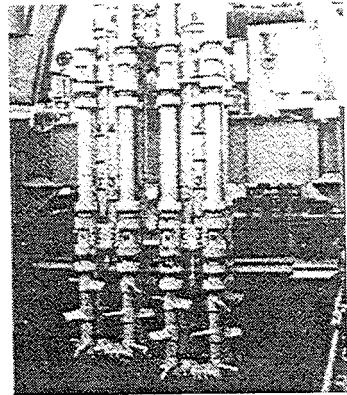


Kawasaki et al. (1981)

Taki & Yang (1990)



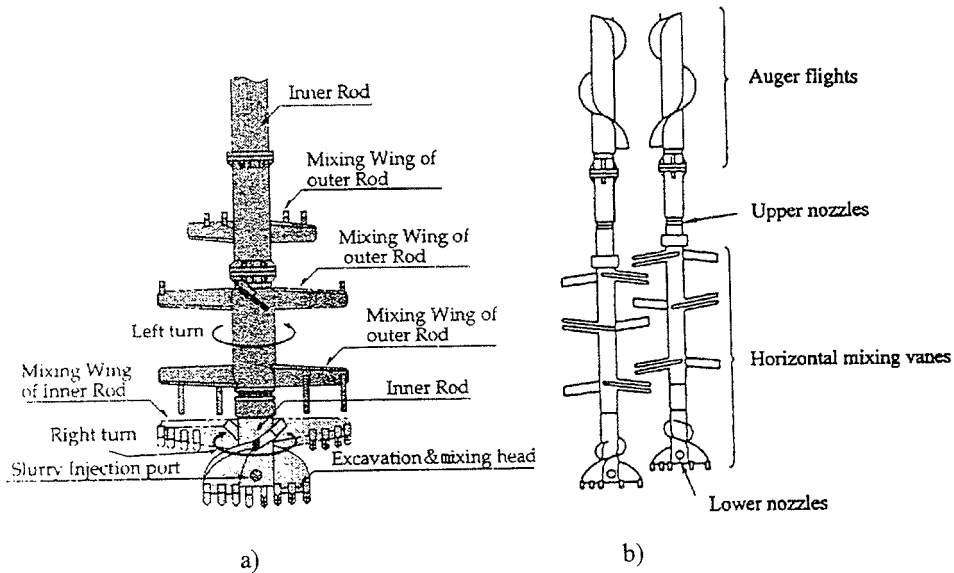
Kawasaki et al. (1984)



Kawasaki et al. (1981)

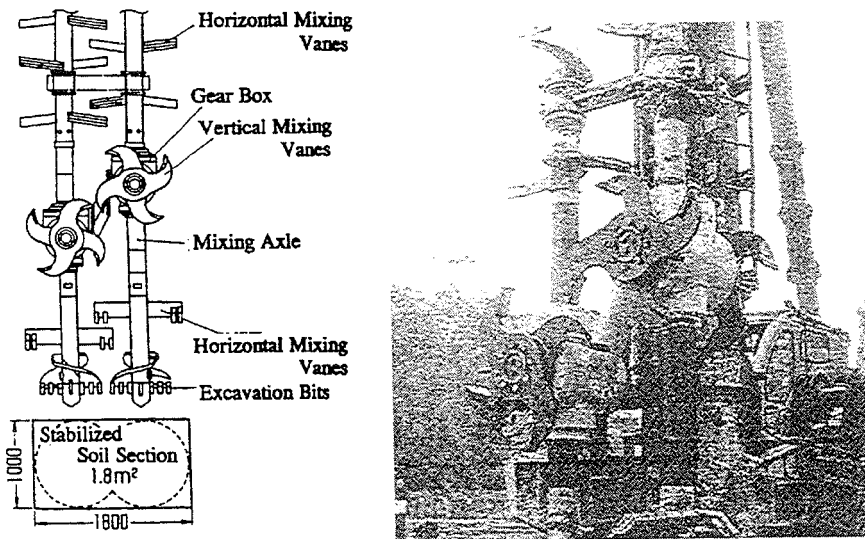
Figur 6.31 Blandningsverktyg som tillverkar ett antal pelare samtidigt.

Figur 6.32a visar ett blandningsverktyg som tillverkar pelare med diametrar mellan 1,4 och 2,0 m. Genom att förse verktyget med en yttre och en inre stång som roterar i olika riktningar är det möjligt att blanda friktionsmaterial. Figur 6.32b visar ett verktyg som är försett med en skruv som kompenserar för den volymökning som sker i jorden då binde-medlet injekteras. Denna volymökning kan orsaka horisontella förskjutningar i jorden.

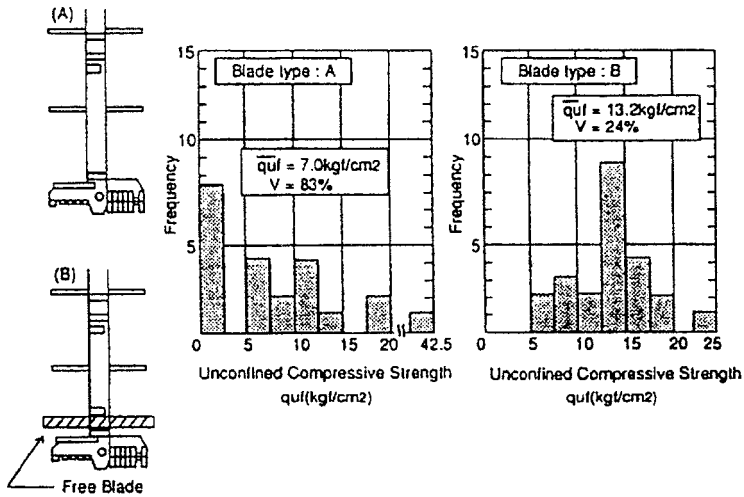


Figur 6.32 a) Blandningsverktyg för stora pelardiametrar i friktionsjord (Isobe 1996).
 b) Blandningsverktyg som kompenserar för volymökning i samband med injektering av bindemedel (Hirai et al. 1996).

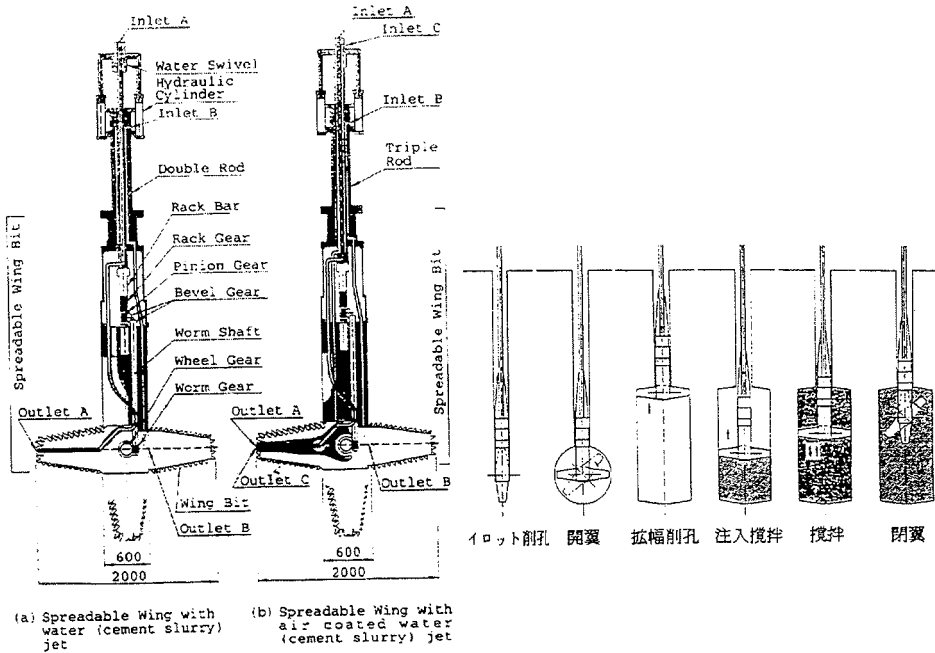
I Japan har det också varit populärt att installera rektangulära pelare. Denna teknik utvecklades under början av 1980-talet (Khono 1984). Exempel på sådana utrustningar visas i Figur 6.33.



Figur 6.33 Blandningsutrustning för rektangulära pelare (Watanabe et al. 1996).



Figur 6.34 Effekten av "anti-rotation-vingar" (Yoshizawa 1997)



Figur 6.35 Kombination av pellarstabilisering och jetpelare, SWING-metod (Kawasaki et al. 1996, Ogawa et al. 1990)

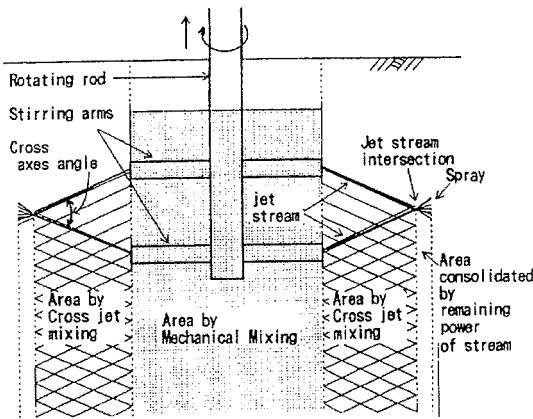


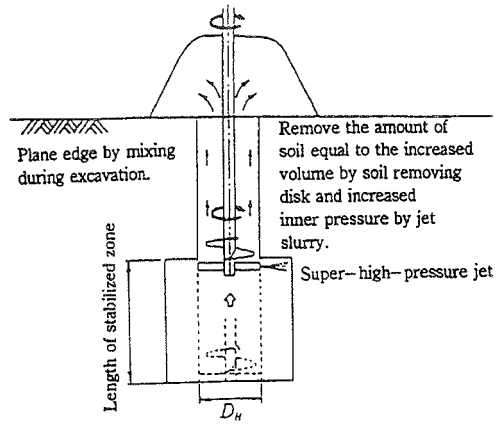
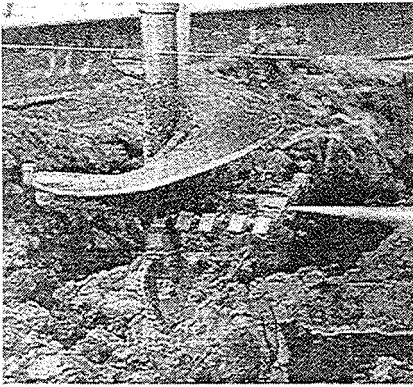
Fig. 1 Overview of cross jet mixing

	Penetration (mechanical mixing)	Lifting (cross jet operated)
Method of work		
Elevation velocity	V = 1.0 m/min	V = 0.5 m/min
Rotation of rod	R = 20rpm	R = 20rpm
Diameter	$\phi_r = 1m(A_r) = 0.785m^2 \times 2$	$\phi_r = 1.9m(A_r) = 2.83m^2 \times 2$
Quantity of cement slurry	$q=200 \text{ l/min} \times 2$	pressure $q=150 \text{ l/min} \times 4 \text{ nozzle}$ $P= 3000N/cm^2$ (air vol: $q=1 \text{ m}^3/\text{min} \times 4 \text{ nozzle}$)

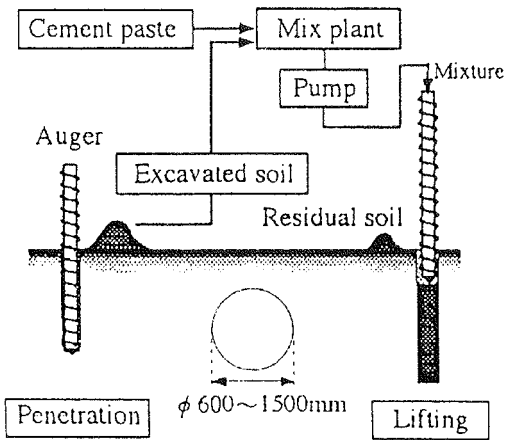
Figur 6.36 Kombination av pelarstabilisering och jetpelare, JACSMAN (Miyoshi 1996)

Figur 6.34 visar effekten av att förse blandningsverktyget med ”anti-rotations-vingar”, vilka förhindrar materialen i blandningen att rotera ihop med verktyget. Eftersom dessa vingar inte roterar i jorden har de effekten att fungera som ett visst motstånd då de övriga roterande bladen passerar. Blandningsmekanismerna runt detta redskap är således liknande de som erhålls i de blandningsutrustningar som visas i Figur 3.9. Även redskapet i Figur 6.30 är försett med blad som inte roterar under blandningsprocessen. Dessa vingar är något längre än de övriga bladen så att de skär in i omgivande jord och får således ett stöd. Tekniken presenterades dock redan 1986 av Enami et al. (1986b).

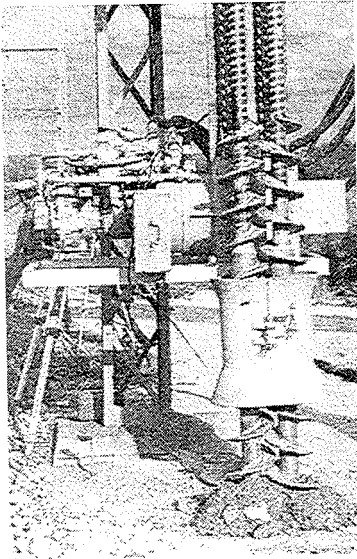
Figur 6.35 - 6.37 visar olika metoder som är kombinationer av pelarstabilisering med mekanisk blandning och jetpelare. Den främsta fördelen med dessa metoder är att de kan producera pelare med stora diametrar utan några stora och skrymmande blandningsredskap. Den äldsta av dessa metoder är SWING som utvecklades i början av 1980-talet (Kawasaki et al. 1996, Yang et al. 1998, Ogawa 1990). Det har sedan utvecklats nya metoder där jetpelartekniken vidareutvecklats (t.ex. Miyoshi 1996, Mori et al. 1997, Ueki et al. 1996).



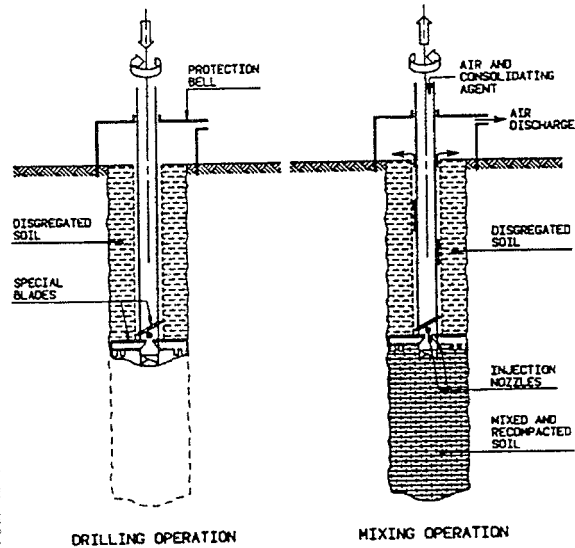
Figur 6.37 Kombination av pelarstabilisering och jetpelare, LDis-metod (Ueki et al. 1996)



Figur 6.38 Verksblandad pelarstabilisering (Mori et al. 1997).



a)



b)

Figur 6.39 a) Colmix (Bachy 1999)

b) Trevimix (Paviani, A. and Pagotto, G. 1991)

En ny metod som provats i Japan illustreras i Figur 6.38. En kontinuerlig skruv används för att blanda jorden och bindemedel. I ett första skede transporteras jord upp till markytan när det skruvformade verktyget roteras ned i jorden. Jorden blandas sedan i ett blandningsverk tillsammans med ett vattenbaserat bindemedel för att sedan pumpas tillbaka ner i jorden samtidigt som verktyget skruvas uppåt. Med denna metod erhålls en kontrollerbar produkt som kan liknas vid betong där hållfasthets- och deformationsegenskaperna kan varieras.

Övriga länder

Utrustningar för pelarstabilisering har även utvecklats i andra länder såsom England och Italien (Harnan 1993 resp. Paviani & Pagotto 1991). I Figur 6.39 visas ett par av dessa utrustningar som använts i Europa.

Colmix- metoden som utvecklats av Bachy i slutet av 1980-talet går ut på att blanda jorden med ett vattenbaserat eller torrt bindemedel med hjälp av ett skruvformat verktyg. Bindemedlet injekteras då verktyget skruvas ned i jorden. Då verktyget roteras upp ur jorden blandas och packas blandningen.

Trevimix- metoden är utvecklad i Italien och har många likheter med den Japanska metoden som visas i Figur 6.27.

6.7 Diskussion kring några karaktäristiska defekter

Gryniga pelare

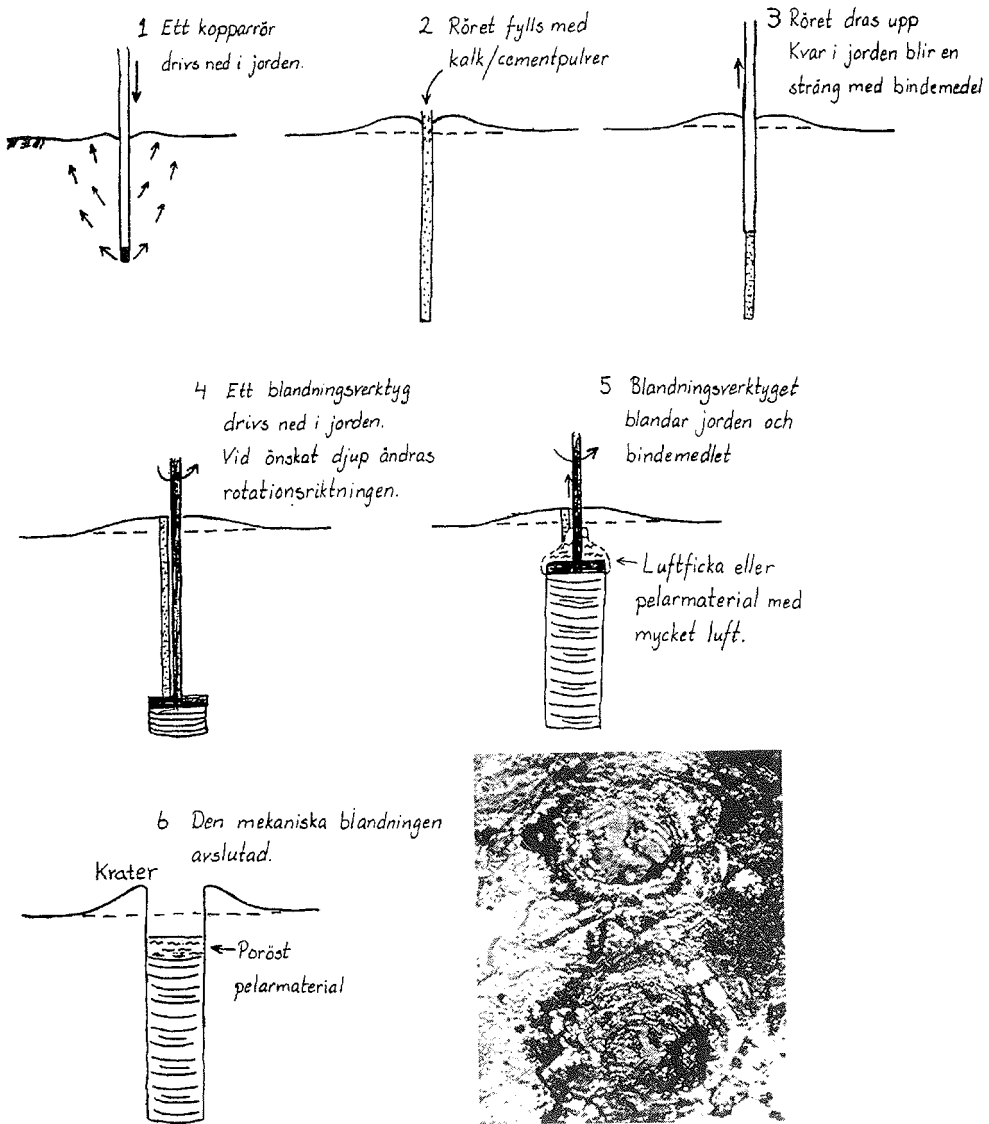
I samband med okulära besiktningar där pelartoppen schaktats fram kan ofta en grynig och porös struktur observeras. Detta fenomen kan hänföras till ett för dåligt packningsarbete. Vid inblandning av bindemedel i jorden sjunker vattenkvoten samtidigt som plasticitetsgränsen ökar och jorden erhåller en mer granulat karaktär. Det bildas klumpar med en strukturomvandling som är lokaliserad till ytan på klumparna. Om inte det stabiliserade materialet packas inom en relativt kort tid (några dagar) kommer materialet ha en låg densitet med låg hållfasthet.

Fenomenet är speciellt tydligt i den överliggande torrskorpeleran men kan även uppträda längre ner i pelaren i de lösa jordlagren. Gryniga pelare med klumpar kan då bero på att all luft inte evakuerats ur pelaren. Återigen beror då fenomenet på att det varit otillräcklig packning.

Kratrar

Ett vanligt förekommande fenomen vid pelarstabilisering är uppkomsten av kratrar. Djupet på dessa kratrar varierar från några decimetrar till ett par meter. Fenomenet kan enklast illustreras genom att studera blandningsprocessen vid pelartillverkning i modellskala (Larsson 1999). I samband med tillverkning av kalkcementpelare med diametern 50 mm och längden 500 mm i en skjuvbox observerades en tydlig kraterbildning. Figur 6.40 visar tillverkningsprocessen där ett rör fördes ned i jorden. Röret var förseglat i änden med hjälp av en stång med en plugg i änden. Då röret fördes ned trängdes jorden undan och en liten hävning av överytan motsvarande rörets volym skedde. Stången drogs ur röret som sedan fylldes med bindemedel i torrt tillstånd. Då röret sedan drogs ur jorden erhöles en sträng med luft och bindemedel i jorden. Ett blandningsverktyg med diametern 50 mm roterades ned till önskat djup. Rotationsriktningen ändrades och blandningsverktyget drogs uppåt. De vinklade bladen på blandningsverktyget utförde ett packningsarbete samtidigt som dispergeringsprocessen av bindemedlet utfördes. Under denna process följer luften med blandningsverktyget uppåt. När denna luft når markytan uppstår en krater. I fält kan också blandningsverktyget dra med sig den styvare överliggande torrskorpan uppåt och på så sätt förstärka kratereffekten.

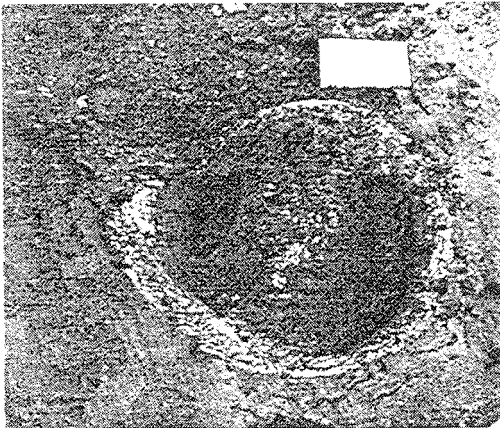
Hur djup denna krater blir beror främst på mängden inblandad luft, jordens reologiska egenskaper och blandningsverktygets packande egenskaper. En hypotes är att då jorden är mycket lös och beter sig som en vätska är det lättare att evakuera luften och således blir kratern djupare. Då jorden är styvare har blandningsverktygets packande egenskaper stor inverkan på hur mycket luft som följer med uppåt. Om dessa egenskaper är dåliga finns risk att stor del av den inblandade luften stannar kvar i pelaren och således blir kratern grund och pelaren kan få en porös och grynig karaktär.



Figur 6.40 Kraterbildning vid pelarstabilisering i modellskala.

Morots- eller rörformade pelare

Ojämn fördelning av stabiliseringsmedel kan leda till att stabiliseringsmedlet ansamlas kring pelarens periferi eller kring pelarens inre delar, Figur 6.41. Detta kan vara ett resultat av att stabiliseringsmedlet fördelas till jorden med en jet. Med det höga lufttryck som används vid utblåsning av stabiliseringsmedel spräcks jorden upp genom hydrauliskt brott i leran och skapar sprickgångar där stabiliseringsmedlet lätt transporteras utan att blandas med omgivande jord. Denna process kan leda till att det blir stora koncentrationsvarianser i bindemedelshalten över pelartvårsnittet. Blandningsredskapet har sedan inte lyckats dispergera stabiliseringsmedlet över tvärsnittet under den relativt korta blandningstiden. Av samma orsak kan stabiliseringsmedel samlas kring pelarens inre delar. Morotsformade pelare där pelarens diameter minskar med djupet kan uppkomma då jetstrålen inte förmår att fördela stabiliseringsmedlet över hela tvärsnittet. Problemet blir större med djupet eftersom jorden ofta har bättre hållfasthetsegenskaper med djupet, d.v.s. jordens reologiska egenskaper kan förändras då trycket ökar och jorden får ökad flytspänning. Det kan alltså krävas ett större arbete för att jorden skall brytas upp i erforderlig omfattning. Såsom blandningsredskapen är utformade idag skapas inte de erforderliga rörelser som erfordras för att de ingående komponenterna i blandningen skall distribueras i den blandade volymen. Den korta blandningstiden är också en orsak till den dåliga distributionen.



Figur 6.41 Exempel på ansamling av bindemedel kring pelarens periferi (Axelsson & Larsson 1994)

Det är självklart att det är önskvärt med korta blandningstider i alla typer av blandningsprocesser. Vid många tillämpningar är det dock inte möjligt att åstadkomma ett tillfredsställande resultat med korta blandningstider p.g.a. begränsningar hos utrustningen, vanligtvis brist på tillräckligt kraftfull utrustning.

