

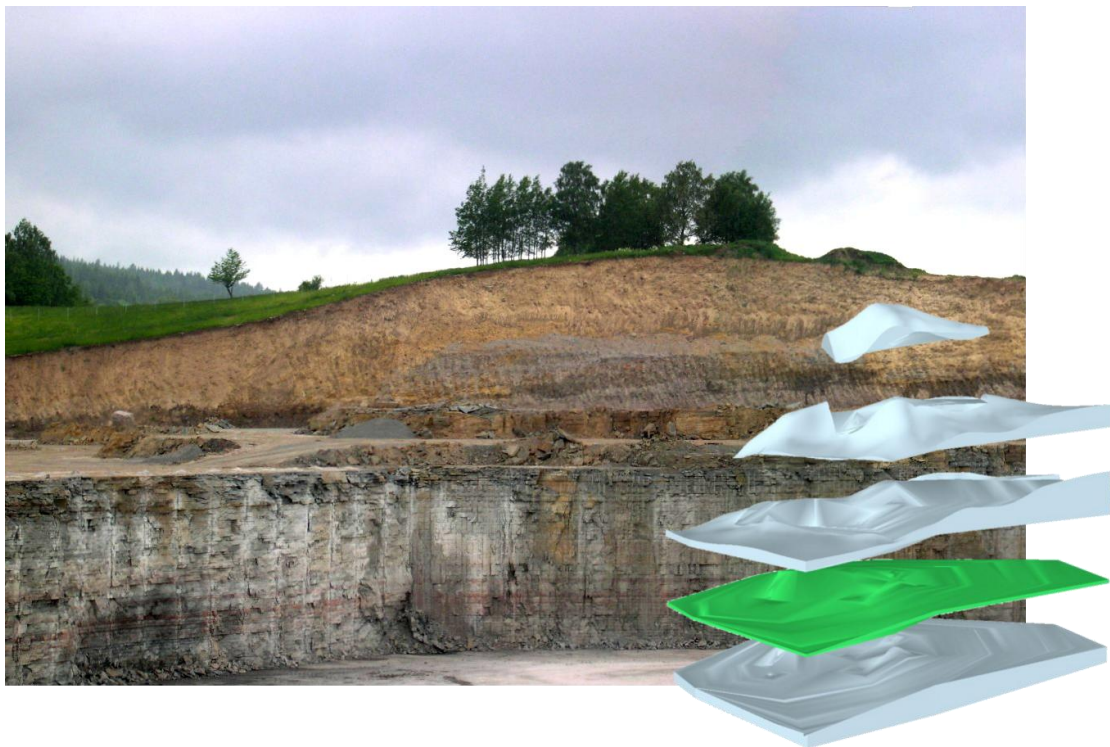


# Sedimentologisk studie och tredimensionell modell av en drumlin öster om Billingen

Gustaf Peterson

maj 2012

SGU-rapport: 2012:15



**SGU**

Sveriges geologiska undersökning  
Geological Survey of Sweden

**Framsida:** Del av drumlins kärning (fotografi: Tore Påsse) och sprängskiss av 3D-modell över densamma.

## SAMMANFATTNING

Vid en bergtäckt på Billingens östra sluttning har en drumlin grävts igenom vilket har gett möjlighet att studera landformens interna struktur och bildningssätt. Under utgrävningarna blottades flertalet skärningar och från dessa har två sektioner, åtta sedimentloggar samt tre partikelorienteringsanalyser dokumenterats. Denna information, samt data från tidigare undersökningar, användes för att koppla samman de olika stratigrafiska lagren, dela in dem i enheter och följa dessa lateralt. I sin tur gav detta tillfälle att skapa en tredimensionell modell av landformen. Studien visar att det går att urskilja fem enheter i drumlinen: en undre kompakt morän med riktning från nordnordost (I), ett lager glaciofluvialt material (II) och sist tre moränbäddar med en riktning från mellan nordost och nordnordost (III–V). Drumlinens bildning kan delas in i tre huvudfaser: två glaciala faser och en glaciofluvial fas. Tolkningen av den första glaciala fasen visar att en skarp nivåskillnad i kalkstensbergrunden kan ha varit en initierande faktor till drumlinens bildning. Denna fas kan ses som en depositionsfas och under denna period var isen endast lite påverkad av landskapets topografi. Den andra fasen visar på glaciofluvial deposition och erosion, vilket den undre moränenhetens topografi visar tecken på. Den andra och sista glaciala fasen avsatte tre moränenheter vilka kan förklaras av säsongsvariationer i isutbredningen. Under denna fas var isen troligen mer styrd av topografien i området och under avlagringen av dessa tre enheter har troligtvis både deformation och erosion varit aktiva.

