

Schaktbarhet i moräner och fasta friktionsjordar

Schaktning i moräner och i fasta friktionsjordar är ett vanligt förekommande markarbete. En stor del av arbetet utförs i och i nära anslutning till vägar och järnvägar. Svensk klassificering av schaktbarhet är otydlig och bygger på tumregler från 1970-talet och den tidens schaktmaskiner och geotekniska undersökningsmetoder. Kostsamma tvister mellan beställare och entreprenörer förekommer relativt ofta i dessa sammanhang. Onödiga kostnader skapar fördröjning och misstämning inom projekten. De tekniska frågorna på problemet kommer i andra hand i projektet på bekostnad av entreprenadjuridiska frågor.

På Kungliga Tekniska högskolan (KTH) i Stockholm pågår ett intressant forsknings- och utvecklingsprojekt i samarbete med Vägverket och Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) som syftar till att bättre beskriva förutsättningar inför schaktningsarbete i morän och fasta friktionsjordar. Målet med projektet är att skapa ett verktyg för att bättre och tydligare klassificera och säkerställa schaktbarheten i moräner och fasta friktionsjordar.

En stor del av schaktningsarbetet arbetet utförs i och i nära anslutning till vägar och järnvägar. Dagens system för klassificering av schaktbarhet byggdes upp på 1960- och 1970-talen i Finland och Sverige och är inte anpassat för dagens schaktmaskiner och dagens geotekniska undersökningsmetoder.



Författare är **Mattias Lindgren** vid avdelningen för jord och bergmekanik, KTH och Bjerking samt **Staffan Hintze** vid avdelningen för jord och bergmekanik, KTH och NCC.



Schaktning i moräner och i fasta friktionsjordar är ett vanligt förekommande markarbete som ofta leder till tvister och samarbetsproblem.

Att schakta i olika typer av moräner och fasta friktionsjordar skiljer sig väsentligt från schaktning i sand och lera. Detta påverkar i stor utsträckning kostnad och tidsåtgång för arbetet. Styrande faktorer är material- och maskinegenskaper som påverkar loss hållning av materialet och skopfyllnadsgraden.

Eftersom det svenska klassificeringssystemet inte är anpassat för dagens sätt att schakta och loss göra fast lagrad jord så förekommer det ofta meningsskiljaktigheter i bedömningen av schaktbarheten mellan beställare och entreprenör. Dessa kostsamma tvister orsakar fördröjning och misstämning inom projekten. De tekniska frågorna på problemet kommer i andra hand och tid och pengar satsas istället på entreprenadjuridiska frågor.

Forskning och utveckling vid KTH ska bättre beskriva svårighet och bästa maskinval

Den forskning och utveckling som påbörjats vid avdelningen för jord och bergmekanik på KTH syftar till att skapa ett verktyg för att bättre och tydligare klassificera och säkerställa schaktbarheten i moräner och fasta friktionsjordar. Arbetet är uppdelat dels i teoretiska analyser av brottförloppet vid schaktning och dels i verifierade försök i fält i samband med

pågående vägarbete samt skjuvförsök i laboratorier.

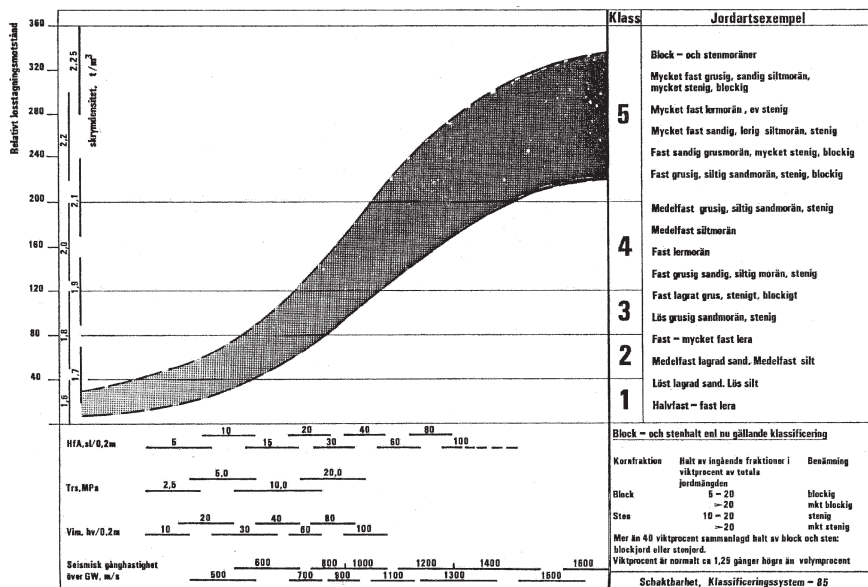
Projektet omfattar både doktorandforskning, seniorforskning och utvecklingsarbete. Arbetet utförs under fyra år och startade under våren 2008 och ska vara slutfört under 2012. Arbetet är uppdelat i fem etapper. Etapp 3 avslutas med en licentiatavhandling. Etapp 5 avslutas med en doktorsavhandling. Projektet finansieras av Vägverket, SBUF, KTH, NCC och Skanska.