7. Bedömning av blandningskvalitén – fältförsök Arboga

7.1 Inledning

Djupstabilisering av lösa jordar med kalkcementpelare används i mycket stor omfattning vid utbyggnaden av infrastrukturen i Sverige. Nya och allt djärvare tillämpningar såsom släntstabilisering och stabilisering av höga bankar ställer allt högre krav på pelarnas kvalitet avseende bindemedelspridningen för att erhålla förutsägbara och kontrollerbara egenskaper. Funktionen hos pelarstabiliseringen i olika tillämpningar ställer olika krav på pelarnas egenskaper. Kraven på likformighet med avseende på distributionen av bindemedel i pelarna kan därför variera utifrån de krav som ställs på slutprodukten. Nya tillämpningar kan erfordra en bättre blandningskvalitet och en bättre kontroll av tillståndet i blandningen. Både beställare och entreprenörer behöver metoder för att bedöma blandningskvalitén.

Det finns idag ingen rutin för kontroll och bedömning av blandningskvalitén med avseende på bindemedelspridningen över pelarvolymen. Rutinkontroller såsom kalkpelarsonderingar, som utförs för att bedöma hållfastheten och kontinuiteten i pelare, är normalt inte lämpliga för att bedöma blandningskvalitén eftersom hållfasthetsegenskaperna i stabiliserad jord beror av fler faktorer än effektiviteten hos blandningsprocessen.

I kapitel 4 diskuterades statistiska modeller och olika typer av blandningsindex för kvantitativa bedömningar av kvalitén i olika typer av blandningar. Kapitlet baseras på erfarenheter och metoder främst använda i processindustrin. I samband med pelarstabilisering har blandningsindex och statistiska modeller endast använts i samband med ett fåtal studier utförda i Japan. Muro et al. (1987a,b) använde ett blandningsindex för att uppskatta blandningsgraden i laboratorietillverkade provkroppar. Blandningsgraden användes för att kvantitativt bedöma inverkan av olika faktorer i blandningsprocessen såsom blandningstiden (antalet rotationer hos ett blandningsverktyg) och rotations-hastigheten. Resultat från studien finns redovisade i Kapitel 6, Figur 6.7-6.9. Också Nishida et al. (1996) använde ett blandningsindex för att uppskatta blandningsgraden i laboratorietillverkade provkroppar. Blandningsgraden användes för att studera hur blandningstiden och jordens sensitivitet påverkar blandningskvalitén. Resultat från studien finns redovisade i Kapitel 6, Figur 6.10.

För att bedöma blandningskvalitén som funktion av blandningstiden på stabiliserad jord på laboratorie, uppmätte Omine et al. (1998) färgvariationer i det stabiliserade materialet och definierade en förstärkningsgrad (improvement ratio) som den förstärkta ytan per den totala ytan. Detta mått på förstärkningsgraden användes för att validera en föreslagen modell för förutsägelse av spänning - töjnings samband hos blandningar av olika material.

I samband med kvalitetskontroll (hållfasthetsegenskaper) av stabiliserad jord används allt mer statistiska analyser för utvärdering av resultaten. Kvalitetsindex, uttryckt som variationskoefficienten, har använts av Porbaha et al. (1999) för att utvärdera resultat från

CPT-sonderingar i cementstabiliserad jord (masstabilisering). Kvalitetsindexet föreslås bilda basen för kvalitetskontroll för stabiliserad jord i denna studie. I Finland används en statistisk modell där medelvärde och standardavvikelse används för att utvärdera resultat från pelarsonderingar (Halkola 1999). Utvärderingar görs med avseende på hållfasthetsparametrar.

I Sverige har det utförts ett antal studier där man har försökt bedöma blandningskvaliteten utifrån subjektiva okulära besiktningar. Sådana studier har redovisats av bl.a. Larsson och Axelsson (1994), Johansson och Jons (1995) och Holm et al. (1999).

Det har dock inte publicerats några omfattande studier av blandningskvaliteten med avseende på bindemedelspridningen där direkta uppmätningar på bindemedelshalter gjorts. Föreliggande studie syftar till att studera spridningen av bindemedel i produktions-tillverkade kalkcementpelare genom att mäta bindemedelshalten i upptagna prover. Prover är tagna från olika pelare, från olika djup och från olika delar av pelartvårsnittet för att studera inverkan av dessa parametrar. Prover är också tagna i olika storlekar för att studera inverkan av provkroppsstorleken.

Ett syfte med den föreliggande studien är också att studera huruvida statistiska analyser och blandningsindex kan användas för att göra bedömningar av blandningskvaliteten i kalkcementpelare. Studien syftar dock inte till att göra bedömningar av hur bra blandningskvaliteten måste vara för att pelarna i konstruktionen skall uppfylla ställda krav på t.ex. hållfasthets- och deformationsegenskaper.

I studien är bindemedelshalten presenterad som kalciumoxidhalten, där antagandet görs att alla kalciumjoner kommer från kalken och cementen i bindemedlet. Som ett komplement till de kemiska analyserna och uppmätningen av kalciumoxidhalten är vattenkvot, pH och den elektriska konduktiviteten analyserad för ett antal prover.

7.2 Metoder och material

Provtagningsplats och provpelare

I samband med forskningsprojektet "Produktionsmässiga kontrollmetoder vid djupstabilisering med kalk/cementpelare", installerades ett antal provpelare (Axelsson & Rehnman 1999). Pelarna användes till att studera olika kontrollmetoder, främst olika typer av pelarsonderingar. För olika typer av provtagning och okulära besiktningar togs ett antal hela pelare upp med ett delat provtagningsrör, Figur 7.3. Upptagningsförfarandet och omfattningen av fältförsöken finns redovisat av Axelsson & Rehnman (1999). Fältstudien presenterad av Axelsson & Rehnman (1999) och föreliggande studie samordnades i samband med upptagningen av hela pelare.

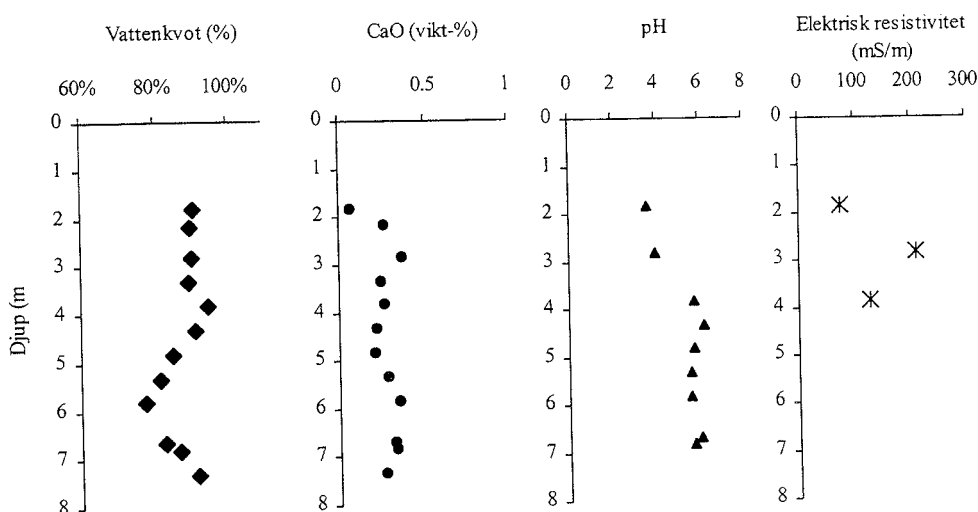
Provfältet är benäget strax utanför Arboga i anslutning till motorvägsprojektet E18 mellan Arboga och Örebro. Jorden består på den aktuella platsen av en mycket lös lera ned till 8 meters djup. Tabell 7.1 och Figur 7.1 visar resultat från analyser på jordprover från provplatsen.

Tabell 7.1 Några av försöksjordens geotekniska egenskaper

Djup	Jordtyp	Densitet	Flytgräns ^a	Plasticitets- index	Sensitivitet ^a	Odränerad skjuvhållf. ^a	Rapiditet ^b
		(t/m ³)	(%)	(%)	(-)	(kPa)	
2,0	Brungrå lera (inslag av torrskorpa)	1,49	102,8	62	7	35,5	3-4
3,0	Grå lera	1,49	84,2	54	15	22,5	
4,0	Grå sulfidfläckig lera	1,49	65,9	35	25	14,0	5
5,0	Grå sulfidfläckig lera	1,53	60,7		32	13,7	6
6,0	Grå lera	1,56	56,6	30	36	14,3	6
7,0	Grå varvig lera	1,49	79,6	52	19	9,0	

^a Enligt konförsök, Svensk Standard.

^b Enligt Söderblom (1974).



Figur 7.1 Resultat från laboratorieanalyser på jordprover från provplatsen, Arboga.

Provpelarna tillverkades på samma sätt som produktionspelarna på motorvägsprojektet. Installationsdata visas i Tabell 7.2.

Tabell 7.2 Installationsdata för testpelarna

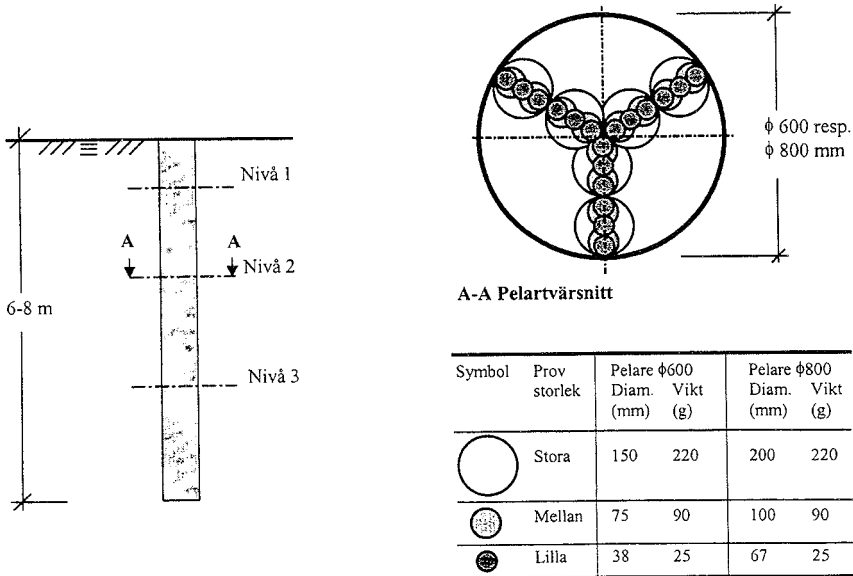
Parameter	Nominellt värde
Pelardiameter	φ600 resp. φ800 mm
Pelarlängd	6-8 m
Bindemedel; Typ, förhållande	Kalk/Cement, 50/50
Bindemedelsmängd	82 kg/m ³ (23kg/m, φ600 mm pelare)
Blandningsverktyg	Pinnborr
Rotationshastighet	180 varv/min
Stigning	20 mm/varv

Under tillverkningsprocessen registrerades mängden bindemedel och rotations-hastigheten på blandningsverktyget. På den aktuella maskintypen är stigningen på blandningsverktyget en fix parameter, d.v.s. det går inte att variera stigningen under det att en pelare tillverkas. Registreringen från maskinen visade mycket små variationer avseende det nominella värdet på inblandad mängd bindemedel och rotationshastighet.

Det blandningsverktyg som användes går under namnet "pinnborr", Figur 6.24a. Verktyget har 6 stycken paddlar i tre nivåer.

Provtagningsförfarande

I tre sektioner på tre olika nivåer togs prover från ett antal pelare, Figur 7.2 och Figur 7.3. För den föreliggande studien är prover från fyra stycken pelare analyserade och redovisade. Två pelare hade diameter 600 mm (pelare 16 och pelare 26) och två pelare hade diametern 800 mm (pelare 43 och pelare 53). Proverna togs inte utifrån ett slumpmässigt provtagningsmönster utan i ett förutbestämt mönster enligt Figur 7.2. Detta förutbestämde mönster är valt för att enkelt kunna visa en radiell spridning av bindemedel, från centrum av pelaren ut mot pelarperiferin. De blandningsverktyg som idag används i Sverige har ett utblåsningshål för bindemedlet placerat på Kellystängens. Detta innebär att bindemedlet blåses ut från centrum av pelaren ut mot pelarperiferin. Utifrån detta sätt att blanda in och fördela bindemedlet har en hypotes ansatts. Det första skedet i dispergeringsprocessen enligt Figur 6.1, är det skede som har störst inverkan på den pelarkvalitet som uppnås i en pelare.



Figur 7.2 Provtagningsprocedur



Figur 7.3 Provtagning i fält (Foto: Morgan Axelsson).

Proverna togs i tre olika storlekar, benämnda "lilla", "mellan" och "stora" skalan, för att studera provstorlekens inverkan på den utvärderade blandningskvaliteten. Som diskuterats under kapitel 4, har skalan av betraktelse en stor inverkan då en pelarkvalité utvärderas. Vidare togs proverna i tre olika riktningar, 0° , 120° och 240° utifrån pelarcentrum, för att studera bindemedelspridningen över tvärsnittet. Denna provtagningsmetodik medför främst en tvådimensionell betraktelse av blandningskvaliteten i tre nivåer i varje pelare.

Laboratorieanalyser

Proverna togs in på laboratorie där vattenkvot och bindemedelsmängd analyserades på alla 432 prover. Vattenkvoten bestämdes enligt svensk standard SS 02 71 16. De torra proverna maldes sedan med en kvarn. Från det homogeniserade, pulveriserade materialet togs 0,5 gram av resp. prov som löstes upp med 50-procentig saltsyra. Jorden filtrerades bort och lösningen späddes ut 1000 gånger. Den utspädda lösningen analyserades sedan med avseende på kalciumjonkoncentrationen, Ca^{2+} , med OES-ICP (Atomemissionsspektroskopi i induktiv kopplat plasma). Halten Ca^{2+} (vikt-%) är torrviktskoncentrationen av kalciumjoner i det torra provet uttryckt i procent. Ekvivalent kalciumoxidhalt, CaO, erhålls genom att multiplicera halten Ca^{2+} med molmassan för CaO, delad med molmassan för Ca. Analysmetoden visar dock inte om kalciumjonerna kommer från den inblandade kalken eller cementen. Den nominella mängden bindemedel, 82 kg/m^3 , motsvarar grovt en CaO-halt på 7 % (CaO-halten omräknad från mängden bindemedel enligt Tränk & Johnson 1997). CaO-halten i den ostabiliserade jorden är låg, 0,1-0,4 % och försummas därför vid utvärderingen av bindemedelspridningen i pelarna. All CaO antas komma från binde-medlet.

Ett antal trippelförsök utfördes för att studera repeterbarheten vid provberedningen samt analysmetoden. Resultaten visade att CaO-halten är utvärderad med en noggrannhet av $\pm 0,2\%$ vid den aktuella studien. Detta felintervall gäller för prover med relativ hög halt CaO, $>5\%$.

För 40 prover från de fyra pelarna analyserades och utvärderades pH samt elektrisk konduktivitet enligt svensk standard SS-ISO 10 390 resp. SS-ISO 11 265. Alla dessa analyser utfördes på prover från mellan- storleken.

Vid analys av pH utfördes ett antal dubbelprover som alla visade att pH kunde bestämmas med en decimals noggrannhet. Vidare utfördes ett stort antal pH-mätningar vid olika tidpunkter efter skakning. Även denna studie visade att pH kunde bestämmas med en decimals noggrannhet. Vid kalibrering användes buffertlösningar med pH 7 och pH 10 vilket kan medföra en lägre noggrannhet för prover med lågt pH. Proverna är torkade vid temperaturen 105°C vilket är betydligt högre än 40°C som standarden anger som den högsta temperaturen.

Vid analys av den elektriska konduktiviteten visade ett antal trippelprover att variationen var något större än den standarden anger, c:a 15% mot standarden $<10\%$. En undersökning av orsaken till detta visade att luftkontakt under filtreringen minskade konduktiviteten. Svensk standard nämner dock ingenting om detta.

Statistisk analys

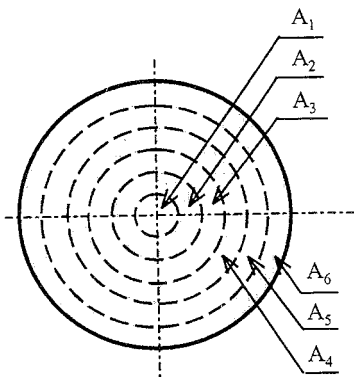
Utifrån resultaten från de kemiska analyserna och utvärderingen av CaO-halt i proverna utfördes ett antal statistiska analyser för kvantitativ bedömning av blandningskvalitén i de fyra provpelarna.

Provtagningsmetodiken enligt Figur 7.2 innebär att provtagning i de inre delarna av pelarna är överrepresenterade och att de yttre delarna är underrepresenterade. Eftersom provtagningen inte skett enligt en slumpmässig provtagningsprocedur har en metod för viktning av proverna med hänsyn till läge använts. För varje serie av prover tagna från pelartvårsnitten har medelvärdet och variansen utvärderats som

$$\bar{a} = \frac{\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{n_s} (a_{ij} \times \alpha_i)}{3 \times \sum_{i=1}^{n_s} \alpha_i} \quad (7.1)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^{n_s} ((a_{ij} - \bar{a})^2 \times \alpha_i)}{3 \times \sum_{i=1}^{n_s} \alpha_i - 1} \quad (7.2)$$

där a är halten kalciumoxid uppmätt i resp. prov. Proverna är numrerade från centrum av pelarna, $i=1$ till $i=n_s$, där $n_s=6$ för den lilla skalan och $n_s=4$ och $n_s=2$ för mellan skalan respektive den stora skalan. Proverna är tagna i tre riktningar från pelarcentrum, numrerade $j=1$ till $j=3$. Halten a_{ij} antas gälla för hela arean $A_i/3$, enligt Figur 7.4. Koefficienten α representerar area relationen som proverna representerar enligt Figur 7.4.



Area kvot, $\alpha_i = A_i/A_1$

i	α_i
1	1
2	3
3	5
4	7
5	9
6	11

Pelarsektion

Figur 7.4 Areaförhållande mellan olika provtagningslägen

Utifrån resultaten har variationskoefficienten utvärderats som standardavvikelsen delad med medelvärdet.

Två olika blandningsindex har utvärderats i studien (enligt Miles 1962 resp. Rose & Robnsson 1965)

$$M^1 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_0^2} \quad (7.3)$$

och

$$M^2 = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (7.4)$$

där variansen σ^2 är utvärderade enligt ekvation 7.2 ovan och variansen för en fullständig segregerad blandning σ_0^2 är utvärderad enligt (Lacey 1943)

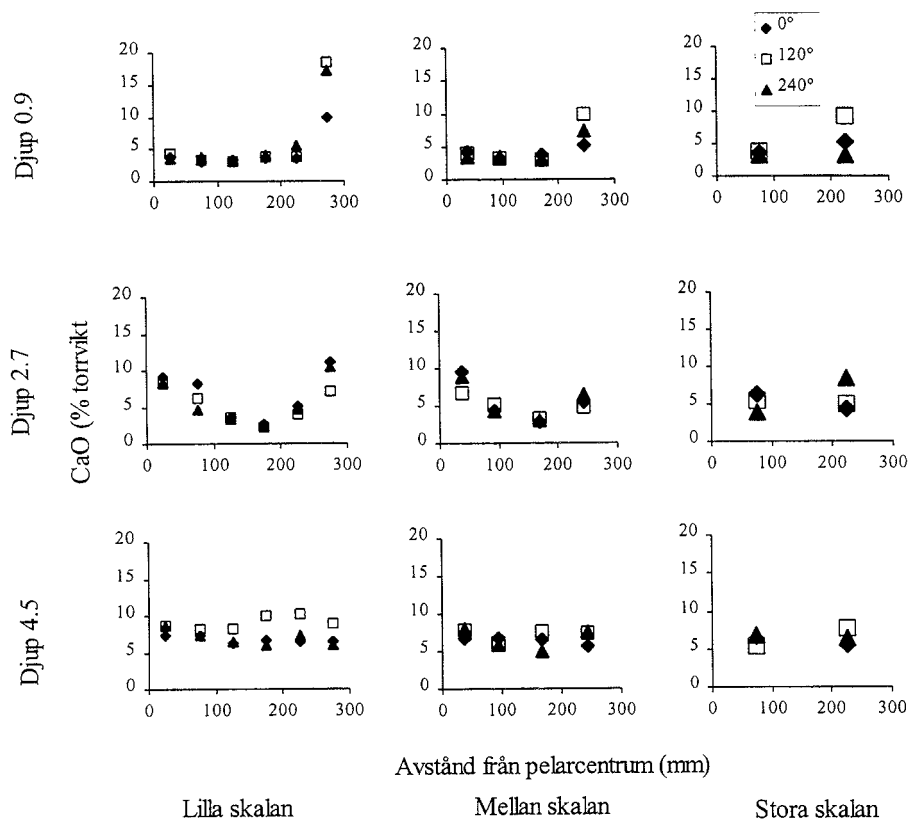
$$\sigma_0^2 = \bar{a}(1 - \bar{a}) \quad (7.5)$$

7.3 Resultat

CaO-halt samt statistisk analys

Resultaten från de kemiska analyserna och utvärderingen av CaO-halten är redovisade i Figur 7.5-7.8. Resultaten från den statistiska utvärderingen är presenterad i Tabell 7.3-7.6.

CaO-halterna samt den statistiska analysen är redovisade för en pelare i taget, d.v.s. den första sidan redovisar resultaten från pelare 16, den andra sidan resultaten från pelare 26 o.s.v.



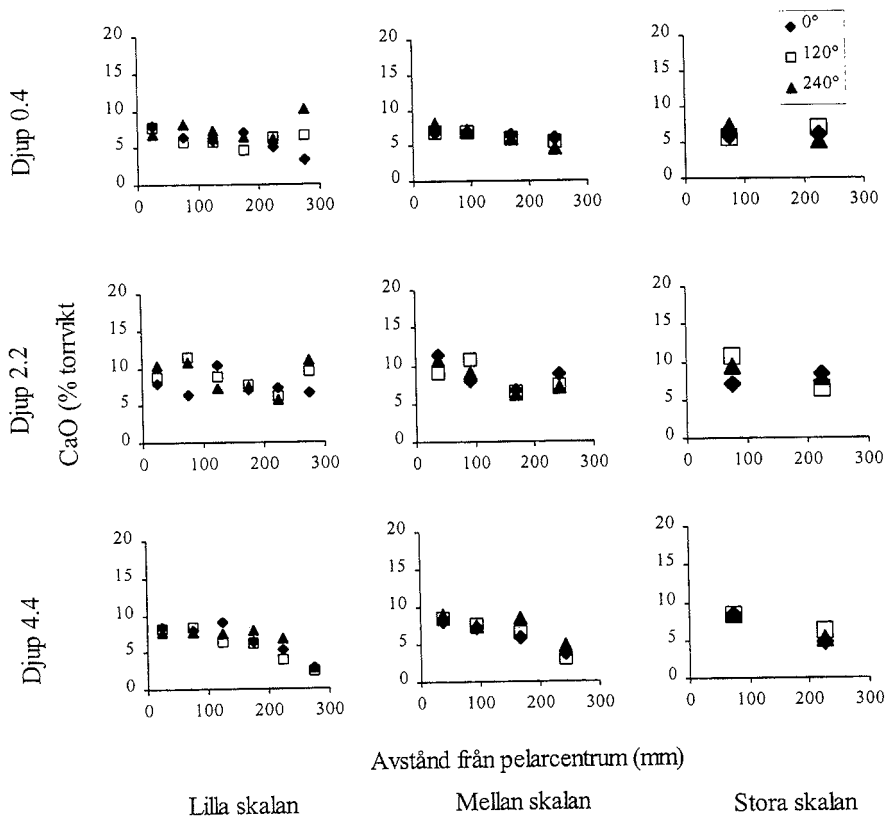
Figur 7.5 Resultat från den kemiska analysen på prover från pelare 16.

Tabell 7.3 Sammanställning av den statistiska analysen för pelare 16.