## ABSTRACT

On the eastern flanks of Mt. Billingen a drumlin has been exposed as an open pit mine was excavated. This gave a unique opportunity to study the internal structure and genesis of this drumlin. During the excavation several sections were cleared and two of them were drawn in detail, eight detailed logs of the sediment sequence were made and three sediment fabric analyses were collected. The collected data were used together with information from earlier studies to connect the layers, divide them into facies and follow them laterally. Furthermore, this gave the opening to create a three-dimensional model of the drumlin. This study shows that it is possible to distinguish five units in the sequence: first, a compact till with a fabric from north-northeast (I); second, a glaciofluvial sediment (II) and last three till beds with a fabric from between northeast to north-northeast (III–IV). The genesis of the drumlin can be summarised in three facies: two glacial and one glaciofluvial. The interpretation of the first facies indicates a bedrock scarp that might have been the initial factor of the drumlin formation and can be seen as a depositional environment. Furthermore, during this facies the ice sheet was probably not dependent on the landscape topography. The surface of the lower till indicates fluvial erosion, thus, before the glaciofluvial facies deposited sorted material it eroded the underlying material. During the last facies three till beds were deposited and assumed to be generated during seasonal fluctuations of the ice sheet. At this time, the ice sheet was governed by the landscape topography. Deformation and erosion were probably the most active processes during the last facies.

## INLEDNING

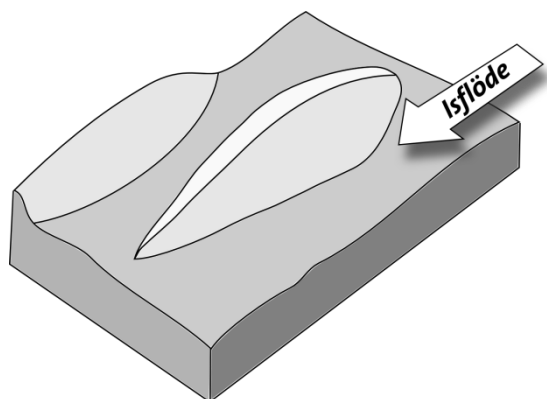
Drumliner har sedan mitten av 1800-talet blivit tillägnade ett stort antal artiklar vilket troligtvis gör dem till den mest undersökta glaciala landformstypen (Menzies 1979, Patterson & Hooke 1995). Trots detta har ännu inte någon generell teori för bildningen formulerats och drumlinen kan minst sagt beskrivas som enigmatisk. En drumlins form kan ofta liknas vid ett ägg, till hälften begravt i jorden, med den trubbiga sidan mot den forna isrörelseriktningen.

Benämningen drumlin användes första gången av Close 1867 för att beskriva en långsträckt moränrygg och härstammar från det gaeliska ordet *druim* vilket närmast översätts till kulle (Menzies 1979). Kartläggning av drumliner har i första hand utförts under sista delen av 1800-talet och första delen av 1900-talet av de geologiska undersökningarna vars länder varit påverkade av glaciationer (Knight 2010).