Resultat från projektet kommer kontinuerligt att redovisas och rapporteras på referensgruppsmöten samt i form av tidskriftsartiklar i svensk fackpress, vetenskapliga artiklar, delrapporter, workshops samt en licentiatavhandling och en doktorsavhandling.

Till projektet har det knutits en referensgrupp, där samarbetspartners finns representerade från svensk byggindustri (entreprenörer) och från byggherrar (Vägverket, Banverket) som successivt får möjlighet att ge teoretiska och praktiska synpunkter under projektets framskridande.

Äldre erfarenheter styr fortfarande

I Finland kom redan år 1939 finska Statsrådskommitténs klassificeringsnormer och 1956 gav Svenska Teknologföreningens normkommitté ut ett system för klassifice-



Figur 1: Dagens system för klassificering av schaktbarhet (Klassificeringssystem -85) är föråldrat och inte anpassat för dagens schaktmaskiner och dagens undersökningsmetoder. Magnusson & Orre (1985).

ring av jordar. Båda dessa utgick dock från schaktning med hjälp av handredskap.

På 1960- och 1970-talen utfördes det i Finland fältförsök och förslag till klassificering av schaktbarhet i olika jordar presenterades, Arhipainen et al (1965) och Korhonen et al (1972). Efter jordartsklassificering och schaktförsök med instrumenterad grävmaskin kunde schaktbarhetsklasserna tas fram och jämföras med resultat från bland annat viktsondering, hejarborring, rotationsborring, seismiska undersökningar samt densitetsprovning. Även maskinens relativa kapacitet samt en framräknad gräv motståndsimpuls utvärderades och ansågs visa på motståndet i de olika jordarna. Redan då insåg man att schaktbarheten aldrig bör bedömas enbart på grundval av en geoteknisk undersökningsmetod.

Även i Sverige påbörjades forskning och utvecklingsarbete kring schaktbarhet vid denna tid. Under 1970-talet utfördes det olika projekt inom Vägverket för att utreda olika jordars bearbetbarhet och schaktbarhet. 1973 utgavs rapporten Jordars schaktbarhet av Byggeforskningsrådet, Magnusson (1973). Rapporten består av en litteraturstudie, fältförsök, teoretiska beräkningar samt presentation av förslag till schaktbarhetsklassificering av jordar. Beräkningar utfördes med tillgängliga teorier för brottförloppet i jord med avseende på horisontell schaktning. Schaktförsök utfördes med instrumenterad schaktbladstraktor i sand, lera och morän. Resultaten jämfördes sedan med resultat från beräkningar, vikt- och hejarsonderingar, seismisk gånghastighet samt densitetsbestämning.

Det klassificeringssystemet som presenterades 1985 av Magnusson och Orre var ett hjälpmedel i form av ett diagram

som skulle kunna användas direkt i mark- och geoprojekteringen, men även som indirekt underlag för kalkylering och planering av schaktningsarbeten. Klassificeringssystemet byggde i huvudsak på de äldre erfarenheterna från 1970-talet.