Pelare	Provstorlek	Djup (m)	Medelvärde (vikt- %)	Varians	Var- koeff. (-)	M ¹ (-)	M ² (-)
16	Liten	-0,9	7,28	32,5	0,78	0,952	0,781
		-2,7	5,80	9,03	0,52	0,983	0,871
		-4,5	7,46	1,94	0,19	0,997	0,947
	Mellan	-0,9	5,17	5,89	0,47	0,988	0,890
		-2,7	4,80	2,45	0,33	0,995	0,927
		-4,5	6,64	0,88	0,14	0,999	0,962
	Stor	-0,9	5,32	6,30	0,47	0,988	0,888
		-2,7	5,73	3,05	0,31	0,994	0,925
		-4,5	6,48	0,84	0,14	0,999	0,963

¹ Blandningsindex enligt ekvation 7.3

² Blandningsindex enligt ekvation 7.4



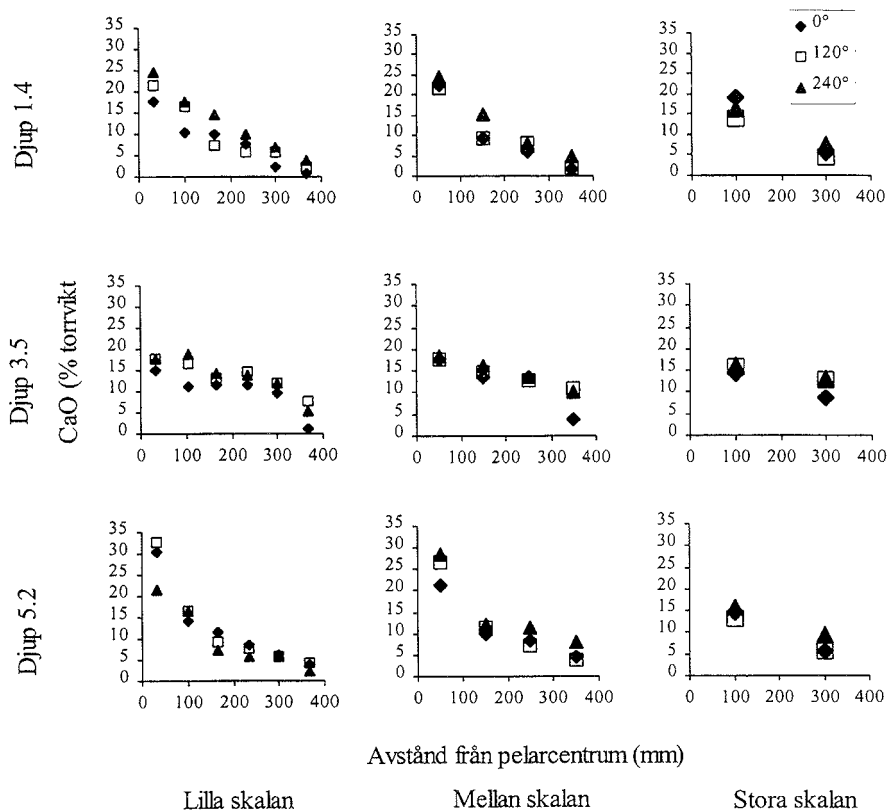
Figur 7.6 Resultat från den kemiska analysen på prover från pelare 26.

Tabell 7.4 Sammanställning av den statistiska analysen för pelare 26.

Pelare	Provstorlek	Djup (m)	Medelvärde (vikt- %)	Varians	Var- koeff. (-)	M1 (-)	M2 (-)
26	Liten	-0,4	6,33	3,02	0,27	0,995	0,929
		-2,4	8,03	3,18	0,22	0,996	0,934
		-4,4	5,43	4,70	0,40	0,991	0,904
	Mellan	-0,4	6,06	0,64	0,13	0,999	0,966
		-2,4	7,78	1,91	0,18	0,997	0,948
		-4,4	5,78	3,63	0,33	0,993	0,918
	Stor	-0,4	6,16	0,52	0,12	0,999	0,970
		-2,4	8,05	1,64	0,16	0,998	0,953
		-4,4	6,15	2,18	0,24	0,996	0,939

¹ Blandningsindex enligt ekvation 7.3

² Blandningsindex enligt ekvation 7.4



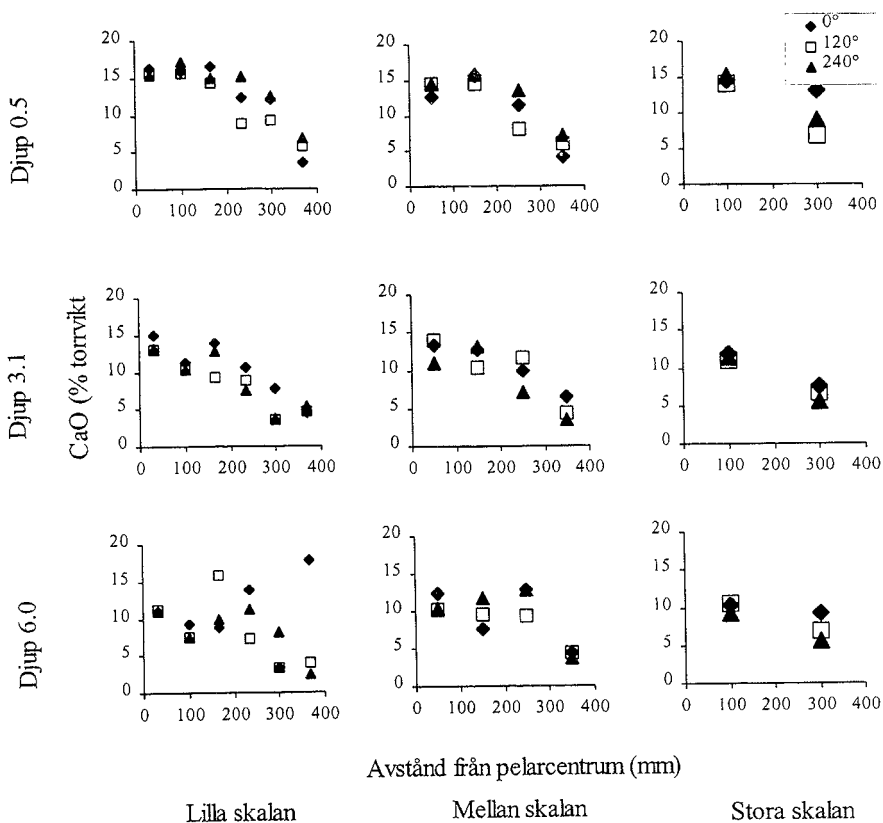
Figur 7.7 Resultat från den kemiska analysen på prover från pelare 43.

Tabell 7.5 Sammanställning av den statistiska analysen för pelare 43.

Pelare	Provstorlek	Djup (m)	Medelvärde (vikt-%)	Varians	Var-koeff. (-)	M1 (-)	M2 (-)
43	Liten	-1,4	6,79	24,89	0,73	0,961	0,802
		-3,5	10,39	20,16	0,43	0,978	0,853
		-5,2	7,28	25,66	0,69	0,962	0,805
	Mellan	-1,4	7,11	30,48	0,78	0,954	0,785
		-3,5	11,67	15,17	0,33	0,985	0,879
		-5,2	8,92	27,30	0,59	0,966	0,817
	Stor	-1,4	8,49	25,48	0,59	0,967	0,819
		-3,5	12,44	7,07	0,21	0,994	0,919
		-5,2	8,82	14,74	0,44	0,982	0,865

¹ Blandningsindex enligt ekvation 7.3

² Blandningsindex enligt ekvation 7.4



Figur 7.8 Resultat från den kemiska analysen på prover från pelare 53.

Tabell 7.6 Sammanställning av den statistiska analysen för pelare 53.

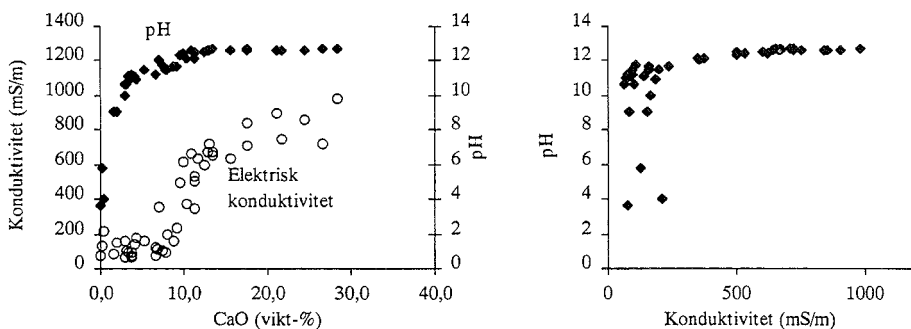
Pelare	Provstorlek	Djup (m)	Medelvärde (vikt- %)	Varians	Var. koeff. (-)	M1 (-)	M2 (-)
53	Liten	-0,5	10,70	17,82	0,39	0,981	0,863
		-3,1	7,36	10,71	0,44	0,984	0,875
		-6,0	8,39	24,55	0,59	0,968	0,821
	Mellan	-0,5	9,70	17,23	0,43	0,980	0,860
		-3,1	8,11	12,48	0,44	0,983	0,871
		-6,0	7,95	13,70	0,47	0,981	0,863
	Stor	-0,5	10,91	10,64	0,30	0,989	0,895
		-3,1	7,80	5,29	0,29	0,993	0,914
		-6,0	7,93	3,50	0,24	0,995	0,931

¹ Blandningsindex enligt ekvation 7.3

² Blandningsindex enligt ekvation 7.4

pH och elektrisk konduktivitet

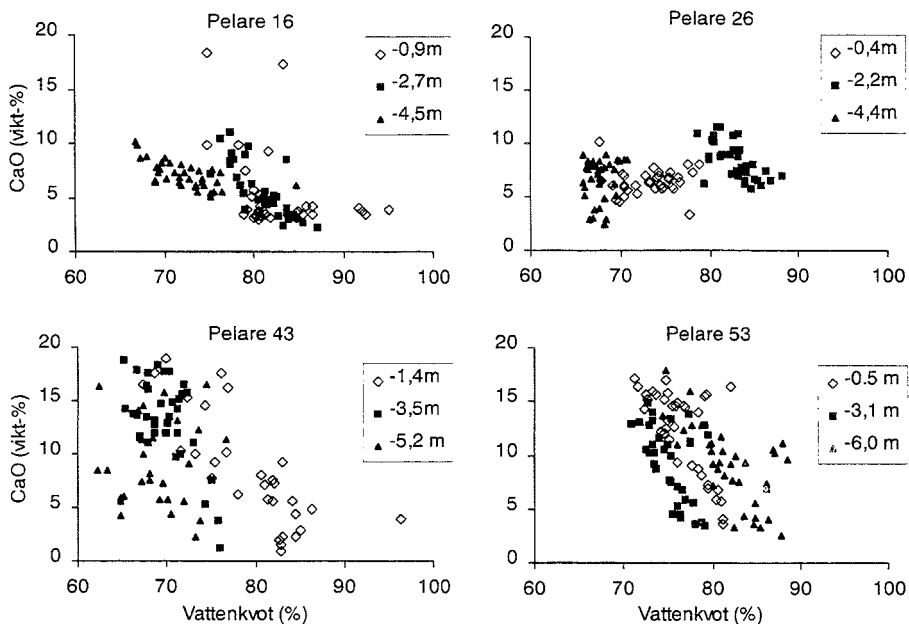
Figur 7.9 visar resultaten från 40 prover där CaO-halt, pH samt elektrisk konduktivitet analyserades och utvärderades. Resultaten redovisas som förhållanden mellan CaO, pH och elektrisk konduktivitet.



Figur 7.9 Förhållanden mellan CaO, pH och elektrisk konduktivitet och pH.

Vattenkvoten

Figur 7.10 visar förhållandet mellan kalciumoxidhalten och vattenkvoten, analyserade från prover tagna från de fyra proppelarna.



Figur 7.10 Förhållandet mellan CaO-halt och vattenkvot

7.4 Diskussion

CaO-halt samt statistisk analys

Som nämdes i inledningen så har det inte varit vanligt att använda statistiska uttryck eller blandningsindex för att kvantitativt bedöma blandningskvaliteten hos kalkcementpelare. Enligt svensk praxis (Carlsten & Ekström 1995) finns inget redskap för att bedöma blandningskvaliteten. Alltför ofta används subjektiva metoder för att bedöma bindemedelspridningen i pelare. Ett exempel är okulära besiktningar där det finns risk för inkorrekta utvärderingar. Som diskuterats i kapitel 5, Blandningskvalitet, är det vanligt att döma en blandningsprocess utifrån egenskaper hos den färdiga produkten. Det finns en risk i att bedöma en blandningsprocess utifrån exempelvis kalkpelarsonderingar eftersom hållfasthetsparametrarna är relaterade till fler parametrar än effektiviteten hos den mekaniska blandningen. Vid en bedömning av blandningskvaliteten måste det skiljas mellan distributionen av bindemedel och en speciell egenskap i den stabiliserade jorden. Om blandningskvaliteten eller fördelningen av bindemedel skall uppskattas bör uppmätningar av bindemedelsmängden utföras.

Figur 7.5 - 7.8 visar resultaten från den kemiska analysen av CaO-halten i prover tagna från de fyra provpelarna. Det finns en rad kommentarer att diskutera kring resultaten.

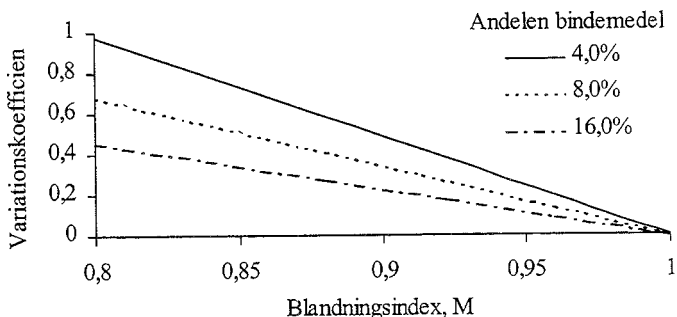
Proverna är tagna i tre riktningar från pelarcentrum och resultaten visar att spridningen av bindemedel är relativt likartad i dessa tre riktningar i de studerade tvärsnitten. Undantag är t.ex. pelare 53, nivå 6,0 m där spridningsmönstret skiljer för de tre olika riktningarna. Resultaten visar dock att spridningen av bindemedel är av radiell karaktär, d.v.s. inblandnings- och fördelningsprocessen med en luftjet har en stor inverkan på bindemedelspridningens karaktär.

Bindemedelspridningen varierar i de olika pelartvärsnitten, vilket är tydligast i pelare 16 och 26. Exempelvis så är det i pelare 16 en stor koncentration av bindemedel i den yttre delen av pelaren ned till ungefär nivå 3 meter. Det var en klart synlig hårdare ring längs hela pelarperiferin. Vid nivå 4,5 m är bindemedelspridningen jämn över hela pelartvärsnittet. I pelare 26 är det en jämn fördelning av bindemedlet ner till c:a 4 meters djup. På nivå 4,4 meter är det en mycket låg koncentration av bindemedel i den yttre delen av pelaren. Som en följd av detta är det svårt att dra slutsatser avseende distributionen av bindemedel utifrån ett fåtal prover, tagna från ett fåtal pelare och nivåer eftersom bindemedelspridningen kan variera med djupet.

Tabell 7.3 – 7.6 redovisar resultaten från den analysen som är ett försök att kvantifiera resultaten från den kemiska analysen redovisad i Figur 7.5 - 7.8. Nedan följer en diskussion kring den statistiska analysen.

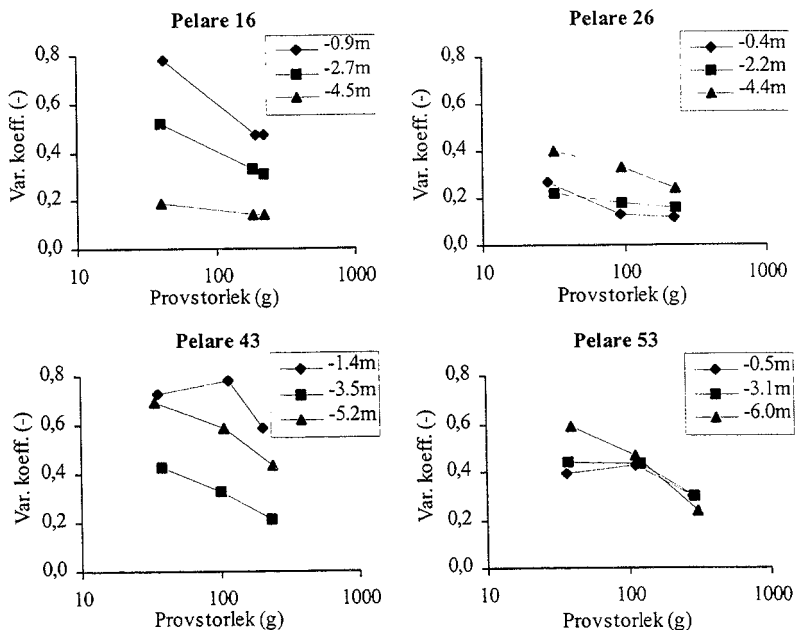
Vilket nämdes i kapitel 4 så är blandningsindex enligt ekvation 7.3 relativt okänsligt för olika blandningskvaliteter. Detta blandningsindex kan därför vara olämpligt att använda vilket också bekräftas av resultaten från föreliggande studie. Blandningsindex enligt ekvation 7.4 är mera känsligt för olika distributioner av bindemedel och kan användas för en kvantitativ bedömning av blandningskvaliteten. Skillnaden mellan blandningsindex enligt

ekvation 7.4 och variationskoefficienten är att blandningsindexet tar hänsyn till den blandning som kan uppnås enligt ekvation 4.11. Sambandet mellan variationskoefficienten och blandningsindex enl. ekvation 7.4 illustreras i Figur 7.11.



Figur 7.11 Samband mellan variationskoefficienten och blandningsindex enl. ekvation 7.4.

Figur 7.12 visar förhållandet mellan variationskoefficienten och provstorleken. Resultaten visar att provstorleken har en betydande inverkan då blandningskvaliteten är dålig och en mindre inverkan då blandningskvaliteten är bra. För att undvika över- eller underskattning av blandningskvaliteten måste således först "skalan av betraktelse" definieras och därefter kan en lämplig provstorlek fastställas.



Figur 7.12 Förhållande mellan variationskoefficienten och provstorleken .

De olika provtagningsstorlekarna visar i regel en liknande bindemedelspridning, även om provstorleken visar olika storlekar på spridningen. Det finns dock ett antal undantag där en större skala inte visar ett medeltal av en mindre provstorlek. Ett exempel på detta är pelare 43, nivå 5,2 m, riktning 240°, Figur 7.7, där den lilla skalan visar på en betydligt mindre bindemedelsmängd än vad mellan- och den stora skalan visar. En orsak till detta är att den lilla skalan inte är ett delprov av de mellanstora proverna och de mellanstora proverna inte är ett delprov av de stora proverna. Dessutom har proverna olika utsträckning i tangentiell riktning, vilket kan ha en inverkan på resultaten.

Medelvärdet skiljer sig mellan de olika provstorlekarna. Differenserna ligger i intervallet 0,25-2,1 vikt- % CaO. De största differenserna återfinns överensstämmer med de tvärsnitt där spridningen i resultatet är störst. Detta visar att det är stora osäkerheter i uppskattningen av medelvärden och variationskoefficienter då pelarkvaliteten är dålig och spridningen är stor.

Eftersom provtagningsproceduren inte utfördes med ett slumpmässigt val av lägen för provtagning och eftersom det var ett litet antal prover i varje serie är det svårt att uppskatta konfidensintervallet för medelvärden, varianser och variationskoefficienter. Som ekvation 4.15 visar, är den uppmätta spridningen i resultaten beroende av provtagningsmetodiken och analysmetoden. I föreliggande studie kan spridningen orsakad av analysmetoden och provernas renhet antas vara små. Spridningen orsakad av provtagningsmetoden är dock svår att uppskatta kvantitativt. Medelvärdet kan variera mellan de olika provstorlekarna även då spridningen är relativt liten vilket indikerar att provtagningsmetodiken har en inverkan på spridningen storlek. De statistiska analyserna enligt Tabell 7.3 – 7.6 måste således betraktas som relativt grova uppskattningar av blandningskvaliteten i pelarna.

För närvarande är kunskapen kring bindemedelspridningen i kalkcementpelare mycket begränsad och konsekvensen blir att det är svårt att dra slutsatser från ett fåtal prover. Det finns således ett behov av att öka kunskapen om bindemedelspridningens natur. Generellt så är en blandning med dålig blandningskvalitet, icke- normalfördelad. Då blandningskvaliteten förbättras går fördelningen mot en normalfördelning (Harnby 1992). Detta medför att det är svårt att jämföra blandningar med stora spridningar. Med en ökad kunskap kan det vara möjligt att använda statistiska analyser för att bedöma blandningskvaliteten och därigenom skapa ett redskap för en utveckling av blandningsprocessen.

Olika typer av uppmätningar av blandningskvaliteten underlättar och ökar förståelsen för blandningsprocessen, men den experimentella bestämningen är ett stort problem eftersom det är svårt och kostsamt att ta prover från pelare och utföra kemiska analyser på dessa. Därför bör omfattande provtagning ske i samband med stora projekt eller forsknings- och utvecklingsprojekt där hela pelare tas upp. Provtagningen bör ske enligt en slumpmässig urvalsmetod, t.ex. en metod presenterad av Harnby (1972). Genom att bestämma bindemedelspridningens natur kommer det att vara möjligt att använda statistiska metoder för att bedöma blandningskvaliteten. Med ökad kunskap kan det vara möjligt att uppskatta blandningskvaliteten utifrån ett få antal prover. Utan denna kunskap kommer tyvärr situationen fortsätta där vi inte kan uppskatta blandningskvaliteten utifrån enstaka

provtagning. Den föreliggande studien visar att det finns en stor risk för att en fåtalsprovning inte kommer att representera bindemedelspridningen i pelarna.

pH, elektrisk konduktivitet samt vattenkvot

Figur 7.9 visar förhållandet mellan pH, elektrisk konduktivitet och CaO-halt utifrån analyser på 40 prover. Resultaten visar att pH ökar mycket snabbt redan vid en låg inblandning av kalk och cement. I intervallet CaO-halt 0–15 % ökar pH mycket snabbt upp till ungefär pH 11,5 vid en CaO-halt runt 4 %. Vid den nominella bindemedelshalten 7 % är $\text{pH} > 12$. Resultaten medför att det är osäkert om pH kan användas för att bedöma pelarkvaliteten med avseende på bindemedelspridningen.

För den elektriska konduktiviteten gäller ett omvänt förhållande. Konduktiviteten är relativt konstant i intervallet 50-200 mS/m, upp till CaO-halten 7 %. Konduktiviteten ökar sedan mycket snabbt upp till 600-700 mS/m vid CaO-halt 12 %. Från CaO-halt 12 % till 25 % ökar konduktiviteten måttligt till 700-1000 mS/m. Även avseende den elektriska konduktiviteten är det tveksamt om den är lämplig att använda för bedömning av pelarkvaliteten med avseende på bindemedelspridningen.

Resultaten från analysen och utvärderingen av vattenkvoten i provkropparna visar att spridningen i resultaten i förhållande till CaO-halten är mycket stor, Figur 7.10. Orsaker till den stora spridningen är bl.a. randeffekter, packningsgrader, provtagnings- och analysmetodik. I alla fyra pelare som studerats var ett centrumhål uppborrat vilket medför att det förekommit fri vattenströmning i pelarnas centrum. Skillnader i den hydrauliska gradienten över pelartvårsnittet leder till vattenströmning och således påverkas provkropparna olika beroende på vart i tvärsnittet de tagits. En hög halt CaO behöver inte medföra att vattenkvoten sjunker, beroende på att packningsgraden kan variera. En ansamling av bindemedel kan vara mycket porös med hög vattenkvot på grund av dålig packning eller dålig konsolidering. Vidare kan provtagnings- och analysmetodiken påverka resultaten. Analysen utfördes över en relativt lång tidsperiod.

7.5 Slutsatser

De viktigaste slutsatserna från den föreliggande studien är:

- Spridningen av bindemedel är relativt stor och spridningens utseende varierar mellan de olika pelarna i studien.
- Provstorleken har en stor inverkan på den utvärderade blandningskvaliteten då bindemedelspridningen är stor. Provstorleken har mindre betydelse då blandningskvaliteten är god.
- Spridningsmönstret i pelarna har en radiell karaktär vilket betyder att inblandnings- och fördelningsprocessen med tryckluft har en stor inverkan på blandningskvaliteten.
- Statistiska metoder och blandningsindex kan användas för att kvantitativt bedöma blandningskvaliteten i kalkcementpelare. Precisionen i uppskattningen är dock beroende av att blandningskvaliteten är relativt god.

- Eftersom det är svårt och ekonomiskt kostsamt att ta prover och utföra kemiska analyser på dessa bör omfattande provtagning ske med slumpmässig urvalsmetodik i samband med större projekt och forsknings- och utvecklingsprojekt där hela pelare tas upp. En ökad kunskap om bindemedelspridningen i kalkcementpelare är förutsättningen för att fätalsprovning i samband med produktionsmässig kontroll ska ge tillförlitliga uppskattningar av pelarkvalitén.

8. Fortsatt forskning

Eftersom blandningsprocessen vid pelarstabilisering är mycket komplex och metoden är relativt ung så finns det ett stort antal områden där fortsatt forskning behövs. Vid de flesta industritillämpningarna så baseras utvecklingen på redan existerande utrustning. Ett vanligt problem med denna ansats är risken för upprepade misstag. Precisa rekommendationer för forskning och utveckling av nya tekniker är svåra att formulera även om det är klart att syftet är att förstå och lösa problem vid dagens blandningsförärande vid pelarstabilisering. Förslagen till fortsatt forskning och teknikutveckling i denna uppsats är avsedd att upprätta en ansats till fortsatta studier.

Två huvudsakliga svårigheter är sammanhängande med studier av blandningsprocesser;

- 1) Bristfällig teoretisk bakgrund.
- 2) Frånvaron av användbara kriterier för blandning.

Det finns en fara i att producera omfattande experimentella data som förblir specifika under de villkor som studerats och det leder till att en begreppsmässig stomme behövs för att hjälpa avgränsningen av experimenten. Det finns idag, med erfarenheter från forskning inom processindustrin, potentiella värdefulla koncept och det finns behov av applikationer till praktiska problem. Erfarenheter kan avgöra om nya koncept behövs.

Branschen för pelarstabilisering är liten i jämförelse med andra industrier inom processindustrin. Det är naturligt att det är svårt att få medel för grundforskning inom området, t.ex. för studier av de reologiska egenskaperna hos en jord-bindemedelsblandning. Blandningsprocessen är mycket komplex och det är därför viktigt att kontinuerligt följa upp forskning och utveckling inom andra industrier.