Drumliner är viktiga att studera då de har stor betydelse vid skapandet av glacialgeologiska inversionsmodeller, vilka beskriver glacialdynamiken under deglaciationen utifrån de landformer som skapades av isen (Kleman & Borgström 1996). I dessa modeller är drumlinen en avgörande landform och dess fulla potential i inversionsmodellering är ännu inte uppnådd utan mer arbete krävs för att tydligare beskriva de glaciala miljöer den bildas i. Flera studier har diskuterat möjligheten att formen på subglaciala landformer och i synnerhet drumliner skulle kunna indikera den dåvarande ishastigheten (Hess & Briner 2009, Stokes & Clark 2002). Sammantaget gör detta förståelsen av drumlinen till en viktig del i numerisk modellering av forna inlandsisar vilka i sin tur är mycket viktiga för att förbättra globala klimatmodeller.

Trots den tid som lagts ned på undersökningar av drumliner har ännu ingen tillfredsställande generell teori för deras bildande beskrivits. Två orsaker, som ofta anges för att en sådan teori ännu inte har presenterats, är den stora diversitet som visas inom landformstypen och att subglaciala miljöer, av uppenbara skäl är svåra att undersöka (Menzies 1979, Stokes m.fl. 2011, Knight 2010).

Drumliner definieras som strömlinjeformade ryggar belägna i den forna isrörelsens riktning (fig. 1). De har ofta en brantare sida uppströms, stötsida, och en flackare sida nedströms, läsida, även om Spagnolo m.fl. (2010) genom statistiska analyser visat att så inte alltid är fallet. Ofta är bildningarna 250 till 1000 meter långa och 120 till 300 meter breda (Clark m.fl. 2009). Drumlinerna förekommer vanligen i svärmar, kallade drumlinfält. Landformen



Figur 1. Typisk drumlinform med den branta sidan uppströms och den flacka sidan nedströms det forna isflödet.

påträffas inte sällan proximalt forna ismarginalzoner där isen under deglaciationen haft längre stillastående perioder (Menzies 1979). Dessutom förekommer de ofta i stråk där möjliga tidigare isströmmar varit aktiva (Hess & Briner 2009). När beskrivningarna sedan går mer i detalj upphör ofta de uppenbara likheterna drumlinerna emellan.

Det finns ett stort antal idéer om processerna bakom drumlinernas bildande (Bennett & Glasser 2009). Dessa idéer kan sammanfattas genom tre konceptuella modeller: erosion av mellanliggande material, deposition av landformen eller en kombination av de båda (Benn & Evans 1998). De konceptuella modeller som bygger på erosion av substratet kan i sin tur delas upp i två modeller, glacifluvial erosion och glacial erosion. Först, Shaws (1983) omdiskuterade modell vilken förklarar bildandet av drumlinerna genom subglaciala störtfloders erosion av substratet. Denna modell är kritiserad, speciellt för att den är svår att förklara fysikaliskt och att det inte finns några spår av sådana störtfloder förutom drumlinerna (Benn & Evans 2006, Shaw & Munro-Stasiuk 2006). Den andra erosionsmodellen bygger på glacial erosion av de underliggande sedimenten och är beskriven av Whittecar & Mickelson (1977) från ett område i östra Wisconsin, USA. De beskriver en bildningsmiljö med i princip endast glacial erosion och viss deposition av material. I sydvästra Sverige har Pässe (1998) visat två drumlinerna som uppvisar närmast identiska lagerföljder, vilket tyder på att materialet mellan drumlinerna eroderats av glacial erosion.

Den andra konceptuella modellen bygger på deposition och har beskrivits av Fairchild (1929) och Flint (1947). Deposition av isen bakom ett hinder är enkel att förklara fysikaliskt, till exempel i bergskärnedrumlinerna. Dessa typer har visats vanliga i Sverige (Möller 1987). Däremot har denna modell svårt att förklara varför drumlinerna initieras.

Den tredje konceptuella modellen kan ses som en kombination av Whittecars & Mickelsons (1977) samt Fairchilds (1929) och Flints (1947) modeller. Denna modell lyfts ofta fram som den mest accepterade och beskriver bildningen genom deformation av subglaciala sediment till drumlinerna (Boulton & Hindmarsh 1987, Boyce & Eyles 1991, Hart 1997). Det som styr deformationen av subglaciala sediment är i första hand portrycket i sedimenten (Boulton & Hindmarsh 1987) vilket har bevisats empiriskt av Iverson m.fl. (2007) genom studier under Engabreen i Norge.