Brister i Klassificeringssystem -85

Som tidigare tagits upp så var underlaget för Klassificeringssystem -85 inte uppdaterat och "state of the art", men det var ändå angeläget att ta fram ett klassificeringssystem eftersom det i början av 1980-talet hade antagits ett nytt system för indelning och benämning av jordarter som hade införts i Mark AMA 83. Systemet beskrevs i AMA-nytt år 1986, se Orre (1986).



Figur 2: Schaktning i morän och fasta friktionsjordar utförs idag med helt andra maskiner än på 1970-talet. Bilden visar en kraftfull maskin som används vid schaktning i fasta friktionsjordar.

Fortfarande, år 2008, använder geotekniker, entreprenörer och beställare Klassificeringssystem -85 när schaktbarheten ska beskrivas i förfrågningsunderlag och kontrakt.

Figur 1 beskriver diagrammet för bestämning av schaktbarhetsklass. Diagrammet redovisar relativt losstagningsmotstånd (fiktivt värde) och densitet på den vertikala axeln och relativ fasthet mätt med olika sonderingsmetoder jämte seismisk gånghastighet på den horisontala axeln. Fältet som representerar losstagningsmotståndet illustrerar motståndets variation mellan lätt schaktad och mycket svår schaktad jord.

Ingångar i diagrammet för bedömning av schaktbarhetsklass är densitet, sonderingsmotstånd samt seismisk gånghastighet. Då det relativa losstagningsmotståndet är beroende av jordmaterialets skrymdensitet samt jord- och stenhalt rekommenderas att dessa egenskaper fastställs. I diagrammet redovisas exempel på jordarter som med hänsyn till fasthet (relativt losstagningsmotstånd), kornstorleksfördelning samt innehåll av sten och block kan hänföras till olika schaktbarhetsklasser. Det bör betonas att dessa jordartsbenämningar är exempel och benämningar som "lös" och "fast" har en viss spännvidd.

Det är speciellt olyckligt att olika skrifter har skilda definitioner av schaktbarhet samt olika kriterier för klassificering. I vissa tidigare svenska och finska utredningar har skillnad gjorts på schaktbarhet och grävbarhet. Termen schaktbarhet kan betraktas som grävbarhet vilket är beroende av gräv motståndet i jorden. Schaktbarhet kan också avses innefatta gräv motstånd, skopfyllnadsgrad och eventuellt en maskins produktionskapacitet i kubikmeter per timme (schaktförmåga).

Förhållandet kompliceras även av att de olika undersökningarna baseras på olika typer av maskinutrustning. I vissa försök används grävmaskin och skopa, i andra schaktblad och traktor. Brottförloppet i jorden ser olika ut beroende på vilken schaktningsutrustning som används.

Enligt de tidigare undersökningarna beror schaktbarheten (grävbarheten) av jordlagrens uppbyggnad och jordarternas fysikaliska egenskaper. Losstagningsmotståndet beror på jordmaterialets lagringstäthet (volymvikt), kornstorleksfördelning och sten- och blockhalt, men även på exempelvis kohesion, cementering, skjuvhållfasthet, grundvattennivå, tjäle och topografi. Skopfyllnadsgraden beror även den på lagringstäthet, kornstorleksfördelning och sten- och blockhalt, men även på inre friktionsvinkel, kohesion, vatteninnehåll, klibbighet, frysning och schaktets geometriska form. Schaktförmågan (kubikmeter per timme) beror förutom på en jordarts grävbarhet även på skopdimension och form, skopfyllnaden, jordmaterialets uppluckringsbenägenhet, tidsåtgång per arbetsmoment, maskinistens skicklighet, maskinutrustningens skick.

Arhippainen *et al* (1965) betraktar schaktbarhet som en svårighetsgrad av schaktning, enbart beroende av de fysikaliska egenskaperna av en jordart eller jordlager. Med schaktförmåga avses en maskins kapacitet (produktion kubikmeter per timme) i relation till en viss schaktbarhetsklass. Skopans volym och fyllningsgrad, jordmaterialets uppluckringskoefficient med mera påverkar schaktförmågan.

Enligt Korhonen *et al* (1972) bestäms och indelas schaktbarheten baserat på grävmotståndet i jorden (grävbarheten), men även av skopkapaciteten (kubikmeter per timme). Grävmotståndet beror på jordens egenskaper med mera.