Det är ett behov av att studera blandningsprocessen och de nyckelfaktorer som påverkar processen. Kvalitativa och kvantitativa studier bör inkludera undersökningar av influensen av bl.a. följande faktorer:

1. Fysikaliska egenskaper i blandningen och dess komponenter.
2. Storleken och den geometriska utformningen på blandningsredskapen.
3. Variabler i blandningsprocessen. Rotationshastighet, stigning, lufttryck, vridmoment etc.
4. Provtagningsprocedur. Metod för provtagning, storlek, antal och läge.
5. Målformulering för blandningsprocessen. Kriterier använda för att avgöra om processen lyckas med blandningen. Kriterier som bestäms av specifika eller generella blandningsindex, flödesmönster, kraftkonsumtion, kostnader etc.

Det finns ett antal egenskaper som är speciellt lämpade att studera i laboratorie (och ev. i fält):

1. Jordens egenskaper. Inverkan av lerhalt, vattenkvot och störningsgraden på blandningsprocessen och dess resultat.

2. Nivån på tillförd energimängd per volymsenhet som erfordras för en given blandningsgrad. Effekten av den tillförda energimängden (stigning per varv) och töjningshastigheten (rotationshastigheten) studeras lämpligen i ett inledande skede på laboratorie där ytterligheter i dessa faktorer studeras.
3. Den initiala orienteringen och fördelningen av de blandade komponenterna kan ha en stor inverkan på blandningstiden och dispersion.

Teoretiska och experimentella studier av blandningsmekanismer bör utföras i laboriemiljö med kontrollerbara reologiska egenskaper hos materialen och med enkla geometrier på blandningsredskapen. Sådana arbeten skulle belysa sådana fenomen som sannolikt är viktiga i mera komplexa blandningsprocesser och skulle antyda de mest relevanta variablerna som bör studeras i fältförsök. De skulle inte syfta till att ge data som är direkt applicerbara vid komplexa industriella problem men belysa resultat som föreslår nya angreppslinjer till mekanismen hos det verkliga problemet. Det är nödvändigt att laborieförsök har nära kontakt med de verkliga problemen för att säkerställa tillämpning av ny kunskap. Detta skulle också säkerställa att problem inte blir alltför förenklade.

Problem som är passande med denna ansats diskuteras nedan:

- i Passande och snabba metoder för provning/provtagning och analyser av blandningsprocessen behövs. Överväganden måste göras beträffande antalet prover som måste tas för att kunna bedöma tillståndet i en process och om slumpartad eller selektiv provtagning skall ske.
- ii Experiment där blandningsmekanismer studeras i leriga jordar som har visköst elastiska egenskaper kommer troligtvis att vara svåra att tolka och generalisera innan förståelse för visköst elastiska egenskaper är etablerad. Den omfattning som experiment kommer att vara giltiga för bör vara bestämd genom att isolera individuella mekanismer. Om man kan isolera individuella blandningsmekanismer kan dessa användas för att klassificera blandningsutrustning?
- iii Det finns ett behov av att studera lufttrycket som en blandningsmekanism. Vidare måste fördelningen av bindemedel över tvärsnittet studeras. Finns det ett behov av en bättre och jämnare fördelning av bindemedlet än den fördelning som lufttrycket åstadkommer?
- iv Fastän många industriella produkter har visköst elastiska egenskaper så är förståelsen liten för hastighets- och skjuvspänningsdistribution i dessa reologiskt mycket komplexa material. Det finns ett behov av att öka förståelsen av fenomen som kan uppkomma under blandning. Speciellt viktigt är att studera hur stor volym kring ett blandningsredskap som sätts i rörelse vid blandning.
- v Teorierna kring laminär blandning behöver studeras. Teorierna bygger på deformation eller reducering av flödeselement i material där man känner orienteringen hos gränsytearean mellan de blandade komponenterna. Det är oklart om hur dessa teorier kan appliceras på tredimensionella rörelsemönster i en blandningsprocess.

- vi Den tillförda energimängden till blandningen från blandningsverktyget kan konsumeras på ett antal olika sätt, t.ex. för att överkomma elastiska och kohesiva krafter i en lersuspension. Hur stor andel av den tillförda energimängden går åt för att bryta upp strukturen hos en lerig jord och hur stor andel deformerar och reducerar de ingående elementen i blandningen?
- vii Strukturen i en lerjord kan ha betydelse för de rådande mekanismerna i en blandningsprocess. Hur stor inverkan har störningsgraden i en jord på blandningsprocessen och produktens resultat? Störningsgraden i en lerjord har troligen olika betydelse för olika typer av stabiliseringsmedel.
- viii Packningsarbetet har inverkan på blandningsprocessen då luft blandas in i jorden. Hur stor inverkan har packningsarbetet och är det viktigt att utforma redskap som kan evakuera all luft ur jorden?
- ix Förändring av de reologiska egenskaperna i blandningen genom att använda peptiseringsmedel (flytmedel).

Referenser

- Adams, J.F.E. and Baker, A.G. 1956. An assessment of dry blending equipment. *Transaction of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 34, pp. 91-107.
- Adeyeri, J.B., Krizek, R.J. and Achenbach, J.D. 1970. Multiple integral description of nonlinear viscoelastic behaviour of a clay soil. *Transactions of the Society of Rheology*. Vol. 14, Issue 3, pp. 375-392.
- 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. Statens geotekniska institut, Rapport 48, Linköping. 170+43 s.
- AIChE, 1979. *Equipment Testing Procedure. Dry Solids Paste and Dough Mixing Equipment*. Second Edition. American Institute of Chemical Engineers, New York. 29 pp.
- AIChE, 1987. *Equipment Testing Procedure. Mixing Equipment (Impellar Type)*. Second Edition. American Institute of Chemical Engineers, New York. 40 pp.
- Ali Al-Ghazal, A. 1989. An investigation into the mechanics of agricultural discs. Cranfield Institute of Technology, United Kingdom. 318 pp.
- Allam, M.M. and Sridharan, A. 1984. The shearing resistance of saturated clays. *Geotechnique*, Vol. 34, No. 1, pp. 119-122.
- Al-Tabbaa, A. and Evans, C.W. 1999. Laboratory-scale soil mixing of contaminated site. *Ground Improvement*, Vol. 3, pp. 119-134.
- Al-Tabbaa, A., Al-Tabbaa, A.M.B. and Ayotamuno, J.M. 1999. Laboratory-scale dry soil mixing of a sand. *Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, 15-17 Oct., Stockholm, Sweden, pp. 73-80.
- Aoi, M. & Tsujii, T. 1996. Mechanism of machine for Dry Jet Mixing Method. *Grouting and Deep Mixing. Proceedings of IS-Tokyo'96, Second International Conference on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 14-17 May, 1996. Vol. 1. pp. 579-584.
- Asano, J., Ban, K., Azuma, K. and Takahashi, K. 1996. Deep mixing method of soil stabilization using coal ash. *Proc. of the IS-Tokyo'96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 14-17 May, 1996. pp. 393-398.
- Ashton, M.D. and Valentin, F.H.H. 1966. The mixing of powders and particles in industrial mixers. *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, Vol. 44, No. 5, pp. T166-T188.
- Assarsson, K.G. 1972. Stabilisering och jordförstärkning med kalk. *Cement och betong*, 1972:1, s. 55-71.
- Axelsson, A. & Larsson, S. 1994. Provningsmetoder på kalkcementpelare, Svealandsbanan. Examensarbete 94/10. Inst. för anläggning och miljö. Avd. för jord- och bergmekanik. Kungliga Tekniska Högskolan. Stockholm. 118 s.
- Axelsson, M. and Rehnman, S-E. 1999. Field methods for quality control at the dry jet mixing method. *Proc. of the Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, 13-15 Oct., Stockholm, Sweden. pp. 303-310.
- Babasaki, R. & Suzuki, K. 1996. Open cut excavation of soft ground using the DCM method. *Proc. of the IS-Tokyo'96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 14-17 May, pp. 469-473.
- Babasaki, R., Terashi, M., Suzuki, T. Maekawa, A., Kawamura, M. and Fukazawa, E. 1997. JGS TC Report: Factors influencing the strength of improved soil. *Proc. of the IS-Tokyo'96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 14-17 May, 1996. Vol. 2, pp. 913-918.
- Bachy Limited. 1996. Colmix brochure. Bachy Limited, Godalming.

- Baghdadi, Z.A. and Shihata, S.A. 1999. On the durability and strength of soil-cement. *Ground Improvement*, Vol. 3, pp. 1-6.
- Baker, C.N.Jr. 1954. Strength of soil-cement as a function of the degree of mixing. *Stabilization of Soils*, Highway Research Board Bulletin 98, 33d Annual Meeting, pp. 33-52.
- Barnes, H.A., Hutton, J.F. and Walters, K. 1989. *An Introduction to Rheology*. Rheology Series, Vol 3. Elsevier. 199 pp.
- Bell, F.G. 1988. Stabilisation and treatment of clay soils with lime. Part 1. Basic principles. *Ground Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 10-15.
- Bell, J.R. 1977. Compaction energy relationship of cohesive soils. *Stabilization of soils*. Transportation Research Record 641. pp. 29-34.
- Bentley, S.P. 1979. Viscometric assessment of remoulded sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 16, pp. 414-419.
- Boman, P. och Broms, B.B. 1975. Stabilisering av kohesionsjord med kalkpelare. NGM-75, Köpenhamn, s. 265-279.
- Bourne, J.R. 1964. The mixing of powder, pastes, and non-Newtonian fluids. Industrial Research Fellow, Report No. 2. *The Chemical Engineer*, September, 1964, pp. CE202-CE216.
- Bourne, J.R. 1968. Statistical relations for square samples. *Chemical Engineering Science*, Vol. 23, pp. 339-343.
- Braaten, A., Aaboe, R. and Oset, F. 1999. Development of in-situ control methods for lime/cement columns. Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 15-17 Oct., Stockholm, Sweden, pp. 295-301.
- Bredenberg, H. 1999. Keynote lecture: Equipment for deep soil mixing with the dry jet mixing method. Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 15-17 Oct., Stockholm, Sweden, pp. 323-331.
- British Lime Association. 1990. *Lime Stabilisation Manual*. Second edition. British Lime Association, London. 41 pp.
- Brodkey, R.S. 1966. Fluid motion and mixing, Chapter 2. In: *Mixing Theory and Practice*, (Uhl, V.W. and Gray, J.B.; eds) Volume 1. New York: Academic Press, pp. 7-110.
- Broms, B.B. and Boman, P. 1975. Kalkstabiliserade pelare - en grundförstärkningsmetod vid vägbyggnad. *Väg- och vattenbyggaren*, No. 5, s. 40-43.
- Broms, B.B. and Boman, P. 1975. Lime stabilised columns. Proc. 5th Asian Regional Conf., Bangalore India, Vol.1, pp. 227-234.
- Broms, B.B. and Boman, P. 1977. Stabilisation of soil with lime. *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 23-32.
- Broms, B.B. and Boman, P. 1979. Lime columns – a new foundation method. ASCE, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, NoGT4, pp. 539-556.
- Brookes, A.H. West, G. and Carder, D.R. 1997. Laboratory trial mixes for lime-stabilised soil columns and lime piles. TRL Report 306. 16 pp.
- Bruce, D.A. 1996. The return of deep soil mixing. *Civil Engineering*, ASCE, Dec. pp. 44-46.
- Bruce, D.A., Bruce, M.E.C. and DiMillio, A.F. 1998a. Deep mixing methods: A global perspective. *Civil Engineering- ASCE*, Vol. 68, No. 12, December 1998, pp. 38-51.
- Bruce, D.A., Bruce, M.E.C. and DiMillio, A.F. 1998b. Deep mixing methods: A global perspective. *Geotechnical Special Publication No. 81*. Soil Improvement for Big Digs. Proc. of sessions of Geocongress 98. Oct 18-21, Boston, Massachusetts, pp. 1-26.

- Bruce, D.A., Bruce, M.E.C. and DiMillio, A.F. 1999. Dry mix methods: A brief overview of international practice. Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 15-17 Oct., Stockholm, Sweden. pp. 15-25.
- Bryhn, O.R., Løken, T. and Ass, G. 1984. Stabilisation of sensitive clays with hydroxy-aluminium compared with unslaked lime. Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Publication 151. 14 pp.
- Bryhn, O.R., Løken, T. and Reed, M.G. 1988. Stabilization of sensitive clays (quick clays) using $Al(OH)_2.5Cl_{0.5}$. Norwegian Geotechnical Institute. Publication 170. 9 pp.
- Carlsten, P. 1991. Jordförstärkning med kalk-, cement- och kalk/cementpelare. Allmän teknisk beskrivning, metoder. Vägverket publ. 1991:42.
- Carlsten, P. och Ekström, J. 1995. Kalk- och kalkcementpelare. Vägledning för projektering, utförande och kontroll. SGF Rapport 4:95. Svenska geotekniska föreningen, 1995. 111 s.
- Cementa. 1973. Jordstabilisering med cement och cementstabiliserat grus vid europeiskt vägbyggande. Cementa AB, Malmö. 157 s.
- Cheng, D.C-H. 1979. The role of extensional flows in fluid mixing and dispersion. Proc. 3rd European Conference on Mixing, BHRA, Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England, April 1979, Vol. 1, pp. 73-104.
- Cheng, D.C-H. and Richmond, R.A. 1978. Some observations on the rheological behaviour of dense suspensions. *Rheological Acta*, Vol. 17, pp. 446-453.
- Chida, S. 1982. Development of dry jet mixing methods. Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan. pp. 29-35.
- Coulson, J.M. and Maitra, N.K. 1950. The mixing of solid particles. *Ind. Chem.*, Vol. 26, p. 55.
- Coulson, J.M., Richardson, J.F. and Peacock, D.G. 1979. *Chemical Engineering. Volume Three (2nd Edn)* Oxford: Pergamon Press. 648 pp.
- Coussot, P. 1997. *Mudflow Rheology and Dynamics*. International Association for Hydraulic Research. Monograph Series. Balkema, Rotterdam, Brookfield. 255 pp.
- Danckwerts, P.V. 1952. The definition and measurement of some characteristics of mixtures. *Applied Science Research*. Vol. 3, pp. 279.
- Danckwerts, P.V. 1953. Theory of mixtures and mixing. *Research*. Vol. 6, pp. 355-361.
- Davidson, L.K., Demirel, T. and Handy, R.L. 1965. Soil pulverization and lime migration in soil-lime stabilization. Highway Research Record 92. HRB, National Research Council, Washington D.C., pp. 103-118.
- Dong, J., Hiroi, K. and Nakamura, K. 1996. Experimental study on behaviour of composite ground improved by deep mixing method under lateral earth pressure. Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, pp. 585-590.
- Drozdov, D.D. 1998. *Mechanics of Viscoelastic Solids*. John Wiley & sons. 472 pp.
- Edstam, T. 1997. Erfarenhetsbank för kc-pelare. Swedish Deep Stabilisation Research Center, Report No. 1, Linköping, Sweden, 154 pp.
- Edstam, T. and Carlsten, P. 1999. A new method for laboratory preparation of stabilised clay. Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 15-17 Oct., Stockholm, Sweden, pp. 315-319.
- Edwards, M.F. 1992. Laminar flow and distributive mixing, Chapter 11. In: *Mixing in the Process Industries*, (Harnby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W.; eds) Second Edition. London: Butterworth Heinemann, pp. 200-224.
- Edwards, M.F. and Baker, M.R. 1992. A review of liquid mixing equipment, Chapter 7. In: *Mixing in the Process Industries*, (Harnby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W.; eds) Second Edition. London: Butterworth Heinemann, pp. 118-136.

- Edwards, M.F., Baker, M.R. and Godfrey, J.C. 1992. Mixing of liquids in stirred tanks, Chapter 8. In: *Mixing in the Process Industries*, (Hamby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W.; eds) Second Edition. London: Butterworth Heinemann, pp. 137-158.
- Enami, A., Hibino, S., Takahashi, M., Akiya, K. and Yamada, M. 1986a. Properties of soil cement produced by compact machine system for tenocolumn method. 21st Annual Meeting, Japanese Society of Soil Mech. and Found. Engng., pp. 1987-1990. Written in Japanese.
- Enami, A., Hibino, S., Akiya, K. and Yamada, M. 1986b. Subsoil stabilization by a newly developed compact deep mixing machine. *Tsuchi to Kiso*. Vol. 34, No. 6, pp. 37-43. Written in Japanese.
- Fan, L.T., Chen, S.J. and Watson, C.A. 1970. Solids mixing. *Industrial Engineering Chemistry*, Vol. 62, No. 7, pp. 53-69.
- Fan, L.T., Rubison, R.M. and Lai, F.S. 1979. Studies of multicomponent solids mixing and mixtures. Part III. Mixing indices. *Powder Technology*, Vol. 24, pp. 73-89.
- Fan, L.T., Wang, R.H. 1975. On mixing indices. *Powder Technology*, Vol. 11, pp. 27-32.
- Finska vägverket. 1997. Dimensioneringsvägledning för djupstabilisering. Vägverkets klarlägganden 18/1997.
- Fohs, D.G. and Kinter, E.B. 1972. Migration of lime in compacted soil. *Public Roads*, Vol. 37, pp. 1-8.
- Freitag, D.R., Kozan, G.R. and Stouffer, J.D. 1961. Summary reviews of soil stabilization processes. Mixing principles, techniques and equipment. Miscellaneous paper no. 3-122, Report 6. May 1961. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Corps of Engineers. Vicksburg, Mississippi. 33 pp.
- Futaki, M., Nakano, K. and Hagino, Y. 1996. Design strength of soil-cement Columns as foundation ground for structures. Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May, pp. 481-484.
- Geankoplis, C.J. 1993. *Transport Process and Unit Operations*, 3rd Edition, Prentice Hall. 921 pp.
- Giesekus, H. 1983. Disperse systems: Dependence on rheological properties on the type of flow with implication for food rheology. In: *Physical Properties of Foods* (Jowitt, R., Escher, F., Hallstrom, B., Meffert, H.F.T., Spies, W.E.L. and Vos, G. Eds.). London: Applied Science Publishers, pp. 205-220.
- Gillott, J.E. 1987. *Clay in Engineering Geology*. Developments in Geotechnical Engineering; 41. Elsevier. 468 pp.
- Godfrey, J.C. 1985. Mixing of high- viscosity fluids, Chapter 11. In: *Mixing in the Process Industries*, (Hamby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W.; eds) London: Butterworth Heinemann, pp. 185-201.
- Godfrey, J.C. 1992. Static mixers, Chapter 12. In: *Mixing in the Process Industries*, (Hamby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W.; eds) 2nd Ed. London: Butterworth Heinemann, pp. 225-249.
- Gray, J.B. 1957. Performance of dry solids mixing equipment. *Chemical Engineering Progress*, Vol. 53, No. 1, pp. 25-32.
- Gray, J.B. 1963. Batch mixing of viscous liquids. *Chemical Engineering Progress*, Vol. 59, No. 3, pp. 55-59.
- Greaves, H.M. 1996. An introduction to lime stabilisation. *Lime Stabilisation*. Proc. of the Seminar Held at Loughborough University, Civil and Building Engineering Dept on 25 sept., pp. 5-12.
- Grossman, R.F. 1997. Mixing cycles and procedures. Chapter 2, In: *The Mixing of Rubber* (Grossman, R.F.; eds). Chapman & Hall. pp. 25-48.
- Haddad, Y.M. 1995. *Viscoelasticity of Engineering Materials*. Chapman & Hall. 378 pp.
- Håkansson, U. 1993. *Rheology of Fresh Cement- Based Grouts*. PhD Thesis, Dept. of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm. 154 pp.
- Halkola, H. 1983. In-situ investigations of deepstabilized soil. *European Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, 8, Helsinki. Proc., Vol. 2. pp. 33-36.

- Halkola, H. 1999. Keynote lecture: Quality control for dry mix methods. Proc. of the Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 13-15 Oct., Stockholm, Sweden. pp. 285-294.
- Handy, R.L. and Williams, W.W. 1967. Chemical stabilization of an active landslide. Civil Engineering, ASCE. Aug. 1967, pp. 62-65.
- Harnan, C.N. 1993. Colmix. The process and its applications. Kalkpelardagen '93, Stockholm, 6-7 maj 1993, 5 pp.
- Harnby, N. 1972. The statistical analysis of particulate mixtures. Part 1. The sampling of mixtures and the resultant prediction of estimates based on the sample. Powder Technology, Vol. 5, pp. 81-86.
- Harnby, N. 1992. Characterization of powder mixtures. In N. Harnby, M.F., Edwards and A.W. Nienow (ed.), *Mixing in the Process Industries*. Second Edition: Chapter 2. Butterworth Heinemann. pp 25-41.
- Harnby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W. (Eds), 1992. *Mixing in the Process Industries*. Second Edition. London: Butterworth Heinemann, 414 pp.
- Hata, S., Higaki, Y., Aoi, M. and Ashida, S. 1987. Study on the monitoring in deep mixing method. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1987, No. 382, pp. 35-43.
- Hayashi, H. and Nishikawa, J. 1999. Mixing efficiency of dry jet mixing methods applied to peat soft ground. Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 15-17 Oct., Stockholm, Sweden, pp. 333-338.
- Hirai, T., Ise, J., Kusakara, T., Gotou, M. and Hibi, Y. 1996. Development and application of deep mixing soil stabilization method to control displacement of adjacent ground. Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, pp. 485-490.
- Hoikkala, S., Leppänen, M. and Tanska, H. 1997. Blockstabilization of peat in road construction. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 14, Hamburg, Sept. 1997. Proc., Vol. 3. pp. 1693-1696.
- Hold, P. 1982. Mixing of polymers-an overview, Part II. In: *Advances in Polymer Technology*, 2(3), pp. 197-228.
- Holm, G., Bredenberg, H. and Broms, B. 1981. Lime columns as foundation for light structures. Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol. 3, pp. 687-694.
- Holm, G., Ruin, M. and Håkansson, S. 1999. Column penetration tests and extraction of lime/cement columns. Proc. of the Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 13-15 Oct., Stockholm, Sweden. pp. 311-314.
- Holt, C.C. and Freer-Hewish, R.J. 1998. The use of lime-treated British clays in pavement construction. Part 1: The effect of mellowing on the modification process. Proc. Inst. Civ. Engrs Transp., 129, pp. 228-239.
- Honjo, Y. 1982. Probabilistic approach to evaluate shear strength of heterogeneous stabilized ground by deep mixing method. *Soils and Foundations*, Vol. 22, Nr. 1. pp. 23-28.
- Hosomi, H., Nishioka, S., Takei, S. and Qing, C.C. 1996. Method of deep mixing at Tianjin Port, People's Republic of China. Proc. of IS-Tokyo '96, Second Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May, 1996. Vol. 1, pp. 491-494.
- Hvorslew, M.J. 1960. Physical components of the shear strength of saturated clays. American Society of Civil Engineers, Res. Conf. Shear Strength Cohesive Soils, Boulder, Colorado, pp. 169-273.
- Iinoya, K., Masuda, H. and Watanabe, K. 1985. *Powder and Bulk Solids Handling Process – Introduction and Control*, M. Dekker, New York.
- Isobe, K., Samaru, Y., Aoki, C., Sogo, K. and Murakami, T. 1996. Large scales deep soil mixing and quality control. Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May, pp. 619-624.
- Izykowski, Z. 1956. *Przegl. Odl.*, Vol. 6, p.175.
- Jelusic, N. 1999. *Masstabilisering*. Licentiatavhandling, Lunds Universitet, 154 s.

- Jenny, H. and Overstreet, R. 1939. Surface migration of ions and contact exchange. *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 43, pp. 1185- 1196.
- Johansson, C. & Jons, A-K. 1995. Kalkcementpelartillverkning. En studie av hur olika produktionsfaktorer påverkar pelarnas homogenitet och hållfasthet. Examensarbete 1995:5. Inst. för geoteknik, Chalmers Tekniska Högskola. 69+91s.
- Johnson, R.A. 1994. *Miller and Freund's Probability and Statistics for Engineers*. Fifth Edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 630 pp.
- Joshi, R.C., Natt, G.S. and Wright, P.J. 1981. Soil improvement by lime-fly ash slurry injection. *Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 3, pp. 707-712.
- Kamon, M. 1992. Recent developments of soil improvement. *Int. Symp. on Soil Improvement and Pile Found.*, Nanjing, China, Vol. 1. pp. 26.
- Kawasaki, K., Kotera, H., Nishida, K. and Murase, T. 1996. Deep mixing by spreadable wing method. *Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 14-17 May, pp. 631-636.
- Kawasaki, K., Niina, A., Saitoh, S., Suzuki, Y., Honjyo, Y. 1981. Deep mixing method using cement hardening agent. *Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 3, pp. 17-38.
- Kawasaki, T., Saitoh, S., Suzuki, Y. and Babasaki, T. 1984. Deep mixing method using cement slurry as hardening agent. *Seminar on Soil Improvement and Construction Techniques in Soft Ground*, Singapore, 10-11 January, 1984, pp. 17-38.
- Kaye, B.H. 1997. *Powder Mixing*. Chapman & Hall. 263 pp.
- Kezdi, A. 1979. *Stabilized Earth Roads*. Elsevier, Amsterdam.
- Khono, I. 1984. Special issue. Soil cement work method. Stirring impellar, auger system. SBW work method, simultaneous stirring mechanism in horizontal and vertical directions. *Kisoko (Foundation Engineering and Equipment, Monthly)*, Vol.12, No.11, pp. 48-53. Written in Japanese.
- King, R. 1992. Mechanical aspects of mixing, Chapter 13. In: *Mixing in the Process Industries*, (Harnby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W.; eds) Second Edition. London: Butterworth Heinemann, pp. 250-293.
- Komamura, F. and Huang, R.J. 1974. New rheological model for soil behaviour. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 100, No. GT7, pp. 807-824.
- Kouassi, P., Breyse, D., Girard, H. and Poulain, D. 2000. A new technique of kneading compaction in the laboratory. *Geotechnical Testing Journal*, Marsch, pp. 72-82.
- Kujala, K., Halkola, H. and Lahtinen, P. 1985. Design parameters for deep stabilized soil evaluated from in-situ and laboratory tests. *11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Aug. 1985. *Proc.*, Vol. 3, pp. 1717-1720.
- Lacey, P.M.C. 1943. The mixing of solid particles. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 21, pp. 53-59.
- Lacey, P.M.C. 1954. Developments in the theory of particles mixing. *Journal of Applied Chemistry*, Vol. 4, pp. 257-268.
- Lakes, R.S. 1998. *Viscoelastic Solids*. CRS Press. 476 pp.
- Larsson, R. 1999. Provbänk på kalk/cementpelarförstärkt gytta och sulfidhaltig lera i Norrland. *Swedish Deep Stabilisation Research Center*, Report No. 4, Linköping, Sweden. 80 pp.
- Larsson, S. 1999. Shear box apparatus for modelling chemical stabilised soil – introductory tests. *Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, 15-17 Oct., Stockholm, Sweden, pp. 115-121.
- Larsson, S., Rehnman, S-E. & Walter, M. 1999. Laboratory method for design and development of the dry jet mixing method. *Proc. of the XIIIth ECSMGE*, Amsterdam, Netherlands, Vol. 3, pp. 1533-1538.