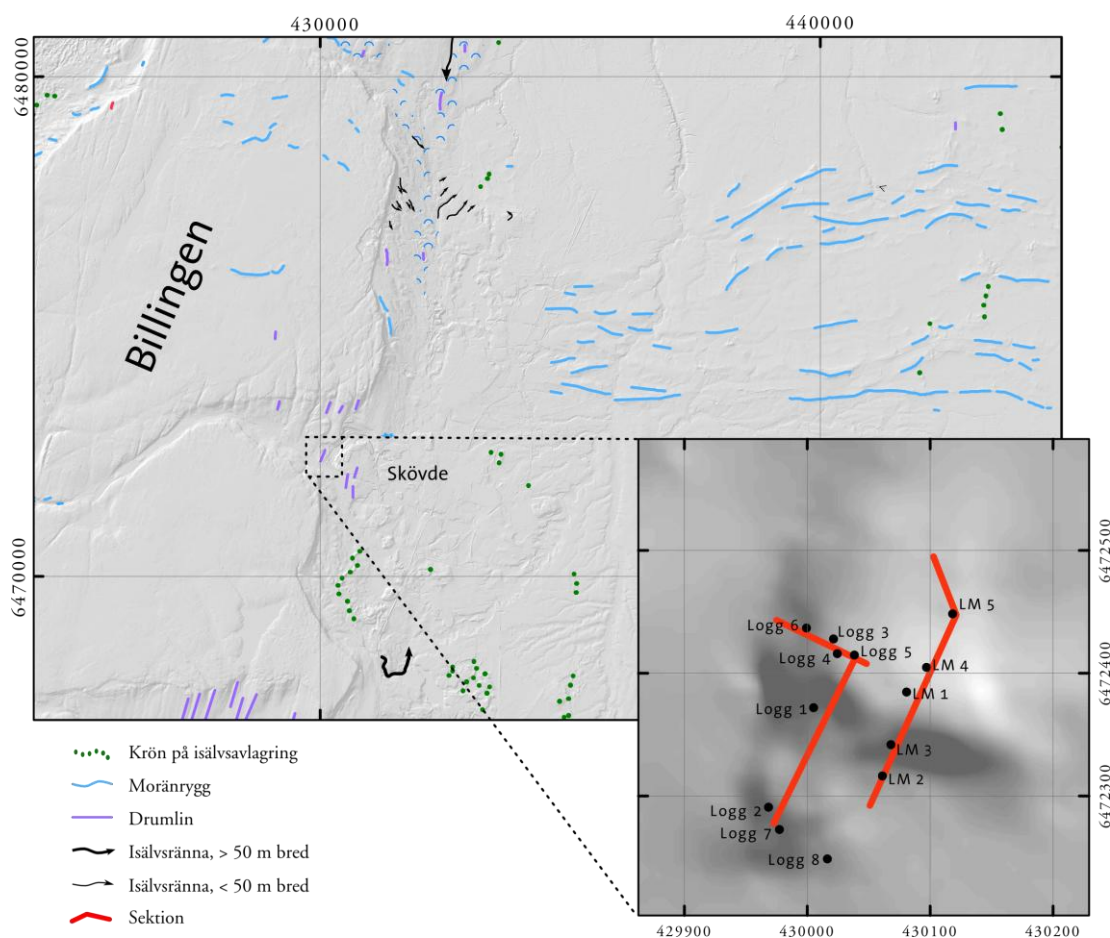
Det finns alltså exempel på drumlinerna som bildats på flera stadier i spannet mellan de olika modellerna, från glacialerosion till glacialdeposition via glacialdeformation, möjligen med undantag från de allra yttersta delarna av spannet. För att belysa problemet om processerna bakom drumlinerna utförde Stokes m.fl. (2011) en indelning av landformen i fem olika typer utifrån dess uppbyggnad: mestadels berg, delvis berg/delvis morän, mestadels morän, delvis morän/delvis sorterade sediment och mestadels sorterade sediment. Vidare beskriver de hur dessa typer av drumlinerna kan uppvisas i ett och samma drumlinfält vilket kan förklaras på två sätt. Att flera olika processer har varit aktiva under bildandet av ett och samma drumlinfält eller att sedimentdiversiteten beror på ursprungsmaterialet som isen deformerar till drumlinerna. Stokes m.fl. (2011) yrkar för den senare förklaringen då den är mindre komplex och de ser heller inga hinder för att en generell teori för bildandet av drumlinerna kan utvecklas.