I Klassificeringssystem -85, Magnusson *et al* (1985) anses schaktbarhet avse ett jordmaterials kapacitetspåverkande egenskaper vid anpassning och lastning. Schaktbarheten bestäms av jordmaterialets motstånd mot losstagnation (grävmotstånd) och inverkan på skopfyllnad. Jordmaterialets motstånd mot losstagnation påverkar en schaktmaskins (skopa, blad eller rivartand) möjlighet att tränga in i och sönderdela jordmaterialet. Losstagningsmotståndet beror på jordmaterialets lagringstäthet, kornstorleksfördelning, kohesion, cementering och tjäle.

Med skopfyllnad menas utlastad fast volym per skopa.

Twister uppkommer mellan beställare och entreprenör

Twister uppkommer då beställare och entreprenör har olika uppfattning om en jords schaktbarhet (grävbarhet) Exempelvis kan det i en anbudshandling framgå att ett jordmaterials schaktbarhet enligt Klassificeringssystem -85 bestämts till schaktbarhetsklass 3. Entreprenören har på grundval av detta bedömt erforderlig maskinutrustning och tidsåtgång. Under produktionskedet anser entreprenören att det är mycket svårare och besvärligare att schakta loss jorden än vad som kalkylerats för. Entreprenören hävdar att det kommer ta mycket längre tid och/eller krävas andra typer av maskiner för att få loss och schakta jorden som tänkt. Entreprenören anser att jorden skulle ha klassificerats i en högre schaktbarhetsklassificering än vad som angetts i anbudsunderlaget.

En jordarts schaktbarhet (grävbarhet) styrs således av bland annat maskinval, dimension och form på skopa, skopfyllnaden samt tidsåtgång per arbetsmoment vilket sedan påverkar schaktförmågan (kubikmeter per timme) och maskinutrustningens utslitning. Det är uppenbart att faktorer som jordegenskaper och jordlagrens uppbyggnad påverkar schaktbarheten (grävbarheten). Genom jordprov-

tagning samt geoteknisk sondering eller annan undersökningsmetodik får man projektspecifik information om jordegenskaper och lokala förhållanden vilka ska översättas till schaktbarhetsklasser med hjälp av klassificeringsmodellen.

Vilka undersökningsmetoder används för att bestämma schaktbarhet?

I Klassificeringssystem -85 är det möjligt att använda resultat från hejarsondering (HfA), trycksondering (Trs), viktsondering (Vim) och seismisk gånghastighet som ingångsdata i diagrammet för bestämning av schaktbarhet. Traditionella, statiska sonderingsmetoder som vikt- och trycksondering ger god information om lösa jordars fasthet. Vid sondering i fasta jordarter och moräner samt där sten- och blockhalt blir för stor förmår dessa metoder inte alltid tränga igenom. Därmed försvinner också möjligheten att bestämma schaktbarheten i moräner och fasta friktionsjordar med dessa metoder. Även hejarsondering stannar upp eller viker av i steniga och blockiga jordar, men anses ändå kunna ge ett sannare värde på fastheten.

Jord-bergsondering är en metod för tyngre sondering, främst för att klargöra djup till berg samt bergets relativa fasthet. Möjlighet finns dock att även bestämma jordens relativa fasthet samt sten- och



Figur 3: Det är uppenbart att faktorer som jordegenskaper och jordlagrens uppbyggnad påverkar schaktbarheten (grävbarheten).

blockhalt. Därför skulle jord-bergsondering kunna vara en metod som skulle kunna användas för bedömning av schaktbarhet i moräner och fasta friktionsjordar.

Jord-bergtotaltrycksondering är en kombination av vridtrycksondering och jord-bergsondering och som utvecklades i Norge på 1980-talet. Vid jord-bergtotalsondering registreras hela jordens lagerföljd samt berggrundens läge vid ett och samma tillfälle. På sammansätt som vid jord-bergsondering finns det möjlighet att bestämma jordens relativa fasthet samt sten- och blockhalt. Detta innebär att även denna metod kan vara lämplig att använda vid bedömning av schaktbarhet.