- Lastovtsev, A.M., Khyalnova, M. and Makarov, J.I. 1962. *Khim. Prom. SSSR*, Vol. 11, p. 815.
- Legatt, C.W. 1951. Method of making the homogeneity test. *Assoc. Official Seed Analysis News Letter*, Vol. 25, No. 4, p. 3.
- Lindh, E och Ydrevik, K. 1978. Inverkan av jordmaterialets sönderdelningsgrad vid kalkstabilisering. *Statens väg- och trafikinstitut. VTI Meddelande*; 132. 37 s.
- Lindh, E. 1977. Kalkstabilisering av lera med hög vattenhalt på undergrund med extremt låg bärighet. *Fältstudie vid Linköping 1976*. 45 s.
- Lindh, E. och Hjalmarsson, S-O. 1975. Inverkan av fördröjd packning på vissa egenskaper hos cementstabiliserade grusmaterial. En laboratorieundersökning. *Statens Väg- och trafikinstitut. VTI Internrapport nr 200*. 10+5 s.
- Lindley, J.A. 1991a. Mixing processes for agricultural and food materials: 1, Fundamentals of mixing. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 48, pp. 153-170.
- Lindley, J.A. 1991b. Mixing processes for agricultural and food materials: 2, Highly viscous liquids and cohesive materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 48, pp. 229-247.
- Lloyd, P.J. 1981. The evaluation of powder mixtures. In: *Mixing of Particulate Solids. Proc. of the 2nd European Symposium. Institution of Chemical Engineers Symposium Series No. 65*.
- Locat, J. 1992. Viscosity, yield strength, and mudflow mobility for sensitive clays and other fine sediments. *Canadian Symposium on Geotechnique and Natural Hazards, GeoHazards '92*, 1, Vancouver, BC, May 6-9, 1992. *Proceedings*, pp. 389-396.
- Locat, J., and Demers, D. 1988. Viscosity, yield stress, remoulded strength, and liquidity index relationship for sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, pp. 799-806.
- Locat, J., Bérubé, M-A. and Choquette, M. 1990. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. *Canadian geotechnical journal*, Vol. 27, pp. 294-304.
- Mahesh, V. Bhatia, P.E., Paul, N, and Cheremisinoff, P.E. 1979. *Solids Separation and Mixing. Process Equipment Series, Volume 1. Technomic Publication Co., Inc.*
- Massarsch, K.R. 1976. Soil Movements Caused by Pile Driving in Clay. *Rapporter JoB No. 6. Ph D Thesis*, Dept. of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 261 pp.
- Mathew, P.K. and Narasimha Rao, S. 1997. Effect of lime cation exchange capacity of marine clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, Vol. 123, No. 2, pp. 183-185.
- Matsuo, T., Nisibayashi, K. and Hosoya, Y. 1996. Studies on soil improvement adjusted at low compressive strength in deep mixing method. *Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May*, pp. 421-424.
- McDonagh, M. & Heywood, N.I. 1986. Design of systems for dispersing powders into liquids. In: *Eurochem '86- Process Engineering Today*, pp. 43-49.
- Metzner & Otto. 1957. Agitation of non-Newtonian fluids. *American Institute of Chemical Engineering*, Vol. 3, No. 1. pp. 3-10.
- Meyer. 1874. *J. Rein. und Angew. Math.* 78:130.
- Middleton, J.C., Edwards, M.F. and Stewart, I. 1994. Recommended standard terminology and nomenclature for mixing. *Eight European Conference on Mixing Held at the University of Cambridge. Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK*, pp. vii-xiii.
- Miles, S.R. 1962. Heterogeneity of seed lots. *Proc. of the International Seed Testing Association*, Vol. 27, No. 2, pp. 407-413.
- Miyoshi, A. and Hirayama, K. 1996. Test of solidified columns using a combined system of mechanical churning. *Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May*, pp. 743-748.

- Mizuno et al. 1988. Experiment on the improvement of sandy soil using the deep mixing method. 23rd Annual Meeting, Japanese Soc. of Soil Mech. and Found. Engng., pp. 2301-2304. Written in Japanese.
- Mori, F., Furukawa, S., Kikuchi, Y. and Matsumoto, K. 1997. Analysis and field loading tests of building foundations treated by new soil improvement methods. In: Ground Improvement Geosystems: Proc. 3rd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Densification and Reinforcement. Thomas Telford, London, pp. 246-252.
- Mork, J.H. 1994. Effekt av sementens forhold mellom gips og hemihydrat på den ferske betongens reologi. Dr.Ing. Avhandling 1994:04. Institut for Bygningsmateriallære. Norges Tekniske Høgskole. Trondheim, Norge. 285 pp.
- Mueller, P.E. 1991. Mixing procedures for soil cement. *Concrete International*, Jan., pp. 53-55.
- Muro, T., Fukagawa, R. and Mukaihata, K. 1987a. Fundamental study of mixing conditions affecting the mechanical properties of soil-cement piles. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1987, No. 385, pp. 98-195. Written in Japanese.
- Muro, T., Fukagawa, R. and Mukaihata, K. 1987b. Effect of mixing condition on deformation and strength characteristics of cement treated soil. *Ehime Daigaku Kogakubu Kiyo*, Vol. 11, No. 2, pp. 393-403. Written in Japanese.
- Nagata, S., Nishikawa, M., Katsube, T. and Takaish, K. 1972. Mixing of highly viscous non-Newtonian liquids. *International Chemical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 175-182.
- Nakajima, N. 1994. Mixing and viscoelasticity of rubber (part 1). *International Polymer Science and Technology*, Vol. 21, No. 11, pp. T47-T67.
- Narasimha Rao, S. and Rajasekaran, G. 1996. Reaction products formed in lime-stabilised marine clays. *Journal of Geotechnical Engineerin*, Vol. 122, No. 5, pp. 329-336.
- Nelson, R.D. 1988. *Dispersing Powders in Liquids*. Edited by Williams, J.C. and Allen, T. *Handbook of Powder Technology*, Volume 7. Elsevier.
- Nguyen, Q.D. & Boger, D.V. 1992. Measuring the flow properties of yield stress fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics*. Volume 24, pp. 47-88.
- Nicholson, P.J., Mitchell, J.K., Bahner, E.W. and Moriwaki, Y. 1998. Design of a soil mixed composite gravity wall. *Geotechnical Special Publication No. 81. Soil Improvement for Big Digs*. Proc. of Sessions of Geo-congress 98. Oct 18-21, Boston, Massachusetts, pp. 27-58.
- Nickel, S.H. 1976. A rheological approach to dispersive clays. *ASTM Special Technical Publication 623*, pp. 303-312.
- Nienow, A.W., Edwards, M.F., Harnby, N. 1992. Introduction to mixing problems, Chapter 1. In: *Mixing in the Process Industries*, (Harnby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W.; eds) Second Edition. London: Butterworth Heinemann, pp. 1-24.
- Nishibayashi, K., Matsuo, T. and Hosoya, Y. 1984. Special issue. Soil cement work method. Stirring impeller, auger system. Oval-DM work method. *Kisoko (Foundation Engineering and Equipment, Monthly)*, Vol.12, No.11, pp. 54-60. Written in Japanese.
- Nishibayashi, K., Matsuo, T., Hosoya, Y. and Kohinata, T. 1988. Studies of getting low improving strength of deep mixing method for latter excavation (Part 2) – Investigation the method by model mixing tests. 23rd Annual Meeting, Japanese Society of Soil Mech. and Found. Engng., pp. 2297-2300. Written in Japanese.
- Nishibayashi, K., Matsuo, T., Hosoya, Y., Hirai, Y. and Shima, M. 1985. Experimental research into mixing devices used for the deep mixing method of soil improvent (Part 4). 20th Annual Meeting, Japanese Society of Soil Mech. and Found. Engng., pp. 1747-1750. Written in Japanese.
- Nishida, K., Koga, Y. & Miura, N. 1996. Energy consideration of the dry jet mixing method. *Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 14-17 May, pp. 643-648.

- Ogawa, M, Terashima, T. and Orita, S. 1990. Special issue: Latest foundation work equipment. Implement of soil foundation, SWING. Kisoko (Foundation Engineering & Equipment, Monthly), Vol. 18, No. 2, pp. 84-87.
- Okumura, R. and Terashi, M. 1975. Deep lime - mixing method of stabilisation for marine clays. Proc. 5th Asian Regional Conf., Bangalore India, Vol.1, pp. 69-75.
- Okumura, T. 1997. Deep mixing method in Japan. Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May, 1996. Vol. 2, pp. 879-887.
- Omine, K., Ochiai, H. and Yoshida, N. 1998. Estimation of in-situ strength of cement-treated soils based on a two-phase mixture model. Soils and Foundations, Vol. 38, No. 4, pp. 17-29.
- Orr, N. 1979. Assessment of an ordered mix. Powder Technology, Vol. 24, pp. 105-107.
- Osterman, J. 1965. Studies on the properties and formation of quick clays. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm. Reprints and Preliminary Reports, No 8, pp. 87-108.
- Padgett, P. 1996. Shear rate has greater influence on cement slurry properties than total mixing energy. Oil & Gas Journal, October 7, pp. 84-91,
- Parfitt, G.D. and Barnes, H.A. 1992. The dispersion of fine particles in liquid media. Chapter 6. In: Mixing in the Process Industries, (Harnby, N., Edwards, M.F. and Nienow, A.W.; eds) Second Edition. London: Butterworth Heinemann, 1992, pp. 99-117.
- Paviani, A. and Pagotto, G. 1991. New technological developments in soil consolidation by means of mechanical mixing, implemented in Italy for the ENEL Power Plant at Pietrafitta. 10th European Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Florence, May 1991. Proc., Vol. 2, pp. 511-516.
- Perry, R.H., Green, D.W. and Maloney, J.O. 1984. Perry's Chemical Engineer's Handbook, (6th Edn). New York : McGraw-Hill. 2300 pp.
- Petry, T.M. and Wohlgenuth, S.K. 1988. Effects of pulveization on the strength and durability of highly active clay soils stabilized with lime and portland cement. Transport Research Record 1190, pp. 38-45.
- Poole, K.R., Taylor, R.F. and Wall, G.P. 1964. Mixing powders to fine-scale homogeneity: studies of batch mixing. Transaction of the Institution of Chemical Engineers, Vol. 42, pp. T305-T315.
- Porbaha, A. 1998. State of the art in deep mixing technology: Part 1. Basic concepts and overview. Ground Improvement, Vol. 2, pp. 81-92.
- Porbaha, A. 1999. Dry jet mixing method for liquefaction remediation. Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 15-17 Oct., Stockholm, Sweden, pp. 27-32.
- Porbaha, A., Tsuchida, T. and Kishida, T. 1999. Technology of air-transported stabilized dredged fill: Part 2; Quality assessment. Ground Improvement, Vol. 3. pp. 59-66.
- Portland Cement Association. 1995. Soil- cement Construction Handbook. EP003.10S. Portland Cement Association, Skokie, Ill. 59 pp.
- Pousette, K., Mácsik, J., Jacobsson, A., Andersson, R. and Lahtinen, P. 1999. Peat soil samples stabilised in laboratory - Experiences from manufacturing and testing. Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 15-17 Oct., Stockholm, Sweden, pp. 85-92.
- Poux, M., Fayolle, P., Bertrand, J., Bridoux, D. and Bousquet, J. 1991. Powder mixing: some practical rules applied to agitated systems. Powder Technology, Vol. 68, pp. 213-234.
- Rajasekaran, G. and Narasimha Rao, S. 1996. Lime column technique for the improvement of soft marine clay. Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May, pp. 443-446.
- Rajasekaran, G. and Narasimha Rao, S. 1997. Lime stabilization technique for the improvement of marine clay. Soils and Foundations, Vol.37, No.2, pp. 97-104.

- Rathmayer, H. 1997. Deep mixing methods for soft subsoil improvement in the Nordic countries. Proc. of IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May, 1996, Vol. 2, pp. 869-877.
- Rielly, C.D., Smith, D.L.O., Lindley, L.A., Niranjana, K. and Phillips, V.R. 1994. Mixing processes for agricultural and food materials: Part 4, Assessment and monitoring of mixing systems. Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 59, pp. 1-18.
- Ries, H.B. 1978. Mixing quality: problems, test methods, and results. International Chemical Engineering. Vol. 18, No. 3, pp. 426-442.
- Rogbeck, Y. 1997. Lime-cement columns on the 'Svealand' rail link: Performance observations. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 14, Hamburg, September. Proc., Vol. 3, pp. 1705-1710.
- Rogbeck, Y., Jelusic, N. and Säfström, L. 1999. Properties of mass- and cell stabilization: Two case studies in Sweden. Proc. Int. Conf. on Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, 15-17 Oct., Stockholm, Sweden, pp. 269-274.
- Rogers, C.D.F. and Glendinning, S. 1994. Deep-slope stabilisation using lime piles. Transport Research Record. No. 1440, pp. 63-70.
- Rogers, C.D.F. and Glendinning, S. 1996. Lime Stabilisation. Proc. of the Seminar Held at Loughborough Univ., Civil and Building Eng. Dept on 25 sept. Thomas Telford. 183 pp.
- Rogers, C.D.F. and Glendinning, S. 1997. Stabilization of shallow slope failures with lime piles. Transport Research Record. No. 1589, pp. 83-91.
- Rose, H.E. and Robinson, D.J. 1965. The application of digital computer to the study of some problems in the mixing of powders. American Institute of Chemical Engineers Symposium Series, Vol. 10, p. 61.
- Saitoh, S., Suzuki, Y. and Shirai, K. 1985. Hardening of soil improved by deep mixing. Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found: Eng., San Francisco, pp. 1745-1748.
- Schaefer, V.R., Abramson, L.W., Drumheller, J.C. and Sharp, K.D. 1997. Ground Improvement, Ground Reinforcement and Ground Treatment: Developments 1987-1997. 616 pp.
- Schofield, C. & Stewart, I.W. 1982. Pigment deagglomeration in paste mixers. Proc. 4th European Conf. on Mixing Held at Leeuwenhorst, Netherlands; April 27-29; BHRA, Cranfield, UK, pp. 157-171.
- Schofield, C. 1974. The definition and assessment of mixture quality in liquids and pastes. First European Conference on Mixing and Centrifugal Separation, Sept. 9-11, 1974. Churchill College, Cambridge, England. Paper C1, pp. 1-13.
- Schofield, C. and Stewart, I.W. 1980. Pigment deagglomeration in a model mixer. The Chemical Engineer, July 1980, pp. 486-489.
- Shen, S.L., and Miura, M.N. 1999. Soil fracturing of the surrounding clay during deep mixing column installation. Soils and Foundations, Vol. 39, No. 5, pp. 13-22.
- Shen, S.L., Miura, M.N., Koga, K. and Nakamura, M.R. 1997. Geotechnical engineering properties of clay around soil-cement columns. Jiban Kogaku Kenkyu Happyokai Happyo Koenshu, Vol. 32, No. 2-2, pp. 2387-2388.
- Sherwood, P.T. 1993. Soil Stabilisation with Cement and Lime. Transport Research Laboratory. State-of-the-Art-Review. HM Stationery Office, London. 152 pp.
- Short, D.G.R. and Etchells, A.W. 1982. Unsolved problems of industrial mixing. Proc. 4th European Conference on Mixing Held at Leeuwenhorst, Netherlands; April 27-29; BHRA, Cranfield, UK, pp. 1-10.
- Silvester, R.S. 1985. Mixing of Non-Newtonian media – A technical review. Volume 12 in the BHRA Fluid Engineering Series. British Hydromechanics Research Association, Cranford, Bedford, England, 92 pp.

- Sivapullaiah, P.V., Prashanth, J.P. and Sridharan, A. 1998a. Delay in compaction and importance of the lime fixation point on the strength and compaction characteristics of soil. *Ground Improvement*, Vol. 2, pp. 27-32.
- Sivapullaiah, P.V., Prashanth, J.P. and Sridharan, A. 1998b. Effect of delay between mixing and compaction on strength and compaction parameters of fly ash. *Geotechnical Engineering Bulletin*, Vol. 7, No. 4, pp. 277-285.
- Söderblom, R. 1974. A new approach to the classification of quick clay research. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm. Reprints and Preliminary Reports, No 55, pp. 13-17.
- Sommer, K. 1981. Mechanisms of powder mixing and demixing. In: *Mixing of Particulate Solids, Proceedings 2nd European Symposium, Institution of Chemical Engineers Symposium Series No. 65*, pp. S1/A/1-S1/A/19.
- Spencer, R.S. and Wiley, R.M. The mixing of very viscous liquids. *Journal of Colloid Science*, Vol 6, No 2, April, pp. 133-145.
- Stabilatören. 1999. *Nyhetsmagasin från Stabilator & Internordisk Spännarmering*, Dec. 1999.
- Sterbacek, Z. & Tausk, P. 1965. *Mixing in the Chemical Industry* (English edition translated by K. Mayer). Oxford: Pergamon Press, 442 pp.
- Stocker, P.T. 1975. Diffusion and diffuse cementation in lime and cement stabilised soils- chemical aspects. *Australian Road Research*, Vol. 5, pp. 6-47.
- Suzuki, Y. 1982. Deep chemical mixing method using cement as hardening agent. *Symposium on Soil and Rock Improvement, Techniques Including Geotextiles, Reinforced Earth and Modern Piling Methods*, Bangkok, Nov.-Dec. 1982. pp. 1.1-1.24.
- Sweeney, D.A., Wong, D.K.H. and Fredlund, D.G. 1988. Effect of lime on highly plastic clay with special emphasis on aging. *Transport Research Record* 1190. pp. 13-23.
- Taki, O. and Bell, R.A. 1998. Soil-cement pile/column - A system of deep mixing. *Geotechnical Special Publication No. 81. Soil Improvement for Big Digs. Proc. of Sessions of Geo-congress 98*. Oct 18-21, Boston, Massachusetts, pp. 59-71.
- Taki, O. and Yang, D.S. 1990. The emergence of soil-cement mixed wall technique and its application in the 1990's. *Deep Foundations Institute Annual Meeting*, Settle, WA.
- Tateyama, K., Fukagawa, R. & Tsujii, T. 1996. Development of a ground monitoring system in Deep Mixing Method. *Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 14-17 May, pp. 665-668.
- Terashi, M. 1998. Theme lecture: Deep mixing method- Brief state of the art. *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 14, Hamburg, Sept. 1997. *Proc.*, Vol. 4, pp. 2475-2478.
- Thompson, M.R. 1966. Lime reactivity of Illinois soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 92, No. SM5.
- Torrance, J.K. 1987. Shear resistance of remoulded soils by viscometric and fall-cone methods: A comparison for the Canadian sensitive marine clays. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, pp. 318-322.
- Tränk, R. & Johnson, U. 1997. Undersökning av KC-pelare med avseende på dess "homogenitet". *Arbetsrapport 4, Svensk Djuptstabilisering*, Linköping. 6+60 s.
- Tschoegl, N.W. 1989. *The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behaviour. An Introduction*. Springer- Verlag Berlin Heidelberg. 769 pp.
- Ueki, H., Hasegawa, K., Suzuki, K. and Bessho, M. 1996. Development of a high pressure jet mixing method for displacement- reducing. *Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, 14-17 May, pp. 767-772.

- Uhl, V.W. & Gray, J.B. 1966. Introduction, Chapter 1. In: *Mixing: Theory and Practice, Volume 1.* (Uhl, V.W. & Gray, J.B., Eds), New York: Academic Press, pp. 1-5.
- Ullbrecht, J. J. & Patterson, G. K. 1985. *Mixing of Liquids by Mechanical Agitation. Chemical Engineering: Concepts and Reviews. Vol. 1.* Gordon and Breach Science Publishers, 345 pp.
- Unami, K. and Shima, M. 1996. Deep mixing method at Ukishima site of the Trans-Tokyo bay highway. Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May, pp. 777-782.
- Uppal, M.L. and Bhasin, N.K. 1979. A laboratory study on the effect of delayed compaction on the strength of soil-lime mixes. *Road Research Papers, Vol. 160*, pp. 1-17.
- Van Ganse, R.F. 1974. Immediate amelioration of wet cohesive soils by quicklime. *Transport Research Record*; 501, pp. 42-53.
- Van Olphen, H. 1977. *An Introduction to Clay Colloid Chemistry. 2nd Edition.* J. Wiley & Sons, New York. 318 pp.
- Venkatarama Reddy, B.V. and Jagadish, K.S. 1993. The static compaction of soils. *Geotechnique, Vol. 43, No. 2.* pp. 337-341.
- Viatek. 1997. *Deep Stabilization Guidebook.* Viatek oy. 57 pp.
- Vilkenas, A., Bredenberg, H. & Persson, O. 1984. Kalkpelarprovtagare. BFR-Rapport. Proj. nr. 821340-0. 49 s.
- VTI. 1999. Gyratorisk packning. VTI aktuellt 5/99, s25.
- Walter, M. 1998. Kemisk stabilisering av jord – en studie av inblandningsprocessen. Examensarbete 98/9. Avd. för Jord- och Bergmekanik. Inst. för Anläggning och Miljö. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm. 62 s.
- Walters, K. 1980. *Rheometry: Industrial Applications.* Materials Science Research Studies Series. John Wiley & Sons. 418 pp.
- Watanabe, T., Nishimura, S., Moriya, M. and Hirai, T. 1996. Development and application of a new deep mixing soil improvement method to form a rectangular stabilized soil mass. Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May, pp. 783-786.
- West, G. and Carder, D.R. 1997. Review of lime piles and lime- stabilised soil columns. TRL Report 305. 16 pp.
- Wikström, A. 1979. Maskinutveckling gällande kalkpelarmaskin LPS-4. Kalkpelarmetoden i praktisk tillämpning. Endags-seminarium Tekniska Högskolan i Stockholm, 27 Nov. 1979.
- Williams, J.C. 1983. The mechanisms of segregation. In: *Mixing in the Process Industries, Volume One: Particulate Mixing, Proceedings of a Course by The Institution of Chemical Engineers at University of Bradford.*
- Yang, D.S., Yagihashi, J.N. and Yoshizawa, S.S. 1998. Swing method for deep mixing. *Geotechnical Special Publication No. 81. Soil Improvement for Big Digs. Proc. of Seccion of Geo-congress 98.* Oct 18-21, Boston, Massachusetts, pp. 111-121.
- Yip, C.W. and Hersey, J.A. 1977. Perfect powder mixtures. *Powder Technology, Vol. 16*, pp. 189-192.
- Yoshida, S. 1996. Shear strength of improved soil at lap-joint face. Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May, pp. 461-466.
- Yoshizawa, H., Okumura, R., Hosya, Y., Sumi, M. and Yamada, T. 1997. JGS TC Report: Factors affecting the quality of treated soil during execution of DMM. Proc. of the IS-Tokyo '96, 2nd Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Tokyo, 14-17 May, 1996. Vol. 2, pp. 931-937.