Under ett flertal år har en drumlin grävts ut vid Cementa ABs kalkstenstäck i västra Skövde (fig. 2). Grävningarna påbörjades i och med att Cementa AB bryter den kalksten som är överlagrad av jord där bland annat den undersökta landformen ingår. Allteftersom drumlinerna

grävts igenom har flertalet snitt blottlagts vilket gett möjlighet till en serie fotografier, loggar och sektioner fördelade utmed landformen. Tidigare har arbete på drumlinen utförts av Lokrantz & Mikko (2007) samt av Tore Påsse (muntlig kommunikation) vid flertalet tillfällen. Hösten 2011 blottades ytterligare skärningar. Dokumentationen av dessa skärningar är basen i denna studie. Syftet med studien kan sammanfattas i fyra mål: Att beskriva stratigrafin i drumlinen, följa de stratigrafiska lagren lateralt och dela in dem i enheter, skapa en 3-dimensionell modell av stratigrafin samt med hjälp av resultaten från ovanstående tre mål diskutera drumlinens genes.

## OMRÅDESBESKRIVNING

Billingen reser sig cirka 150 meter över slätterna i Västergötland och når en höjd på 304 m ö.h. Berget är ett av Sveriges 15 platåberg och består av sedimentära bergarter som avlagrats under kambrium, ordovicium och silur. Magma trängde upp genom sprickor i berget under perm och bildade ett skyddande lager diabas (Lindström m.fl. 2000). Detta är anledningen att Billingen efter lång tid av erosion från vatten, vind och inte minst glaciationerna under kvartär tid ändå bevarats.



Figur 2. Karta över norra Billingen och Skövde med glaciala landformer, i bakgrunden en terrängskuggning av NNH (Lantmäteriet 2010). Uppförstorad bild visar undersökningsområdet med de loggar och sektioner som används i studien. Koordinater anges i SWEREF99 TM.

Jordarterna som drumlinen byggts upp av vilade på en plan kalkstensyta vid de östra delarna av Billingen, svagt sluttande mot sydost. Landformen ligger skyddad mellan slänter både i norr och söder. Den undersökta drumlinen ligger ensam. Liknande drumlinformer går dock att urskilja i närheten, men, det går inte påstå att den undersökta landformen tillhör ett drumlinfält. I och med att drumlinen som undersökt i denna studie ligger på en läsida är den troligvis inte jämförbar med det mer klassiska drumlinfält som ligger nordost om Billingen, proximalt från mellansvenska israndzonen, utan kan snarast jämföras med de drumliner som ligger på Billingens sydsida. Denna typ av drumlin brukar på engelska kallas *drumlinoid drift tail* och beskrivs av Embleton & King (1975). Därför kan denna studie inte ses som en analog till alla drumliner i området kring Billingen.

## METOD

### Litostratigrafiska studier

I november 2011 utfördes 8 sedimentloggar spridda över hela landformen, avritning av två sektioner, en längs med och en vinkelrätt mot drumlinriktningen och tre partikelorienteringsanalyser. Bestämning av sorteringsgrad, blockhalt, stenhalt, kompaktion och rundningsgrad gjordes efter en femgradig skala. Riktningen på isräfflor i kalkstenen noterades. Analys av partikelorienteringen gjordes på tre nivåer i logg 3. Mätningar utfördes i de undre delarna av ett grått lerigt diamikton, i ett grusigt diamikton och i de övre delarna av ett gulaktigt sandigt diamikton. I den mån det var möjligt grävdes en plan yta ut i skärningen och partiklar skrapades fram och mättes. Partiklarna för vardera partikelorienteringsanalys togs ur ett smalt omfång i höjddled, mindre än 1 dm.