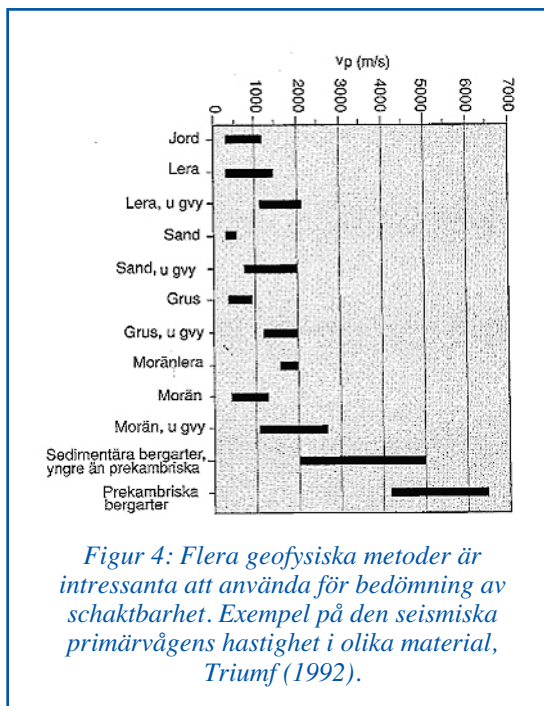
Även i Finland utvecklades det en kombinerad metod för vridtryck- och hejarsondering under 1980-talet, den så kallade HK-sonderingen.

SPT-sondering är en av världens mest utbredda sonderingsmetoder. Eventuellt kan jordens relativa fasthet fås för friktionsjordar och moräner med denna metod.

Provtagning genom störd eller omrörd provtagning kan vara användbart vid bestämning av egenskaper hos jord och lagerföljder i moräner och friktionsjordar. Provgropsundersökning är nog den bästa undersökningsmetoden som finns idag för bedömning av schaktbarheten då jorden provgrävs och identifieras ingående. Vid undersökningen kan kornstorlek, sten- och blockhalt, täthet och lagerstruktur bland annat tas fram; egenskaper som alla kan användas för bestämning av schaktbarheten.

Ett antal geofysiska metoder för undersökning av jord och berg finns idag. Metoderna skiljer sig i uppbyggnad, är mer eller mindre utvecklade och har olika användningsområden. Beroende på vad som mäts kan metoderna delas upp i mekaniska, elektriska och magnetiska. Vid mekaniska mätningar, som seismik, studeras hur tryckvågor breder ut sig och reflekteras mot ojämnheter och materialskikt. De elektriska metoderna, där resistivitet ingår, syftar oftast till att mäta det elektriska motståndet i olika jordlager. Vid magnetometri undersöks variationerna i det jordmagnetiska fältet i olika material. Geofysiska mätningar kan utföras på markytan eller under markytan genom exempelvis borrhålslogning.

Flera geofysiska metoder är intressanta att använda för bedömning av schaktbar-



Figur 4: Flera geofysiska metoder är intressanta att använda för bedömning av schaktbarhet. Exempel på den seismiska primärvågens hastighet i olika material, Triumf (1992).

het. Metoder där information om materialegenskaper som densitet, kornstorlek eller sten- och blockhalt skulle kunna användas. Även jordlageregenskaper som porositet, markstruktur och hålrum behövs i bedömningen av schaktbarheten och kan upptäckas med geofysiska metoder. Med information om exempelvis la-

gerföljd, lagertjocklek och utbredning kan ett jordmaterial identifieras.

Olika maskintyper används

Flera olika typer av maskiner finns för att gräva, skrapa, flytta eller på andra sätt bearbeta jord. Maskinerna kan kategoriseras på olika sätt beroende på utformning, utrustning och verkningssätt. Ur ett jord-maskin och därmed klassificeringsperspektiv är det intressant att dela upp maskinerna i maskiner utrustad med skopa eller blad.