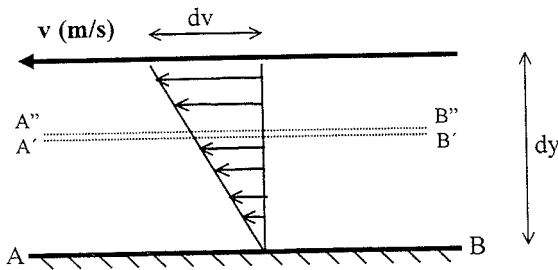
Appendix A

Appendix A

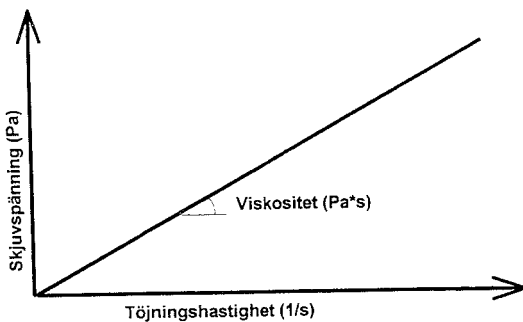
Newtonskt fluid

En fluid där skjuvspänningen är proportionell mot töjningshastigheten klassas som en Newtonskt fluid. Motståndet mot deformation beror av den dynamiska viskositeten μ och är synonymt med den inre friktionen vid laminär strömning, se figur A1. Fluiden rör sig över den fasta ytan AB i pilarnas riktning. P.g.a. den inre viskositeten befinner sig de olika skikten i rörelse relativt varandra där hastighetsfördelningen växer linjärt med avståndet. Skiktet A''B'' drar med sig skiktet A'B' p. g. a. viskositeten i fluiden. Förhållandet mellan töjningshastigheten $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] och skjuvspänningen τ [kPa] i ett Newtonskt fluid visas i figur A2 och ges av ekvationen

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \dot{\gamma} \quad [kPa]$$



Figur A1 Newton's postulat



Figur A2 Förhållandet mellan skjuvspänningen τ [kPa] och töjningshastigheten $\dot{\gamma}$ [s^{-1}] i en Newtonskt fluid.

Den dynamiska viskositeten μ är konstant för Newtonskt fluid. SI enheten för viskositet är "Pascal sekunder" [Pa · s]. Tabell 2.1 visar approximativa viskositeter för några vanliga material vid rumstemperatur. En annan mycket använd enhet för viskositet är "Pois" [P] efter fransmannen Poiseuille (1799-1869). Förhållandet mellan dessa är.

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} \quad \text{eller} \quad 1 \text{ mPa} \cdot \text{s} = 1 \text{ cP}$$

En annan storhet för att känneteckna ett materials reologiska egenskaper är den kinematiska viskositeten ν . Den definieras som den dynamiska viskositeten dividerad med materialets densitet. Dimensionen är m^2/s och kallas "stoke" efter britten Stokes (1842-1912).

Genom den kinematiska viskositeten definieras Reynoldstalet - efter Reynolds (1842-1912):

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad [-]$$

Där v är fluidens medelströmningshastighet genom ett rör med diametern d och ν den kinematiska viskositeten.

Om flödes hastigheten blir för stor kan inte Newton's ekvation användas för att beskriva viskositeten i fluiden. Laminärt strömning övergår vid höga flödes hastigheter till att bli turbulent.

Tabell A1 Viskositeten för några vanliga material vid rumstemperatur (efter Barnes et al. 1989).

Vätska	Approximativ viskositet [Pa · s]
Glas	10^{40}
Smält glas (500°C)	10^{12}
Bitumen	10^8
Smälta polymerer	10^3
Gyllen sirap	10^2
Honung	10^1
Glycerol	10^0
Olivolja	10^{-1}
Olja	10^{-2}
Vatten	10^{-3}
Luft	10^{-5}

Icke Newtonsk viskositet är en materialfunktion som är oberoende av flödesgeometrin (Ulbrecht & Patterson 1985). Viskositeten är hos de flesta fluider en funktion av

töjningshastigheten, temperaturen och trycket. Nedan diskuteras kort dessa påverkande faktorer.

Variation med töjningshastighet

Töjningshastigheten kan uppskattas genom att dela den genomsnittliga flödeshastigheten med en karaktäristisk dimension, d.v.s. radien i en flödande tub eller tjockleken av ett skjuvande lager. Typiska töjningshastigheter visas i Tabell A2.

Tabell A2 Typiska töjningshastigheter för typiska material och processer (efter Barnes et al. 1989).

Situation	Typiska töjningshastigheter [s^{-1}]	Applikation
Sedimentation av fina pulver i en suspenderad vätska	10^{-6} - 10^{-4}	Mediciner, färger
Utflytning m.h.t. ytspänning	10^{-2} - 10^{-1}	Färger, skrivbleck
Dränering under påverkan av gravitation	10^{-1} - 10^1	Målning och bestrykning Toalett emalj
Sprutmaskiner	100-102	Polymerer
Tuggning och sväljning	10^1 - 10^2	Mat
Doppbeläggning	10^1 - 10^2	Färger, konfektion
Blandning och omrörning	10^1 - 10^3	Tillverkning av vätskor
Rörflöde	10^0 - 10^3	Pumpning, Blodflöde
Sprutning och borstning	10^3 - 10^4	Sprutning-torkning, målning, finfördelning av bränsle
Slipning	10^4 - 10^5	Applicering av krämer och lotion mot skinn.
Malning av pigment i flytande material	103-105	Färger, skrivbleck
Höghastighetsbeläggning	10^5 - 10^6	Papper
Smörjning	10^3 - 10^7	Bränslemotorer

Variation med temperaturen

Viskositeten hos en Newtonsk fluid minskar med temperaturen approximativt enligt följande samband:

$$\mu = Ae^{B/T}$$

Där T är den absoluta temperaturen, A och B är konstanter för fluiden. Generellt gäller för en Newtonsk fluid att ju högre viskositet fluiden har ju mer temperaturberoende är den

(Barnes et al. 1989). Det är alltså viktigt att utföra mätningar av reologiska egenskaper med samma temperatur som respektive applikation.

Variation med trycket

Viskositeten hos en fluid ökar exponentiellt med det isotropa trycket. Påverkan på viskositeten är dock relativt liten för tryckdifferenser mindre än en atmosfär. Därför brukar inverkan av tryckdifferens försummas vid reologiska mätningar (Barnes et al. 1989).

Icke- Newtonsk fluid

Det finns ett antal teoretiska och empiriska modeller som beskriver reologiska egenskaper för tidsberoende fluider. De beskriver förhållandet mellan skjuvspänning och töjningshastighet. Den generella ekvationen som beskriver det konstitutiva sambandet för enkla fluider:

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= 0 & \tau < \tau_0 \\ \tau &= \tau_0 + \mu \dot{\gamma} & \tau > \tau_0 \end{aligned}$$

där τ är skjuvspänningen, τ_0 är flytspänningen som måste överskridas för att flöde skall uppkomma, γ är töjningshastigheten, μ är den karaktäristiska viskositeten, se figur A3. Den karaktäristiska viskositeten varierar normalt med töjningshastigheten och temperaturen och kallas då "skenbar viskositet".

Om den karaktäristiska viskositeten är konstant är fluiden Bingham plastisk och beskrivs med ekvationen (Bingham 1922):

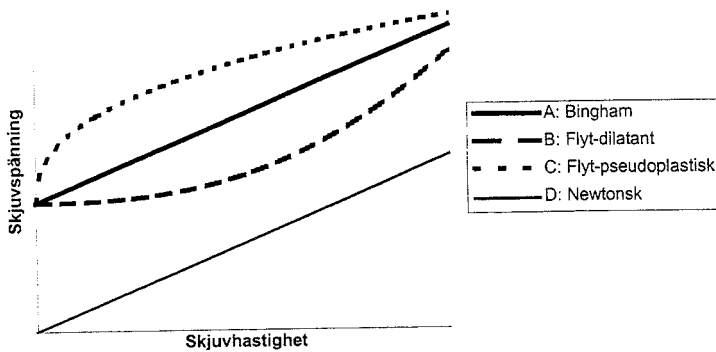
$$\tau = \tau_B + \mu \dot{\gamma} \quad \tau \geq \tau_B$$

Modellen antar att när Bingham's flytspänning τ_B överskrids flyter materialet som en vätska med konstant viskositet. Modellen beskriver en idealt plastisk fluid, se figur A3. Modellen används normalt för att beskriva flödet hos cementbaserat injekteringsbruk (Håkansson 1993).

Normalt finns inte ett linjärt förhållande mellan töjningshastigheten och skjuvspänningen annat än vid höga töjningshastigheter. De flesta fluider visar ett icke-linjärt visköst förhållande, skjuv förtunning eller skjuv förtjockning, kurva C respektive kurva B i figur A3. Ickelinjärt viskoplastiskt flödesbeteende kan beskrivas med följande empiriska ekvation (Herchel & Burkley 1926):

$$\tau = \tau_{HB} + k \dot{\gamma}^m \quad \tau \geq \tau_{HB}$$

där τ_{HB} är flytspänningen, k och m är konstanter som definieras som "konsistensindex" respektive "flödesbeteendeindex". För $m < 1$ är fluiden flyt-pseudoplastiskt och för $m > 1$ är fluiden flyt-dilatant, se figur A3.



Figur A3 Typiska flödeskurvor för fluider med flytspänningar (Nguyen 1992).

Det finns ytterligare ett antal modeller som beskriver fluider som inte tas upp i denna rapport.

En del pastor, livsmedel, färg, leror, etc uppvisar ändringar i de reologiska egenskaperna då tiden för skjuvning ökar. Dessa fluider är tidsberoende och det finns två olika typer. *Tixotropiska fluider* t.ex. färger, tomatketchup, leror. Den skenbara viskositeten minskar med tiden vid konstant töjningshastighet. *Reopeksa fluider* är mycket ovanlig. Den skenbara viskositeten byggs gradvis upp med tiden då fluiden skjuvas. Tidsberoende effekter har liten betydelse vid snabba blandningsförlopp.

Appendix B

APPENDIX B

INBLANDNINGSARBETETS INVERKAN PÅ BLANDNINGSGRADEN VID PELARSTABILISERING FÖRSÖK VID VÄG E18 ARBOGA

Sammanfattning

Föreliggande rapport är en delrapportering av fältförsök som utförs inom projektet "Kontrollmetoder vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cement- och cementpelare", del 1 "Inblandningsmekanismer vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cement- och cementpelare". Projektet ingår i den branschgemensamma forskningsinsatsen som bedrivs inom Svensk Djupstabilisering. Delrapporten avser fältförsök utförda i samband med byggnation av ny sträckning, väg E18 mellan Arboga och Örebro. Fältförsöken utfördes 1997-11-04. Laboratoriearbetet utfördes under perioden 1997-12 till 1998-02.

Målsättningen med försöken är att studera inblandningsarbetets inverkan på blandningskvaliteten. Detta utförs genom att studera:

- 1 Inblandningsarbetets inverkan på fördelningen av inblandningsmedel över tvärsnittet genom att utföra enaxliga tryckförsök på provkroppar från pelare.
- 2 Samband mellan tillfört inblandningsarbete och erhållen störningsgrad i jorden och fördelningen av erhållen hållfasthet över tvärsnittet resp.

För studien av inblandningsarbetets inverkan på blandningskvaliteten tillverkades nio stycken pelare med cement som bindemedel. Pelarna delades i tre grupper där stighastigheten hos inblandningsverktyget varierades i tre intervall, 5, 10 resp. 25 mm/varv. Övriga parametrar hölls i största möjliga mån konstanta. Alldeles efter tillverkningen schaktades pelartvärsnitten fram på nivån -2m och prover stansades ut på olika delar över tvärsnittet. Proverna förvarades i fuktrum och efter 32-35 dygn utfördes enaxliga tryckförsök. Totalt 66 st enaxliga tryckförsök utfördes. Försöken kompletterades med bestämning av vattenkvoter och densiteter.

För studie av sambandet mellan tillfört inblandningsarbete och erhållen störningsgrad i jorden tillverkades också där nio stycken pelare fast utan bindemedel. För denna studie varierades stighastigheten i intervallen 5, 15 och 30 mm/varv. Alldeles efter pelartillverkningen schaktades även dessa tvärsnitt fram på nivån -2m och sondering med fickvingsond utfördes på olika delar av tvärsnittet. Totalt utfördes 108 vingsonderingar över 9 tvärsnitt.

Några slutsatser från försöken:

- Det går utifrån föreliggande studie inte att dra några slutsatser avseende inblandningsarbetets inverkan på fördelningen av bindemedel över tvärsnittet. Resultaten visar att det inte skett någon hållfasthetsökning i huvuddelen av provpelarna. Fördelningen av bindemedel går endast att studeras för de pelare som installerats med den lägsta stigningen, 5 mm/varv. I övriga provpelare återfanns endast spår av bindemedel. Det går således inte att jämföra fördelningen av bindemedel för olika stigningar med avseende på hållfasthetstillväxten. Kompletterande provtagning och bestämning av kalciumoxidhalten tyder på låga halter med cement vid angiven nivå, -2m under markytan.
- En viktig erfarenhet från försöken är att det idag är mycket svårt att utföra parameterstudier i fält eftersom sådana försök ofta erfordrar att föreliggande parametrar varierar

i ett brett spann. Eftersom dagens inblandningsprocess är utformad och konstruerad för ett relativt begränsat intervall, med avseende på stighastigheten hos inblandningsverktyget, erhålls problem då systemet pressas till ytterligheter under ett snävt tidsintervall. Parameterstudier i fält bör föregås av laboratoriestudier som på ett lättare och mer kontrollerbart sätt kan indikera på de för blandnings kvalitén mest relevanta parametrarna och hur starka deras inverkan är på resultaten.

- Studien av blandningsarbetets inverkan på störningsgraden i jorden visar att det krävs ett mycket omfattande blandningsarbete för att jordens struktur helt skall brytas upp. Man kan utifrån resultaten i denna studie anta att en 6-faldig ökning av blandningstiden, en ökning av stigningen från 30mm/varv till 5mm/varv, inte markant förändrar förutsättningarna för inblandningsprocessen med avseende på de reologiska egenskaperna. Under rådande förhållanden är det distributiv blandning som är den mest sannolikt verksamma blandningsmekanismen. Förhållandena kan vara annorlunda för andra typer av jordar, t.ex. kvicklera.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Innehållsförteckning.....	4
1 Inledning.....	5
1.1 Allmänt.....	5
1.2 Problemställning	5
1.3 Syfte	6
2 Genomförande.....	6
3 Resultat.....	11
3.1 Labresultat, pelare grupp 1.....	11
3.2 Labresultat, pelare grupp 2.....	13
3.3 Labresultat, pelare grupp 3.....	15
3.4 Kalciumoxidhalt.....	17
3.3 Störningsgraden i pelare, grupp 4-6	18
4 Diskussion	20
Referenser.....	22

1 Inledning

1.1 Allmänt

Föreliggande rapport är en delrapportering av fältförsök som utförs inom projektet "Kontrollmetoder vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cement- och cementpelare", del 1 "Inblandningsmekanismer vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cement- och cementpelare". Projektet ingår i den branschgemensamma forskningsinsatsen som bedrivs inom Svensk Djupstabilisering. Delrapporten avser fältförsök utförda i samband med byggnation av ny sträckning, väg E18 mellan Arboga och Örebro.

Fältförsöken utfördes 1997-11-04 och laboratoriearbeten utfördes under perioden 1997-12 till 1998-02.

1.2 Problemställning

Vid djupstabilisering av lösa jordar med kalk-, kalk/cement- eller cementpelare existerar idag ingen rutinmässig kontroll av den uppnådda fördelningen av bindemedel över tvärsnittet i pelare. Kunskapen om hur olika inblandningsarbeten påverkar fördelningen av inblandningsmedel över tvärsnittet d. v. s. blandningsgraden och hållfasthetstillväxten är mycket begränsad.

I dag uppställs i regel specifika krav på några parametrar i inblandningsprocessen, beställaren specificerar krav på bl. a. inblandningsmängd, stigning och rotationshastighet. Dessa "recept" grundar sig på laboratorieförsök, erfarenhet eller vid större projekt på några provpelare som installerats i anslutning till den aktuella lokalen. En god indikation på att erfarenheterna är bristfälliga är att dessa "recept" är mycket lika oavsett vilka egenskaper den aktuella jorden har. Vi vet t.ex. att det kan krävas stora skillnader i arbete att bryta upp strukturen i två olika lerjordar trots att de har samma sensitivitet (lera fr. västkusten - lera fr. mälardalen). Ett tillfört inblandningsarbete kan uppnå olika goda resultat med avseende på fördelningen av bindemedel i jorden beroende på jordens förmåga att motstå störning. Vid studier av inblandningsarbetets inverkan på uppnådd blandningsgrad bör således jordens egenskaper beaktas i form av dess sensitivitet och framförallt den störningsgrad i jorden ett visst inblandningsarbete åstadkommer. Störningsgraden, DR (disturbance ratio), är kvoten mellan ostörd skjuvhållfasthet i jorden och skjuvhållfastheten efter en viss omrörning, *Massarsch (1976)*

$$DR = \frac{\tau_{ostörd\ jord}}{\tau_{partiellt\ störd\ jord}}$$

Störningsgraden i en jord kan således variera mellan värdet ett och värdet på sensitiviteten.

1.3 Syfte

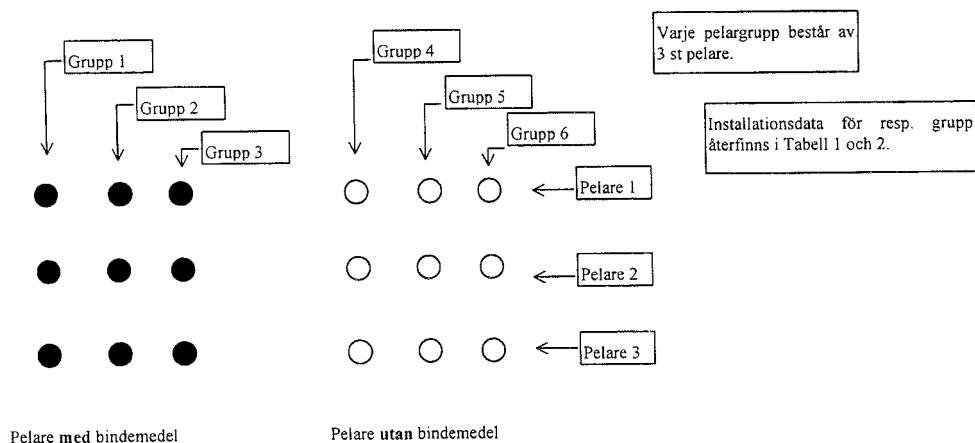
Syftet med försöken är att studera:

- 1 Inblandningsarbetets inverkan på fördelningen av inblandningsmedel över tvärsnittet genom att utföra enaxliga tryckförsök på provkroppar från pelare.
- 2 Samband mellan tillfört inblandningsarbete och erhållen störningsgrad i jorden och fördelningen av erhållen hållfasthet över tvärsnittet resp.

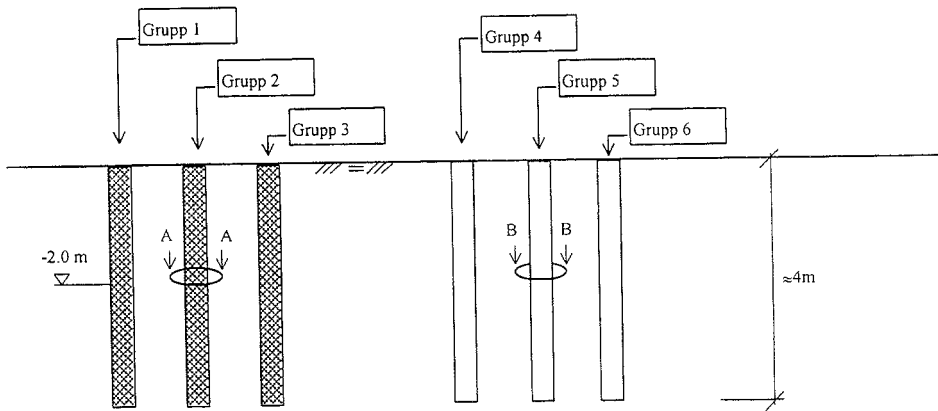
2 Genomförande

Eftersom huvudsyftet med försöken är att studera inblandningsarbetets inverkan på fördelningen av inblandningsmedel över tvärsnittet så varierar *stigningen* hos inblandningsverktyget vid pelarinstallationen. För att kunna studera det faktiska värdet på inblandningsarbetet måste den tillförda energimängden i systemet uppmätas genom att t.ex. mäta vridmomentet samt det arbete som luftstrålen utför. Vid utförande av den aktuella studien uppmättes inte någon parameter som ger en uppskattning av den tillförda energimängden i systemet. Som ett indirekt mått användes därför stigningen på inblandningsverktyget som ett mått på blandningsarbetet.

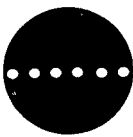
För studien av inblandningsarbetets inverkan på fördelningen av inblandningsmedel installerades nio stycken provpelare med cement som bindemedel, i tre grupper, enligt Figur 1 och 2. För studien av sambandet mellan tillfört inblandningsarbete och erhållen störningsgrad i jorden installerades nio stycken provpelare i tre grupper, utan bindemedel. Installationsdata för de 18 provpelarna redovisas i Tabell 1 och 2.



Figur 1 Plan över pelarinstallationen. Totalt installeras 6st grupper med vardera 3 pelare.



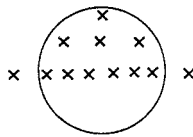
Sektion



Upptagning av provkroppar för enaxliga tryckförsök.

6 prover/pelare

Snitt A-A



Uppmätning av störmängden. DR genom vingsonering (fickvingsond)

12 sonderingar/pelare

Snitt B-B

Figur 2 Sektion över pelarinstallationen.

Tabell 1 Installationsdata för provpelarna. Gemensamma parametrar för alla provpelare.

- | | |
|--------------------------------------|---------------|
| • Pelarlängd | 4 m |
| • Pelardiameter | 600 mm |
| • Blandningsverktyg | Normalverktyg |
| • Neddrivning av blandningsverktyget | 100 mm/varv |
| • Rotationshastighet | 200 varv/min |
| • Inblandningsmedel | Cement |

Tabell 2 *Installationsdata för provpelarna. Värden på inblandad mängd cement och stigning enligt registrering från pelarmaskinen.*

Grupp	Pelare	Inblandad mängd cement kg/m	Stigning mm/varv
1	11	25	5
	12	22	5
	13	22	5
2	21	20	10
	22	18	9
	23	21	15
3	31	18	24
	32	17	22
	33	17	25
4	41	0	5
	42	..	..
	43	..	..
5	51	0	15
	52	..	..
	53	..	..
6	61	0	30
	62	..	..
	63	..	..

Kort efter att provpelarna installerats schaktades pelartvärsnitten fram på nivån -2m. Studien begränsades till att studera pelartvärsnitten på en nivå. På så sätt var det möjligt att utföra en omfattande studie med relativt många pelare och många provtagningar. Jorden på den aktuella nivån -2m bestod av en grå, något gyttjig lera, sulfidfläckig. I Tabell 3 sammanställs resultat från laboratorieundersökning på jorden.

Tabell 3 Jordens egenskaper på nivån -2m.

Densitet	1,45 ton/m ³
Vattenkvot	107 %
Konflytgräns	100 %
Skjuvhållfasthet, konförsök	15-17 kPa
Skjuvhållfasthet, enaxl. tryckf.	15 kPa
Sensitivitet	12
Rapiditet *	2-3

* Jordprov 50*40 mm skakas 250 ggr i Casagrandes skakapparat. Provet bedöms därefter efter en tiogradig skala 1-10 med avseende på hur provet påverkats av arbetet. Rapiditet 2 innebär att provet inte påverkats nämnvärt. Rapiditet 3 innebär att en 1mm tjock zon påverkats i provets underkant.

Fördelningen av bindemedel över pelartvårsnittet studerades indirekt genom att utföra enaxliga tryckförsök på provkroppar tagna från provpelarna. Fördelningen av bindemedel över tvärsnittet antas motsvara erhållen hållfasthetstillväxt i provkropparna. Provkropparna, 50x170 mm stansades och frilades för hand enligt snitt A-A, Figur 2. Totalt togs 66 provkroppar från de nio provpelarna enligt Tabell 4.

Provpelarna i grupp 1-3 tillverkades med enbart cement som bindemedel. Anledningen till att enbart använda cement är:

- 1 Minska risken för problem vid provtagning
- 2 Osäkerheter ang. förhållandet kalk/cement elimineras
- 3 Cement erfordrar bättre inblandning.

Provkropparna förvarades i fuktrum med temperaturen +20°. Efter 32-35 dygn utfördes enaxliga tryckförsök med deformationshastighet 0,5 mm/min. Dessutom bestämdes skrymdensitet och vattenkvot i samband med de enaxliga tryckförsöken.

Som ett komplement till bestämningen av hållfasthetsfördelningen över tvärsnittet utfördes bestämningar av kalciumoxidhalten i 6 stycken av provpelarna enligt Tabell 4. Proverna för bestämning av CaO-halten bereddes genom att ta bitar från olika delar av tvärsnittet så att varje prov representerade ett medelvärde för hela tvärsnittet. Denna studie utfördes för att baklänges kunna uppskatta utmatad mängd cement på den aktuella provtagningsnivån.

Det andra syftet med försöken var att studera sambandet mellan tillfört inblandningsarbete och erhållen störningsgrad i jorden. Denna studie är mycket viktig för att koppla ihop sambandet inblandningsarbete-blandningsgrad med jordens egenskaper, d. v. s.

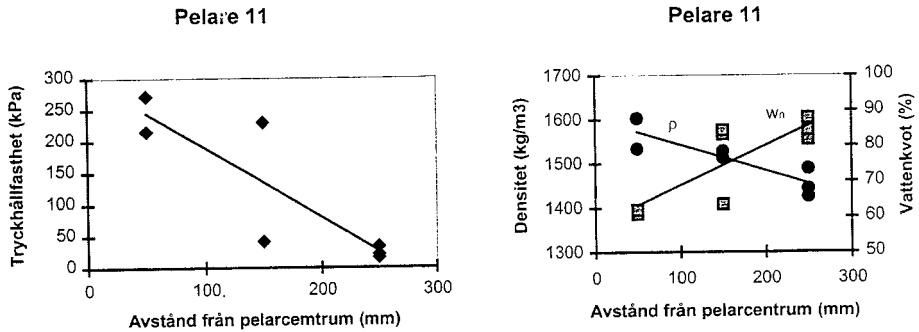
jordens känslighet för omrörning. För detta ändamål tillverkades nio pelare i grupp 4-6 enligt Figur 1 och Tabell 2, *utan* bindemedel. För att bestämma störningsgraden utfördes vingsondering på olika delar av pelartvärsnitten enligt snitt B-B, Figur 2 och i omgivande jord. Omfattningen av vingsonderingen redovisas i Tabell 4.