### Tredimensionell modellering

En tredimensionell modell av drumlinens litostratigrafi skapades för att illustrera lagrens laterala utbredning. Modelleringen utfördes i GSI3D, Geological Surveying and Investigation in Three Dimensions (Kessler & Mathers 2004).

För att skapa en tredimensionell modell av kvartära sediment behövs sex avgränsande ytor kring det modellerade området. I detta fall konstruerades fyra av dem utifrån områdets avgränsning och de andra två skapades från en höjdmodell av markytan, den övre gränsen, samt en av berggrunden, den undre gränsen för modellen. Bergöverytan under drumlinen består av odeformerad kalksten och kan därför beskrivas som ett plan. Mätdata av bergöverytan från Cementa AB användes för att konstruera ytan. Approximering av ett plan genom mätpunkterna utfördes i ArcGIS 10 (ESRI 2011). Samma programvara användes för att konstruera den övre gränsen, markytan, genom att interpolera mellan höjdkurvor från Lantmäteriets Fastighetskarta (Lantmäteriet 2009), vilken inte är uppdaterad med resultatet från den senaste kalkbrytningen. Detta ger oss alltså en bild av drumlinen som den såg ut innan grävningarna började.

De loggar som ritats i fält konverterades till mer generella loggar för att användas i GSI3D. Likadant gjordes med de loggar som Lokrantz & Mikko (2007) beskrivit plus skisser och fotografier av Påsse (muntlig kommunikation). De olika enheterna i loggarna bands samman till fem sektioner med hjälp av de foton och sektionsskisser som gjorts i fält. Sist interpolerades ytor mellan enhetsgränserna i loggarna och sektionerna, dessa ytor användes sedan för att skapa ett tredimensionellt block för varje enhet.

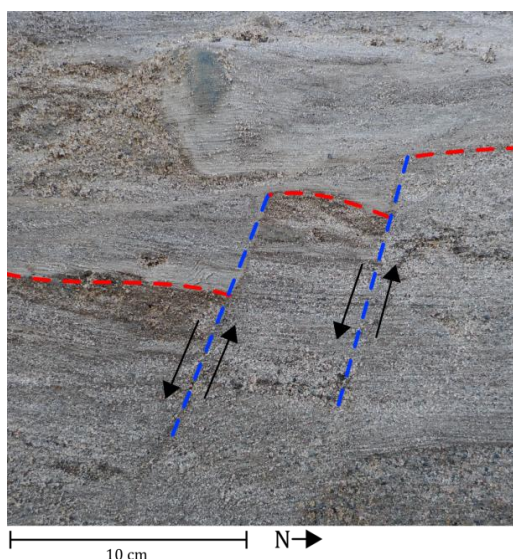
## RESULTAT

### Logg 1

Logg 1 (6472372;430005) dokumenterades på den nordliga delen av den skärning som var parallell med drumlinens riktning, nord-sydlig. För att kunna dokumentera en mer eller mindre full längd, från kalkstensytan till markytan behövde loggen göras i två delar på grund av grävarbeten, med en hiatus på cirka en meter till följd. Överst noterades ett gult diamikt material vilket var mer kompakt nedåt. I detta blev matrixet något finare och antalet stenar ökade i antal nedåt. Ställvis visade lagret viss sorteringsgrad och linser av sand och silt förekom. Delar av materialet var klaststött (clast-supported). Lagret övergick nedåt gradvis till ett grått och lerigt diamikt material. Vågiga strukturer i matrix var vanliga och jordarten hade ett mussligt brott. Ovanför hiatus var det en skarp övergång till ett gulorange grusigt sandigt sediment. För att fortsätta loggen förflyttades arbetet tio meter sydost och fortsatte där i samma lager som vid avslutet ovanför hiatus. Det grusiga sandiga sedimentet övergick skarpt till laminerad sorterad grå finsand. Övergången var inte erosiv utan det ovanpåliggande sedimentet har avsatts utan erosion i sanden under. Den sorterade sanden uppvisar flera olika förkastningsstrukturer (fig. 3). En spadbörning visade på en grå lerig och mycket kompakt diamikt jordart. De olika loggarna (1–8) visas i figur 4.