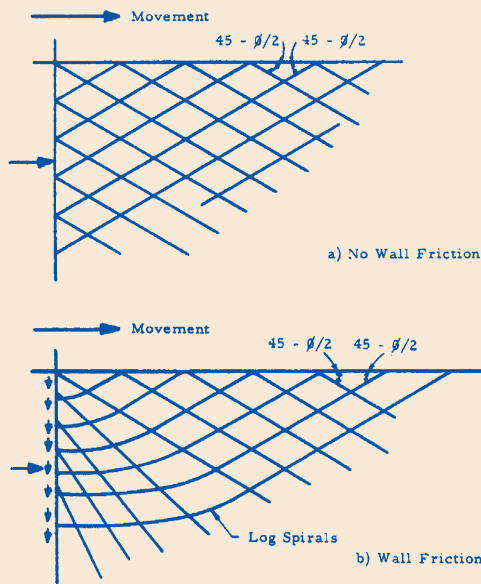
Brottmekanismer vid schaktning

Den mekaniska schaktprocessen kan sägas innefatta ett schaktverktyg (blad eller skopa), en jord med olika egenskaper, lokala geotekniska aspekter och det teoretiska systemet som håller ihop delarna. Inom schaktningens område har det, främst internationellt, bedrivits forskning i området för "tool design". Det är framförallt

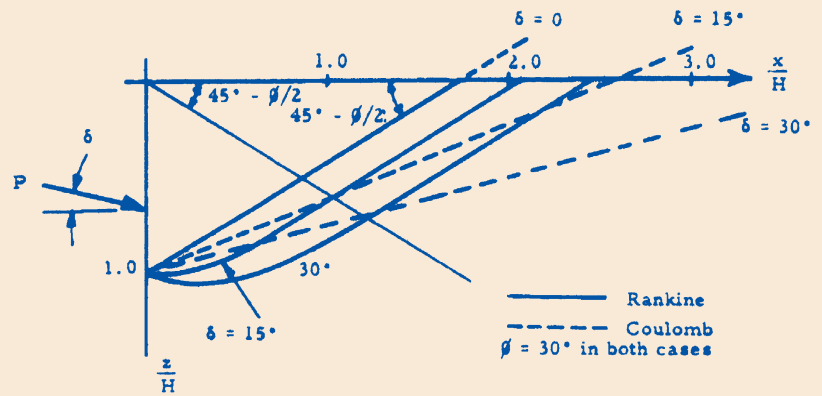
inom jordbruks- och gruvindustrin som forskning och utveckling av effektiva verktyg för bearbetning och förflyttning av jord har lönat sig. Flera teoretiska studier, schaktförsök och kapacitetsstudier har utförts, både i kohesions- och friktionsjordar. Exempelvis har brottgeometri, olika lutningar på schaktblad, jord-



Figur 5: Ur klassificeringsperspektiv är det intressant att dela upp maskinerna i maskiner utrustad med skopa eller blad: a) Schaktare med blad. b) Lastare med skopa. c) Hyvel med blad. d) Grävare med skopa.



Figur 6: Glidytor i jorden då plastisk jämvikt råder vid passivt jordtryck enligt Rankine. Bild a) och b) visar utan respektive med väggfriktion. Vid väggfriktion erhålls glidytor delvis i form av logaritmiska spiraler vars positioner beror på jordens inre friktionsvinkel. Selig & Nelson (1964).



Figur 7: Jämförelse av beräknade glidytor vid passivt jordtryck enligt Coulomb och Rankine då väggfriktion råder. Resultaten från de olika teorierna skiljer sig väsentligt vid olika värden på väggfriktionen, δ . Jordens inre friktionsvinkel har varit konstant, ϕ lika med 30 grader. Selig & Nelson (1964).

metall adhesion och storlekar och utformningar av blad undersökts. Det verkar dock som att forskningen endast har bedrivits på homogena, nästan isotropa, jordar. Studier i inhomogena jordar där kornstorlek, täthet och lageregenskaper varierar, ser inte ut att finnas.

Vid horisontell schaktning med blad deformeras jorden först vid själva loss-

brytningen och sedan ytterligare då jorden skjuts framför schaktbladet. På det sätt brott sker i jorden beror bland annat på bladets form och jordens hållfasthetsegenskaper. Existerande teorier på hur jordbrott kan se ut vid schaktning baseras på passivt jordtrycksteori. Teorierna var från början framtagna för att avgöra krafter på stödmurar vid rörelse mot jorden. Både Coulomb och Rankine föreslog redan på 1700- och 1800-talen brottgeometrier för olika bladstorlekar i sand. Studier och andra undersökningar har sedan dess använt sig av dessa studier eller utvecklat teorierna, där brottet antingen sker som zombrott eller via glidyta.