Tabell 4 Försöksomfattningen.

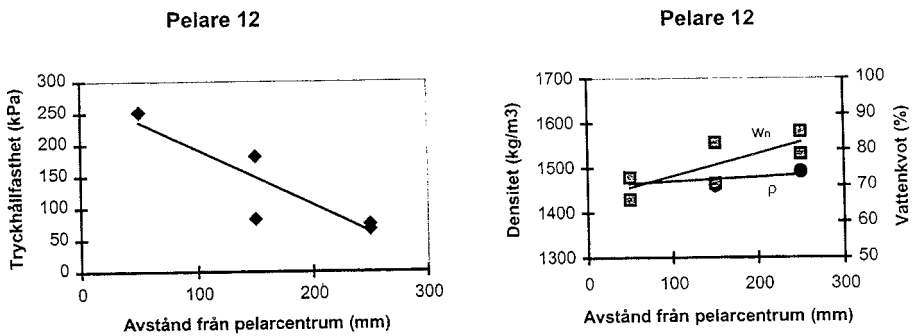
Grupp	Pelare	Provtagning		CaO-halt
		Kolvprover 50x170mm	Fickvingsondering Lomme vingsond	
1	11	10		1
	12	6		1
	13	6		
2	21	10		1
	22	6		1
	23	6		
3	31	10		1
	32	6		1
	33	6		
4	41		12	
	42		12	
	43		12	
5	51		12	
	52		12	
	53		12	
6	61		12	
	62		12	
	63		12	
Totalt		66	108	6

3 Resultat

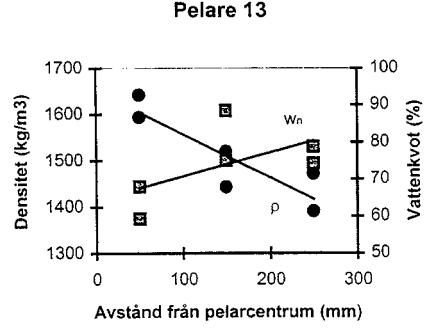
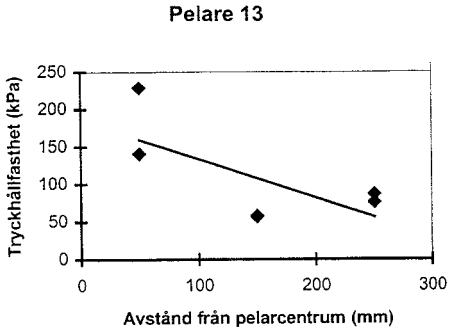
3.1 Labresultat, pelare grupp 1



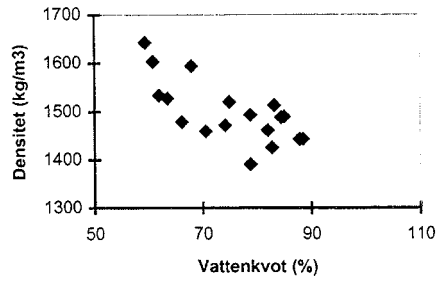
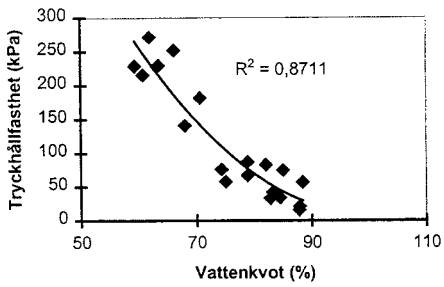
Figur 3 Uppmätt tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot från provkroppar tagna från pelare 11. Cirklarna i grafen till höger avser densiteten och kvadraterna avser vattenkvoten.



Figur 4 Uppmätt tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot från provkroppar tagna från pelare 12.



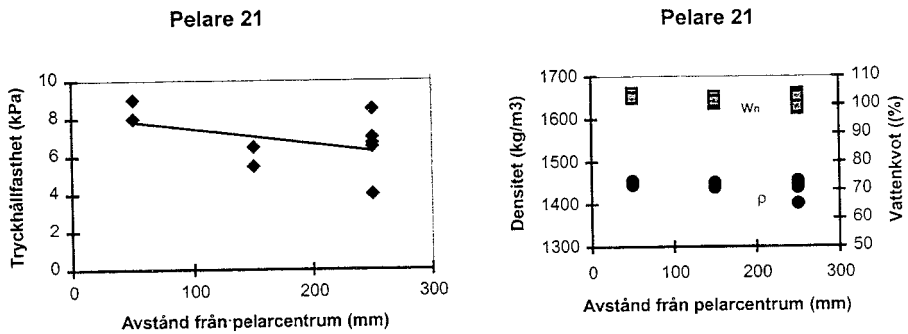
Figur 5 Uppmätt tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot från provkroppar tagna från pelare 13.



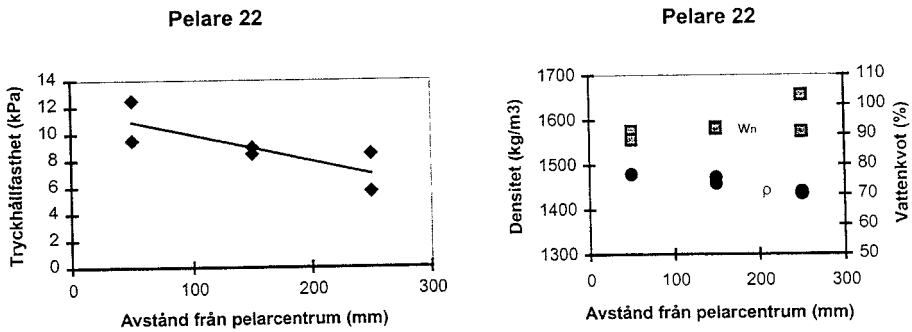
Figur 6 Tryckhållfastheten och densiteten som funktion av vattenkvoten på provkroppar från grupp 1, pelare 11, 12 och 13.

3.2

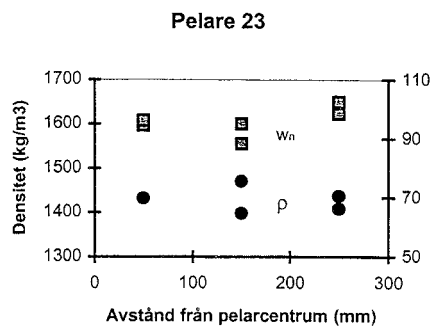
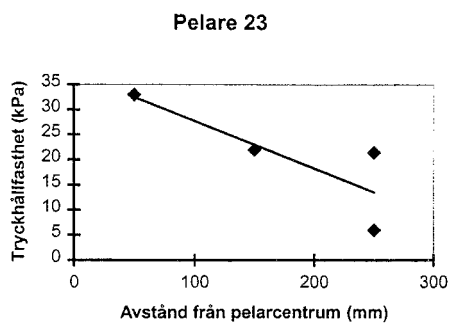
Labresultat, pelare grupp 2



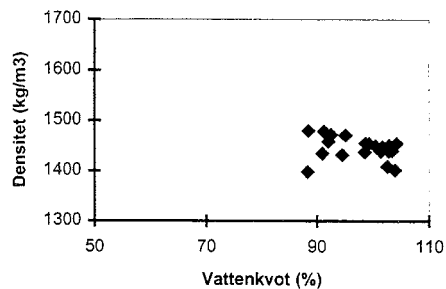
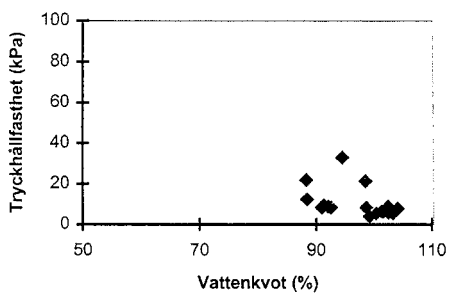
Figur 7 Uppmätt tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot från provkroppar tagna från pelare 21. Cirklarna i grafen till höger avser densiteten och kvadraterna avser vattenkvoten.



Figur 8 Uppmätt tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot från provkroppar tagna från pelare 22.



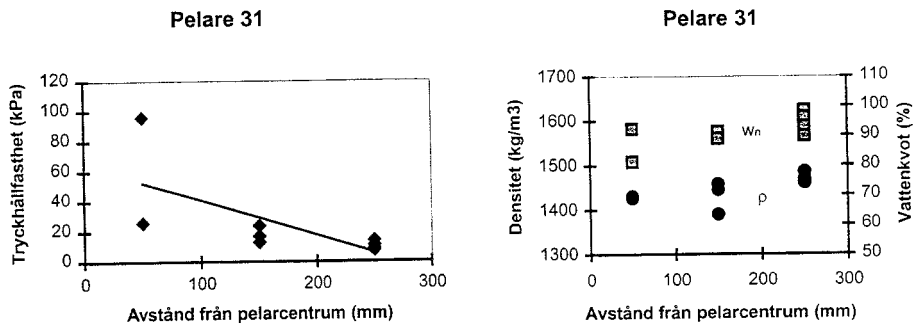
Figur 9 Uppmätt tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot från provkroppar tagna från pelare 23.



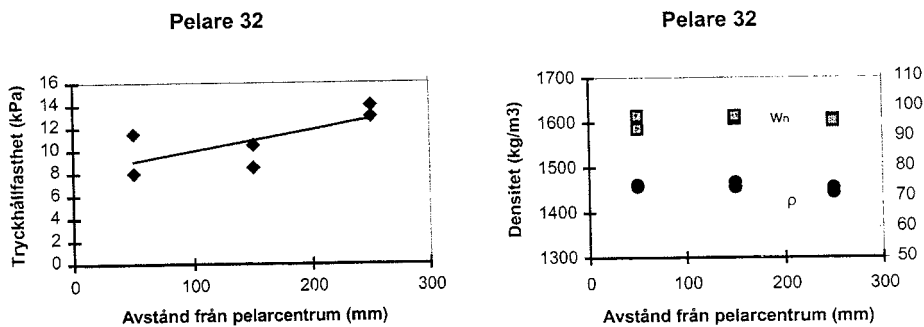
Figur 10 Tryckhållfastheten och densiteten som funktion av vattenkvoten på provkroppar från grupp 2, pelare 21, 22 och 23.

3.3

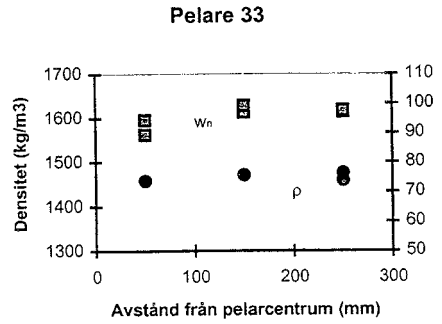
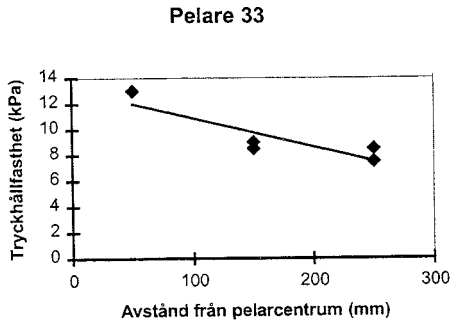
Labresultat, pelare grupp 3



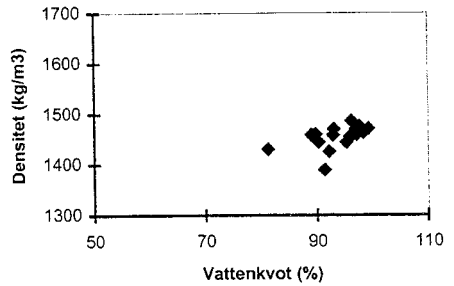
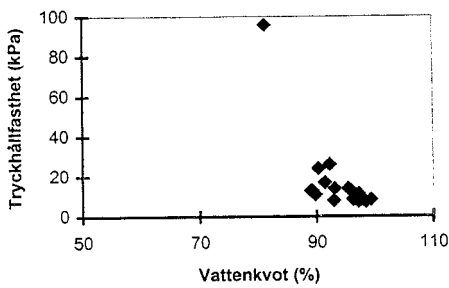
Figur 11 Uppmätt tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot från provkroppar tagna från pelare 31. Cirklarna i grafen till höger avser densiteten och kvadraterna avser vattenkvoten.



Figur 12 Uppmätt tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot från provkroppar tagna från pelare 32.



Figur 13 Uppmätt tryckhållfasthet, densitet och vattenkvot från provkroppar tagna från pelare 33.



Figur 14 Tryckhållfastheten och densiteten som funktion av vattenkvoten på provkroppar från grupp 3, pelare 31, 32 och 33.

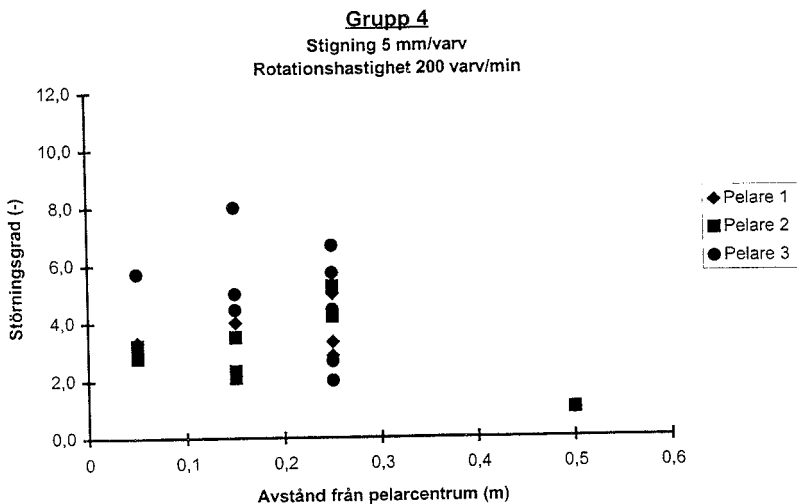
3.4 Kalciumoxidhalt

Tabell 5 Resultat från undersökning avseende kalciuminnehållet i sex provpelare på nivån -2 m under markytan.

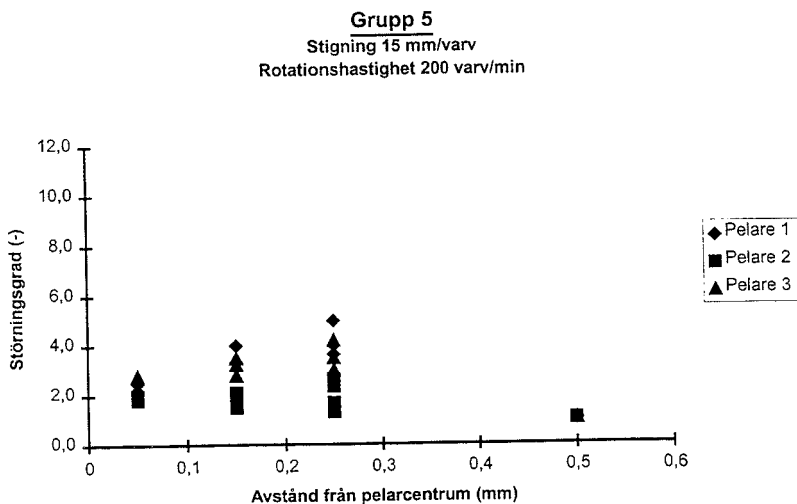
Prov från pelare	CaO-halt %- vikt	Motsvarande inbl. mängd cement * kg/m pelare	Struktur
11	3,62	12,1	Tuffliknande
12	2,18	7,1	Tuffliknande
21	1,02	3,3	Musselskivig
22	0,35	1,1	Musselskivig
31	2,45	8,0	Mellan tuff och musselskivig
32	0,43	1,4	Musselskivig

* Beräkningen utförd med följande antaganden; Skrymdensiteten för jorden $\rho_j=1,45$ ton/m³; Vattenkvoten i jorden $w_n=107$ %; CaO-halten=63 % för Std P cement.

3.3 Störningsgraden i pelare, grupp 4-6

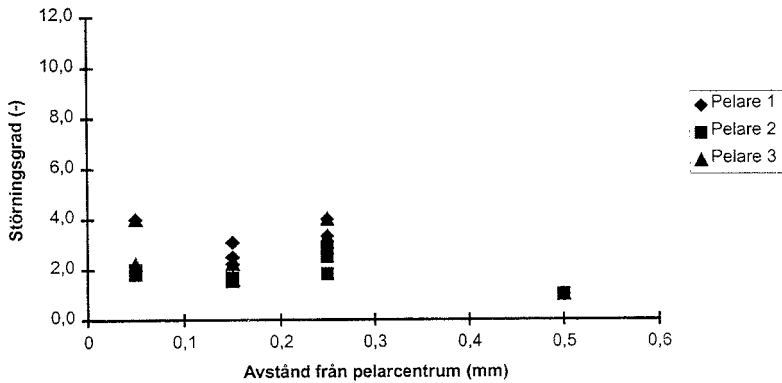


Figur 15 Uppmätt störningsgrad i pelare, grupp 4. Pelarna är installerade utan bindemedel.



Figur 16 Uppmätt störningsgrad i pelare, grupp 5. Pelarna är installerade utan bindemedel.

Grupp 6
Stigning 30 mm/varv
Rotationshastighet 200 varv/min



Figur 17 Uppmätt störningsgrad i pelare, grupp 6. Pelarna är installerade utan bindemedel.

Tabell 6 Sammanställning av uppmätt störningsgrad i 9 stycken pelare, grupp 4-6.

Grupp	Pelare	Stigning mm/varv	Blandningsarbete * varv/meter	Störningsgrad			Medel för gruppen
				min	max	medel	
4	1	5	210	2,9	5,7	4,2	4,3
	2	-"	-"	2,1	5,3	3,6	
	3	-"	-"	2,0	8,0	5,0	
5	1	15	78	2,2	5,0	3,6	2,9
	2	-"	-"	1,3	2,6	2,0	
	3	-"	-"	3,6	4,2	3,2	
6	1	30	43	2,2	4,0	3,3	2,8
	2	-"	-"	1,5	2,6	2,0	
	3	-"	-"	1,6	4,0	2,9	

* Summan av antalet rotationer per meter pelare vid neddrivning och stigning av inblandningsverktyget.

4 Diskussion

I Figur 3 till 14 redovisas resultaten från laboratorieförsöken på provkropparna 50x170mm tagna från nio provpelare i grupp 1 till 3. De enaxliga tryckförsöken som utfördes på provkroppar tagna från pelarna i grupp 1 visar en tydlig tendens att hållfastheten är högre i pelarnas centrala delar, Figur 3 till 5. Tryckhållfastheten är 150-280 kPa i zonen 50 mm från pelarcentrum och 20-100 kPa i zonen 250 mm från pelarcentrum. På motsvarande vis sätt ser vi att vattenkvoten varierar över pelartvårsnittet. I zonen 50 mm från pelarcentrum ligger uppmätta vattenkvoter på runt 58-72 % och i zonen 250 mm är vattenkvoten 75-88 %. I Figur 6 redovisas erhållen tryckhållfasthet som funktion av uppmätt vattenkvot för pelarna i grupp 1. Som vi kan se så erhålls en god korrelation mellan dessa parametrar. I Figur 6 redovisas också den uppmätta densiteten som funktion av uppmätt vattenkvot.

Vid en studie av hållfasthetstillväxten i provpelarna i grupp 2 ser vi att det inte skett någon hållfasthetsökning, Figur 7 till 9. Resultaten från de enaxliga tryckförsöken visar med något undantag att tryckhållfastheten är lägre än för den ostabiliserade omgivande jorden. De uppmätta värdena på skrymdensiteten och vattenkvoten är i samma storleksordning som för den omgivande jorden, Figur 10. Resultaten från de enaxliga tryckförsöken och uppmätningen av skrymdensiteten och vattenkvoten på provkropparna tagna från provpelarna i grupp 3 visar på liknande resultat, Figur 11 till 14. Dock ser vi att en provkropp från pelare 31 erhållit en enaxlig tryckhållfasthet på 100 kPa, Figur 11. Den okulära besiktningen av provkropparna från provpelarna i grupp 2 till 3 visar att det endast återfanns enstaka korn av cementgel i några provkroppar. I ett antal provkroppar kunde inga spår av cement återfinnas alls. En rimlig förklaring till att det ej blivit någon hållfasthetsökning i provpelarna i grupp 2 och 3 är att det ej utmatats tillräckligt med bindemedel. Utmatningsdiagrammen visar dock att det gått ut cement på nivån -2 m under markytan för alla provpelare i grupp 2 och 3, se Tabell 2.

Som ett komplement till upptagningen av provkroppar för enaxliga tryckförsök utfördes bestämningar av CaO-halten i två provpelare per grupp, Tabell 5. Bestämningen av CaO-halten utfördes för att se hur stor mängd cement som matats ut i resp. pelare. Efter en omräkning från CaO-halt (vikt-%) till motsvarande inblandad mängd cement visar resultaten på en stor spridning. Den största inblandade mängden cement är enligt uppmätningen/beräkningen 12,1 kg/m pelare och återfinns i pelare 11. Den på maskinen registrerade mängden cement var för motsvarande pelare 25 kg/m. För övriga pelare erhöles betydligt större avvikelser mellan uppmätt/beräknad mängd och registrerad mängd. Det är intressant att jämföra resultaten från uppmätningen av CaO-halten mellan pelare 12 och pelare 31. Enligt analysen innehåller dessa pelare cementmängder på 7,1 kg/m resp. 8,0 kg/m. För pelare 12 erhöles en relativt god hållfasthetstillväxt på upp till 250 kPa tryckhållfasthet, medan för pelare 31 erhöles ingen hållfasthetstillväxt alls (förutom ett prov där tryckhållfastheten var 100 kPa). Det återfanns dock spår av cement i de flesta av provkropparna från pelare 31, fast materialet hade en mycket grymig struktur. Vidare kan man notera att pelare 12 erhöles en relativt god hållfasthetstillväxt trots att den uppmätta/beräknade mängden cement var endast 7,1 kg/m. Om det inte är så att

blandningsarbetet har en mycket stor inverkan på hållfasthetstillväxten kan man ifrågasätta denna studie av CaO-halten i pelarna.

Huvudsyftet med föreliggande studie var att studera inblandningsarbetets inverkan på fördelningen av bindemedel över tvärsnittet. Resultaten från labförsöken på provkroppar tagna från pelare i grupp 1-3 visar dock att det ej går att analysera resultaten med avseende på huvudsyftet eftersom det inte skett någon hållfasthetsökning alls i huvuddelen av provpelarna. Fördelningen av bindemedel går endast att studeras för de pelare som installerats med den lägsta stigningen, 5 mm/varv. Eftersom det ej skett någon hållfasthetstillväxt i de pelare (på -2 m nivån) som installerats med stigning 10-25 mm/varv går det ej att jämföra fördelningen av bindemedel för olika stigningar med avseende på hållfasthetstillväxten.

Resultaten från de försök som utfördes på provpelarna i grupp 1 till 3 belyser svårigheterna vid parameterstudier i fält. Det existerar alltid en stor risk med att utföra fältförsök innan man genom laborieförsök har belyst de fenomen som sannolikt är de viktigaste och de variabler som är mest relevanta i mera komplexa blandningsprocesser. Vidare är det svårt att utföra parameterstudier med blandningsprocesser där de olika parametrarna är känsliga för inbördes variationer. D.v.s. det är svårt att snabbt ställa om hela maskinprocessen så att en variabel kan testas med stora intervall. Normalt hålls stighastigheten inom ett relativt snävt intervall, c:a 15-30 mm/varv, vid normal produktion. För att kunna studera stighastighetens inverkan på fördelningen av bindemedel över tvärsnittet erfordras sannolikt ett betydligt större intervall. Utifrån erfarenheterna från denna enskilda studie är det mycket svårt att erhålla en tillfredsställande inblandningsprocess då systemet pressas till ytterligheter under ett snävt tidsintervall.

Det andra syftet med försöken var att studera sambandet mellan tillfört blandningsarbete och erhållen störningsgrad i jorden. Figur 15 till 17 samt Tabell 6 redovisar resultaten från studien av den störningsgrad som erhållits för olika blandningsarbeten. Stigningen varierades för de tre grupperna av provpelare, grupp 4 till 6, som tillverkades utan bindemedel. Stigningen hos inblandningsverktyget varierades med en faktor 6 mellan den största och minsta stigningen. Vingsonderingen med fickvingsond visar att störningsgraden är i medeltal 4,3 för de pelare som installerades med stigning 5 mm/varv (210 varv/meter pelare inkl. neddrivningen), Tabell 6. Spridningen är dock stor, störningsgrad 2,0-8,0 uppmättes. Den erhållna störningsgraden är på motsvarande sätt i medeltal 2,9 för pelarna som installerades med stigning 15 mm/varv (78 varv/meter pelare inkl. neddrivningen). Vi kan här se att spridningen i erhållen störningsgrad är mindre, 1,3-5,0. För de tre pelarna i grupp 6 som installerades med stigning 30 mm/varv (43 varv/meter pelare inkl. neddrivningen) uppmättes störningsgrad på i medeltal 2,8. Spridningen mellan uppmätta värden pelarna i grupp 6 är mindre, 1,5-4,0 än spridningen i erhållen störningsgrad i pelarna i grupp 3 och 4. Sensitiviteten som är ett mått på den maximala störningsgrad som kan erhållas uppmättes med fickvingsonden till 12.