Framtid

De brister, oklarheter och osäkerheter som finns idag vid bedömning av schaktbarhet måste klarläggas genom forskning och utveckling av ett modernt och anpassat klassificeringssystem. Maskiner, utrustning och geotekniska undersökningsmetoder har andra kapaciteter och möjligheter idag än för 30 till 40 år sedan. Det finns även andra synsätt på projekt- och kontraktsformer samt metoder för hur geotekniska problem ska behandlas.

Ett nytt klassificeringssystem för schaktbarhet måste baseras på teoretisk och praktisk kunskap och erfarenhet. Systemet kommer att sänka kostnaden för onödiga tvister mellan beställare och entreprenörer. Ett accepterat system för schaktbarhet inom byggsektorn innebär att schaktarbetet bättre kan planeras och styras. ■

Litteratur

Arhippainen et al. (1965). *Schaktbarhetsklassificering som hjälp vid bedömning av maskiners schaktförmåga*. TFK Utredningsrapport nr 20.

Korhonen et al. (1972). *Ett nytt system för klassificering av schaktbarhet*. TFK Utredningsrapport nr 35.

Magnusson, O. (1973). *Jordars schaktbarhet*. Byggforskningen Rapport R51:1973.

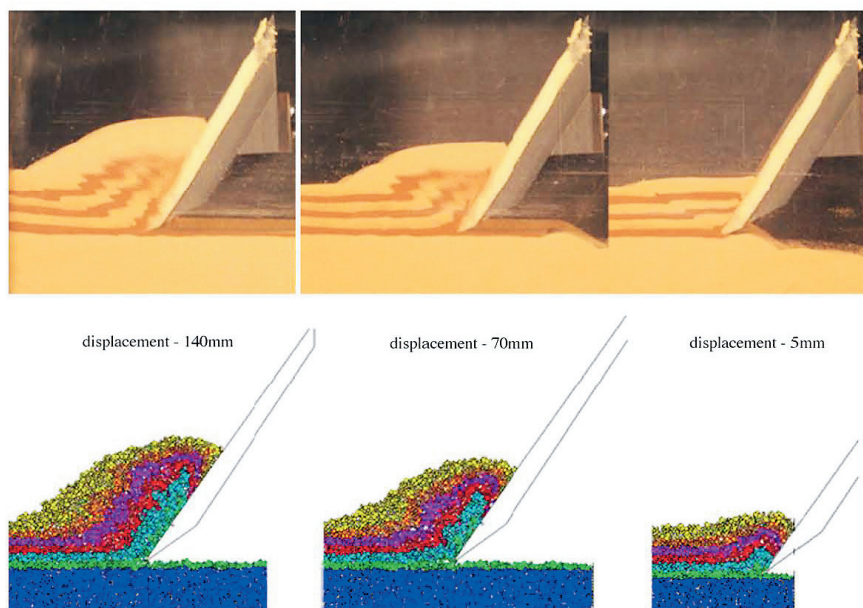
Magnusson, O. & Orre, B. (1985). *Schaktbarhet, Klassificeringssystem -85*. Byggforskningsrådet Rapport R130:1985.

Orre, B. (1986). *Ange schaktbarhet*. AMA-nytt, Informationsdel Mark-Hus, Nummer 2, 1986, s. 10–12.

Triumpf, C-A. (1992). *Geofysik för geotekniker, metoder och tillämpningar*. Byggforskningsrådet.

Selig, E.T. & Nelson, R.D. (1964). *Observations of soil cutting with blades*.

Shmulevich, I. et al (2007). *Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method*.



Figur 8: Resultat från experimentell (överst) respektive simulerad (underst) schaktning i jord. Bilderna visar hur jorden deformeras framför schaktbladet, där jorden har markerats i olika lager med varierande färger. Shmulevich et al (2007).