Vi kan utifrån resultaten från fickvingsonderingarna se att det krävs relativt omfattande blandningsarbete för att jordens struktur helt skall brytas upp. Den största uppmätta störningsgraden var 8,0 i en pelare i grupp 4. Det är intressant att notera att vi erhåller många uppmätta värden på runt 2-3 oavsett stigning på blandningsredskapet. Det verkar som om jordens skjuvhållfasthet vid omrörning reduceras relativt snabbt med en faktor 2-

3 för att sedan för en fortsatt blandning bibehålla större delen av hållfastheten trots ett omfattande blandningsarbete. En minskning av stigningen med en faktor 3, från 30 mm/varv till 15 mm/varv ger ingen signifikant skillnad i uppmätt störningsgrad i jorden. Man kan utifrån resultaten i denna studie anta att en ökning på stigningen från 30 mm/varv till 5 mm/varv inte markant förändrar förutsättningarna för inblandningsprocessen. Det är av intresse att studera ifall ett blandningsredskap med betydligt större area mot rörelseriktningen (t.ex. ett flertal blad med 45°-90° vinkel mot horisontalplanet) ger annorlunda resultat.

Liknande resultat erhålls vid en studie i Norrala, Söderhamn, *Larsson (1997)*. På samma sätt som i föreliggande studie så installerades ett antal pelare utan bindemedel och med varierande blandningsarbete. I stället för att variera stigningen så varierades neddrivningen av inblandningsverktyget från 100 mm/varv till 22 mm/varv. Syftet med studien var att studera huruvida ett ökat blandningsarbete vid neddrivningen av blandningsverktyget påverka förutsättningarna för blandningsprocessen. Störningsgraden i jorden vid ett blandningsarbete på 55 varv/meter varierade mellan 1,2 och 2,5. För ett blandningsarbete på 91 varv/meter erhålls en störningsgrad på runt 2,5 med relativt liten spridning mellan resultaten. En ökning av det totala blandningsarbetet från 55 varv/meter till 91 varv/meter förändrade således inte förutsättningarna signifikant för blandningsprocessen. Intressant att notera är att jordens skjuvhållfasthet snabbt reducerades med en faktor 2- 2,5 men att det sedan krävs ett stort blandningsarbete för att bryta upp jordens struktur ytterligare.

Speciellt lerjordar har mycket utpräglade visköst- elastiska egenskaper som för blandningsprocessen innebär att materialrörelser runt blandningsverktyget snabbt dör ut. Om inte jordens struktur bryts upp och jorden erhåller viskösa egenskaper så blir den dominerande blandningsmekanismen rimligtvis distributiv blandning. Enklare uttryckt betyder det att de partiklar som står i omedelbar kontakt med blandningsverktygets delar flyttas något av den rörelse som verktyget har. Andra blandningsmekanismer såsom laminär skjuvning har rimligtvis liten verkan eftersom jorden inte deformeras kontinuerligt av blandningsverktygets rörelse.

Referenser

- Larsson, S., 1997. Undersökning av effekten av ett ökat blandningsarbete vid neddrivning av inblandningsarbetet. Rapport, Ostkustbanan, Norrala. 5 s.
- Massarsch, K.R., 1976. Soil Movements Caused by Pile Driving in Clay. Rapporten JoB No. 6. Ph D Thesis, Dept. of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm. 261 pp.
- Söderblom, R., 1974. A New Approach to the Classification of Quick Clay Research. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm. Reprints and Preliminary Reports, No 55, pp. 13-17.

Appendix C

Deep stabilisation of soft soils - laboratory method for design and development of the dry jet mixing method

Stabilisation profonde de sols tendres-methode de laboratoire pour la mise au point et le developement d'une methode de stabilisation chimique du sol

S. Larsson

Tyréns Infrakonsult AB, Stockholm, Sweden

S-E. Rehnman & M. Walter

Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden

Keywords: dry jet mixing method, soil stabilisation, mixing mechanism, mixing device, laboratory method, rheology, chemical binder

ABSTRACT: The fundamentals of the mixing process of the dry jet mixing method are poorly understood today. There is also a lack of laboratory methods that consider the different stages of the mixing process. In laboratory investigations, it is important that the mixing process is similar to the on-site application. This paper presents a simple and economical laboratory method, where the different stages of the mixing process can be considered separately. A series of tests with stabilised soil samples shows that the mixing energy influences the strength increase. This study points at the importance of new laboratory methods.

RÉSUMÉ: Les bases des procédés intervenant dans la stabilisation chimique du sol sont mal compris aujourd'hui. Il existe un manque de méthodes de laboratoire considérant les étapes du procédé de mélange. Il est important que les procédés de mélange en laboratoire soient les mêmes in-situ. Le présent article décrit une méthode de laboratoire simple et économique dans laquelle les étapes de la procédure de mélange sont considérées séparément. Une série de tests sur des échantillons de sols stabilisés montre que l'énergie du mélange influence l'augmentation de résistance. Cette étude souligne l'importance de nouvelles techniques en laboratoire.

1 INTRODUCTION

The dry jet mixing method is the most common method to stabilise and to reduce settlement of soft soils in Sweden. Although the method has been used extensively for more than 20 years, the knowledge about the mixing process is limited. There is a need for methods to investigate the different stages of the mixing process.

At present, laboratory investigations are performed mainly to decide whether a soil is possible to stabilise using chemical binders. The laboratory tests provide a basis when deciding what type and the amount of binder to be added. In Sweden there is a standardised method for this purpose, Carlsten & Ekström (1995). The binder is mixed in a dough mixer and then compacted in plastic soil sampling tubes. However, important parameters, which influence the mixing process, e.g. type of mixing device, mixing time and rotational speed, are not considered by this method.

Few investigations have been published concerning different parameters in the mixing process. Hishida et al. (1996) investigated the relationship between the mixing energy and the strength of stabilised laboratory soil samples. The on-site strength is often much lower than the strength of laboratory samples. This Japanese study shows that one reason is the difference in mixing energy.

In this paper, a simple and economical method to study the different parameters affecting the mixing process of the dry jet mixing method, is presented. Test results are presented which show the effect of the mixing time, of two mixtures of binders and of two different mixing devices, on the unconfined compression strength of the stabilised soil. It is important to note the simplifications of the proposed laboratory procedure compared to the on-site application. The mixing on-site and the parameters influencing the mixing process are also discussed in this paper.

2 THE MIXING PROCESS

The main purpose of the mixing process, applying the dry jet mixing method, is to disperse the binder into the soil, so as to get an even distribution of the binder over the whole stabilised soil column, in order to obtain the required strength. The mixing process can be divided into three stages; 1) Penetration of the mixing device to required depth; 2) Dispersion of the binder into the soil, and finally; 3) Molecular diffusion, Figure 1.

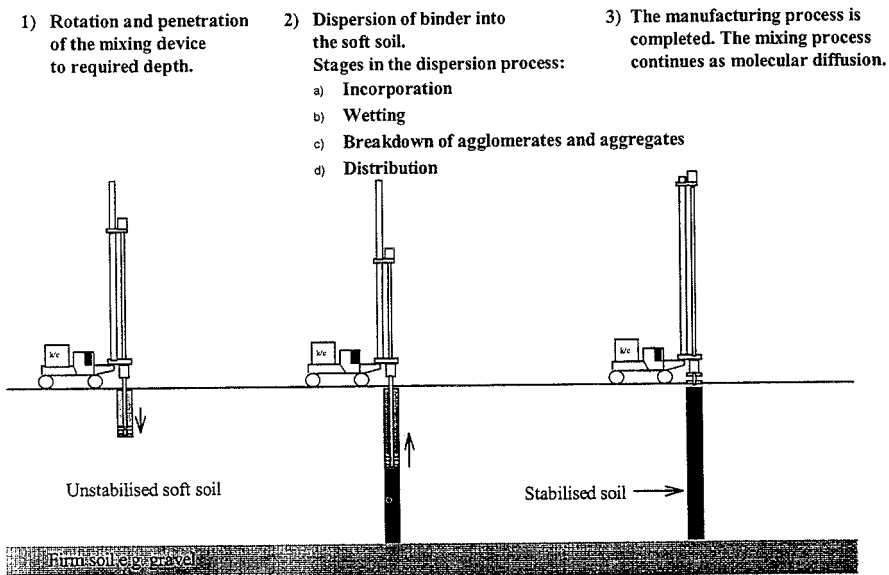


Figure 1. The mixing process

The rotation during the penetration of the mixing device breaks up the soil partly as well as when the mixing device is retrieved and the stabiliser is injected into the soil. The rotation of the mixing device into the soil affects the two other stages of the mixing process. If the soil structure is not fully broken up, additional mixing energy is required for the dispersion of the binder during stage 2. It is uncertain if the rotation of the mixing device breaks up the soil to any appreciable extent.

The dispersion of the binder can be divided into four distinct stages according to Parfitt & Barnes (1992); a) Incorporation of dry binder particles. Air is used as carrier for the binder, that may exist as separate particles, agglomerates or aggregates. It is of importance that the binder is distributed quickly over the whole cross section of the column, to avoid concentrations of the binder. An uneven distribution will increase the mixing time, since it is difficult to distribute the binder by the relatively simple mixing device, which is used on-site; b) Wetting. When the dry binder is incorporated with

the soil, the air in the powder, agglomerates or aggregates must be replaced. During the wetting, water is drawn from the surrounding soil. It is difficult mechanically to remove the air if agglomerates and aggregates have formed; c) Breakdown of agglomerates and aggregates. When the binder has been wetted, the remaining agglomerates and aggregates must be broken up, to avoid clumps, by shearing the soil and/or by direct impact. To create the necessary shear stresses, the mixture must be set in motion. With the present mixing method the soil is deformed by laminar shearing and distributive mixing. These mixing mechanisms are described in detail by Edwards (1992); d) Distribution of the binder. At distribution, the particles are separated and distributed throughout the stabilised soil volume. Since it is difficult to deform the soil mixture it is important to spread the dry powder uniformly early in the mixing process.

When the mechanical mixing is completed, the mixing process continues as molecular diffusion. Molecular diffusion, however, is a slow process, which only becomes significant if the binder is uniformly distributed throughout the soil volume.

The mixing affects also such physical and chemical properties as homogeneity, strength and deformation properties. Some parameters which influence these properties are mixing time, rotational speed, geometry of the mixing device, feed pressure and rheological properties of the binder and of the soil, i.e. chemical and physical properties that affects the flow and deformation properties, as illustrated in Figure 2.

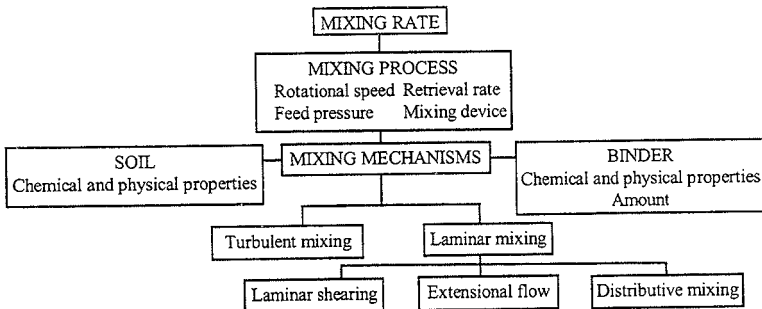


Figure 2. Factors influencing the mixing rate.

Experimental investigations of the mixing process are required, using geometrically simple mixing devices, in order to investigate rheological properties of the binder and the soil. The results from this study can be used to evaluate more complicated mixing processes, as well as the factors affecting the mixing in the field. The object is not to give data which are directly applicable to the complex full scale in-situ mixing. It is, however, expected that this investigation will provide some guidance for further studies of more complex mixing processes. It is necessary that the laboratory experiments are simple, but that they are still similar to mixing on-site. The investigations should not be oversimplified, however.

3 METHOD AND MATERIALS

With the proposed laboratory method, described below, the mixing of undisturbed soil and the factors which influence the mixing process, have been investigated. The soil-binder mixture have the same rheological properties in the laboratory as in the full scale application, since undisturbed soil samples are used. In order to reduce the disturbance of the soil while handling the samples, the mixing is done directly in the 170 mm sample tubes with 50 mm diameter, used in the standard Swedish piston sampler. The mixing equipment used is shown in Figure 3. In the present study, the two mixing devices were of paddle type. The mixing mechanisms are thus mainly laminar shearing and dis-

tributive mixing. The only difference between the two devices was the inclination of the paddle blades, 20° and 45°, respectively. The purpose of the comparison was to study the effects of small changes of the geometry of the mixing devices.

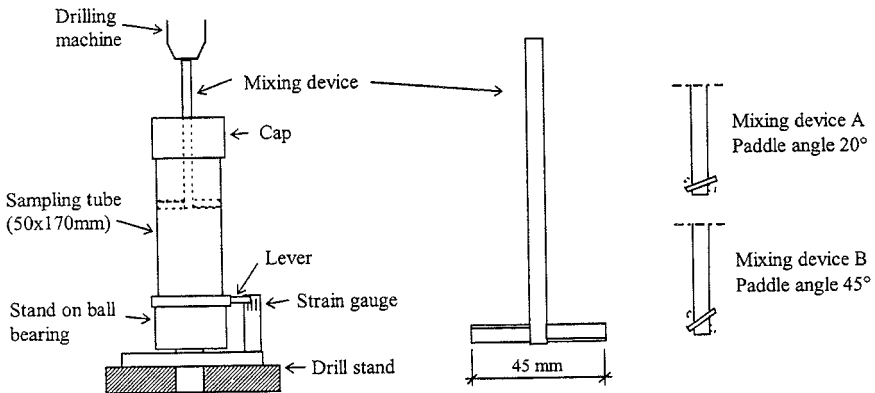


Figure 3. Laboratory set up and the two mixing devices A and B.

The binder was added by placing a vertical string right outside the centre of the soil sample, (Edstam, in prep.). A tube was pushed down into the soil and then filled with a predetermined amount of binder. A rod with a plug fixed to its end was used to force out the binder when the tube was pulled out. This incorporation process differs from that at the full scale application. In the field the spreading of the binder is by compressed air. Since spreading the binder is difficult to simulate in a small scale it was decided to use this very simple method. The binder was dispersed and distributed by rotating the mixing device directly in the sample tube, as shown in Figure 3. The rotational speed was 200 r.p.m. for all samples. The retrieval rate of the mixing device was varied 0.5, 1, 2, 3 and 6 mm/rev..

During the mixing the torque was measured. By measuring the torque it was possible to study the rheological properties of the mixture and to estimate the total mixing energy. In this way it was possible to study the mixing energy and its influence on the mixing process. After the mixing, the samples were stored for 21 days in a moist room before testing. By assuming that the strength of the stabilised soil depends on the distribution of the binder, the unconfined compression strength was used as an indirect measure of the "degree of mixing".

A sulphide clay from three meters depth at Arboga, Sweden, was investigated. The clay had an average water content of 107% and a liquid limit of 100%. The unit weight of the soil was about 14.5 kN/m³, and the average undrained shear strength, as determined by unconfined compression test, was 15 kPa. The sensitivity was about 12 and the rapidity number 2 to 3, (Söderblom 1974). This relatively low rapidity number indicates that a relatively high mixing energy is required to break up the soil and to reduce the shear strength. It is expected that soil, that is easily disturbed, facilitates the mixing process.

In this study two different binders were used, 100% standard Portland cement and 50/50% unslaked lime and standard Portland cement. The total amount of binder was 80 kg/m³. A mixture of 50/50% lime and cement is generally used in Sweden.

Three samples were tested for every combination of mixing device, retrieval rate (mm/rev.) and binder. Totally 56 samples were investigated.

4 TEST RESULTS

Figures 4-5 show the unconfined compression strength of the stabilised soil, 21 days after mixing, as a function of the total mixing energy for the cement and the lime-cement mixture respectively.

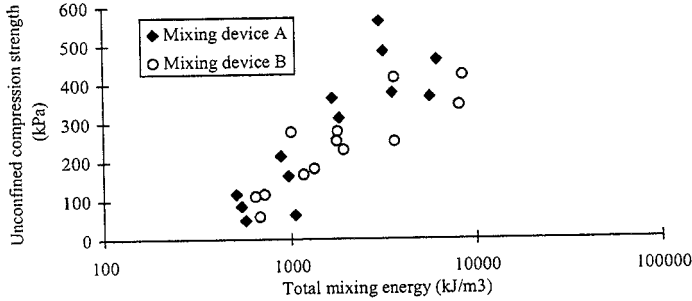


Figure 4. The unconfined compression strength as a function of the mixing energy with cement as binder.

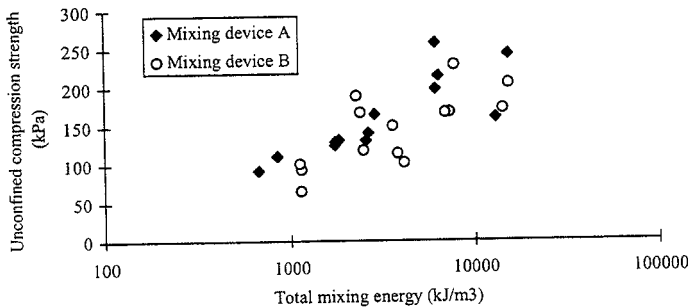


Figure 5. The unconfined compression strength as a function of the mixing energy with lime and cement as binder.

5 DISCUSSION

Figures 4-5 show that the total mixing energy has a significant effect on the unconfined compression strength for both the cement and the lime-cement as binder. Increasing the mixing energy by ten times doubles the strength, using lime and cement as binder. However, while using only cement, increasing the mixing energy by ten times raises the strength by five times. The total mixing energy has a greater influence on the strength with only cement as binder. This is explained by the difference in chemical properties of the different binders. Adding lime to the soil results in a chemical reaction where calcium hydroxide (Ca(OH)_2) forms. The dissolved calcium hydroxide improves the "degree of mixing" by migration, i.e. molecular diffusion improves the extent of mixing. Cement on the other hand has the property of reacting with water to form strength increasing products, primarily calcium-silica hydrate (CSH), which can fill the voids between the soil particles. Molecular diffusion is limited, and therefore the extent of mechanical mixing has a greater effect.

The relatively large scatter of the results is probably due to the variations of the mixing, which is not totally automated, and variations of the distribution of the binder throughout the sample when mixing energy is limited. It is expected that the distribution of the binder will vary and that the unconfined compression strength will be affected. Other reasons are differences of the properties of the soil and of the test procedure of the compression tests. The scatter of the strength of the on-site stabilised soil is generally large.

Since the relation between the mixing energy and the unconfined compression strength is affected by several factors, it is important to consider the whole mixing process when preparing laboratory samples. In this study, the last stage of the mixing process, the molecular diffusion, has not been considered. Also storage time and temperature, consolidation pressure and water supply have an influence. These parameters have not been investigated in this study.

The difference in geometry between the two mixing devices has no significant influence on the strength increase according to this study. The difference in soil movements is small between the two devices. This implies that the deformation caused by the mixing device is localised closely around the mixing paddles. To deform and to redistribute the soil to a greater extent, may require another type of mixing device. Other mixing mechanisms, like kneading, may be required.

The main advantage with the proposed laboratory method is that the equipment is inexpensive and easy to use, and that the time required for preparation of the samples is short. The volume of soil required for the mixing is reduced compared to the present method, since mixing is done directly in soil sampling tubes. The rheological properties, and so the effect of mechanical disturbance on different soils, can be determined during the mixing. With undisturbed soil samples, the mixing with the proposed method corresponds more closely to the mixing process on-site. It is also possible to study the effect of the geometry of the mixing device as well as the effect of rotational speed and retrieval rate.

The main disadvantage is the small size compared to the on-site mixing device, which affects the distribution of binder over the cross section. With undisturbed soil, the scatter of the result can be large due to differences between the soil samples, especially if stratified soils are investigated. The incorporation process of the binder into the soil is different from the full scale application, which affects the air trapped in the binder, in the stabilised soil. Laboratory results should therefore be used with great concern.

With the laboratory method presented in this paper, the different stages of the mixing process can be investigated, and properties of similar mixing energies as of the on-site applications. Since laboratory investigations can never totally simulate the on-site mixing, there is still a need for full scale tests. The proposed laboratory method provides a basis for further developments of more sophisticated laboratory mixing methods.

REFERENCES

- Carlsten, P. & Ekström, J. 1995. *Lime and Lime Cement Columns*. Guide for design, construction and control. Swedish Geotechnical Society, SGF Report 4:95.
- Edstam, T. *Reference Method for Laboratory Preparation of Stabilised Soil Samples*. In prep.. Swedish Geotechnical Institute, Linköping.
- Edwards, M.F. 1992. Laminar flow and distributive mixing. In N. Harnby, M.F., Edwards & A.W. Nienow (eds), *Mixing in the Process Industries. Second Edition*: Chapter 11. Butterworth-Heinemann.
- Hishida, K., Koga, Y. & Miura, N. 1996. Energy consideration of the dry jet mixing method. *The second international conference on ground improvement geosystems; Proc. of IS- Tokyo '96, Tokyo, 14-17 May 1996: 643-648*. Rotterdam: Balkema.
- Parfitt, G.D & Barnes, H.A. 1992. The dispersion of fine particles in liquid media. In N. Harnby, M.F., Edwards & A.W. Nienow (eds), *Mixing in the Process Industries. Second Edition*: Chapter 6. Butterworth-Heinemann.
- Söderblom, R. 1974. A new approach to the classification of quick clay research. *Reprints and Preliminary Reports, No 55, pp. 13-17*. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm.

Publikationer utgivna av Svensk Djupstabilisering

Arbetsrapport

- 1. Arlandabanan, Norra Böjen. Sättningar hos järnvägsbank på kc-pelare.** 1998
Ulf Stjerngren, Jacobson & Widmark
- 2. KC-förstärkning för schakt inom spont, Filipstad Brygge, Oslo.** 1998
Phung Doc Long, Stabilator AB & Håkan Bredenberg, Stabilator AB
- 3. Inblandningsmekanismer vid djupstabilisering med kalk-, kalk/cementpelare och cementpelare** 1998
Stefan Larsson, Tyréns
- 4. Undersökning av KC-pelare med avseende på dess "homogenitet".** 1998
Roland Tränk, SGI
- 5. Bestämning av egenskaper i cellstabiliserad torv.** 1998
Nenad Jelusic, Vägverket Region Mitt, Torbjörn Edstam, SGI & Yvonne Rogbeck, SGI
- 6. Rörelser och portryck vid kalkpelarinstallation. Redovisning av mätresultat.** 1998
Åke Johansson, SGI
- 7. Masstabilisering av väg 590, Askersund.** 1998
Yvonne Rogbeck, SGI
- 8. KC-pelarförstärkning av instabil slänt. E4, delen Nyland - Ullånger, Västernorrlands län. Åtgärder och mätningar.** 1998
Leiv Viberg, SGI, Bertil Eriksson, Vägverket Produktion Mitt & Stefan Johansson, Vägverket Produktion Mitt
- 9. Grunnförsterkning med kalksementpælar.** 1999
Stein Christensen, Arnstein Watn, Steinar Nordal, Arnfinn Emdal, Torbjörn Lund & Thomas Kristiansen
- 10. Dimensioneringsvägledning för djupstabilisering.** 1999
Översättning av Finska Vägverkets klarlägganden 18/1997.
ISSN 0788-3722, ISBN 951-726-344-9
- 11. Historik och svenska erfarenheter av kalkstabilisering av vägterrasser** 1999
Stefan Gustafsson, Scandiaconsult

- | | | |
|------------|--|-------------|
| 12. | Undersökning i fält av stabiliseringseffekt i organisk jord och lera
Tobias Hansson, Hercules Grundläggning AB, Yvonne Rogbeck, SGI,
& Leif Säfström, Vägverket Region Mälardalen | 2000 |
| 13. | Utvärdering av verksamheten inom Svensk Djupstabilisering
Vetenskaplig uppläggnig. Måluppfyllelse av FoU-plan | 2000 |
| 14. | Stabilisering av torv i laboratoriemiljö
– utveckling av referensmetod
Fredrik Larsson & Stefan Mårtensson, LTU | 2000 |
| 15. | Djupstabilisering med kalk-cementpelare – Provfält
Lars O Johansson, SGI | 2000 |
| 16. | Laboratorieunblandning för stabilisering av lera – Referensmetod
Torbjörn Edstam, SGI | 2000 |

Rapport

- | | | |
|-----------|---|-------------|
| 1. | Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare.
Torbjörn Edstam | 1997 |
| 2. | Kalktypens inverkan på stabiliseringsresultatet. En förstudie.
Helen Åhnberg & Håkan Pihl | 1997 |
| 3. | Stabilisering av organisk jord med
cement- och puzzolanreaktioner
Karin Axelsson, Sven-Erik Johansson & Ronny Andersson | 2000 |
| 4. | Provbänk på kalk/cementpelarförstärkt gyttja och
sulfidhaltig lera i Norrala
Rolf Larsson | 1999 |

DISTRIBUTION:

Svensk Djupstabilisering

c/o SGI, 581 93 Linköping

Tel: 013–20 18 42. **Fax:** 013–20 19 14. **E-post:** birgitta.sahlin@swedgeo.se