### Logg 2

Logg 2 (6472291;429968) dokumenterades inom den sydliga delen av drumlinen. Skärningen var väldigt uppbruten på grund av grävarbeten men gav ändå en bra möjlighet att få en god bild av lagerföljden. Loggningen började en halv meter under den naturliga markytan där det översta lagret var en brungul sandig diamikt jordart. Lagret var hårt kompakterat och innehöll grusiga och sandiga lager. Sedimenten övergick nedåt mot ett lager av mer sorterad karaktär. I detta var matrix till stora delar finsandigt med partier av mellansand. Stenar, gruspartiklar och linser av silt förekommer i lagret. Sorteringsgraden ökade nedåt. Vid åtta meter under markytan täcktes skärningen av rasmassor och loggen slutfördes istället i ett närliggande område. En hiatus på en meter gick tyvärr inte att undgå



Figur 3. Fotografi på två normalförkastningar från ett av de förkastningssystem i de lägre delarna av logg 1. Höger i bilden är norr ut (Fotografi av Gustaf Peterson).

när loggningen fortsatte tio meter öster ut. Där kunde en sandig diamikt jordart urskiljas vilken gradvis övergick i en siltig till lerig gråaktigt diamikt jordart. I botten, cirka en meter över kalkstensytan, är jordarten mycket hårt packad.

### **Logg 3**

Logg 3 (6472428;430021) loggades under den högsta punkten av ost–västliga sektionen. I logg 3 gjordes tre analyser av partikelorienteringen. De översta sju metrarna bestod av en gul sandig diamikt jordart som på djupet blev siltigare. I denna fanns ställvis sandlinser. Gradvis blev sedimentet brunare med djupet och varierade mellan klaststött och siltig eller sandig matrix. Ett lager finsand med ett deformerat diamikt lager i sig avbröt abrupt. Lagret hade en mäktighet på knappt en meter och övergick med en skarp kontakt till ett mycket kompakt mörktgrått siltigt diamikt lager. Färgen ändrades gradvis mot brunare nedåt och innehöll flertalet sandiga linser. Detta lager fortsatte ned till avslut i ras ungefär två meter ovanför bergöverytan.

### **Logg 4, 5 & 6**

Dessa loggar utgjorde de laterala delarna av den ost–västliga sektionen och gjordes i första hand för att få mer kontroll över den skiss som beskriver sektionen. Dessa loggar gjordes mer översiktligt än logg 1–3, detaljrikedomen är alltså något lägre. Logg 4, 5 och 6 (4: 6472416;430024, 5: 6472415;430038, 6: 6472437;429999) hade likvärdiga lagerföljder. I alla tre låg ett grått kompakt diamikt lager över kalkstensytan. Andelen finsand ökade uppåt. Över det grå kompakta lagret låg sorterad sand med visst grusinnehåll. Högre upp skiljde sig logg 4 och 5 något från logg 6. I logg 4 och 5 överlagrade ett rödbrunt hårt diamikt lager med finkornigt matrix och stor andel sten. Däremot, i logg 6 övergick sanden i ett gulrött sandigt diamikt lager som uppåt gradvis övergick mot en röd färgton.

### **Logg 7**

Logg 7 (6472273;429977) dokumenterades inom den södra delen, inte långt från logg 2, och kan snarast ses som ett komplement till den. Det översta lagret var ett gult finsandigt till siltigt diamikt lager, där silthalten var som högst i de mellersta delarna. Nedåt var det en skarp övergång till ett stenigt lager med grusig matrix som övergick mot ett sandigt diamikt lager. Loggen avslutades i rasmassor en och en halv meter över kalkstensytan.

### **Logg 8**

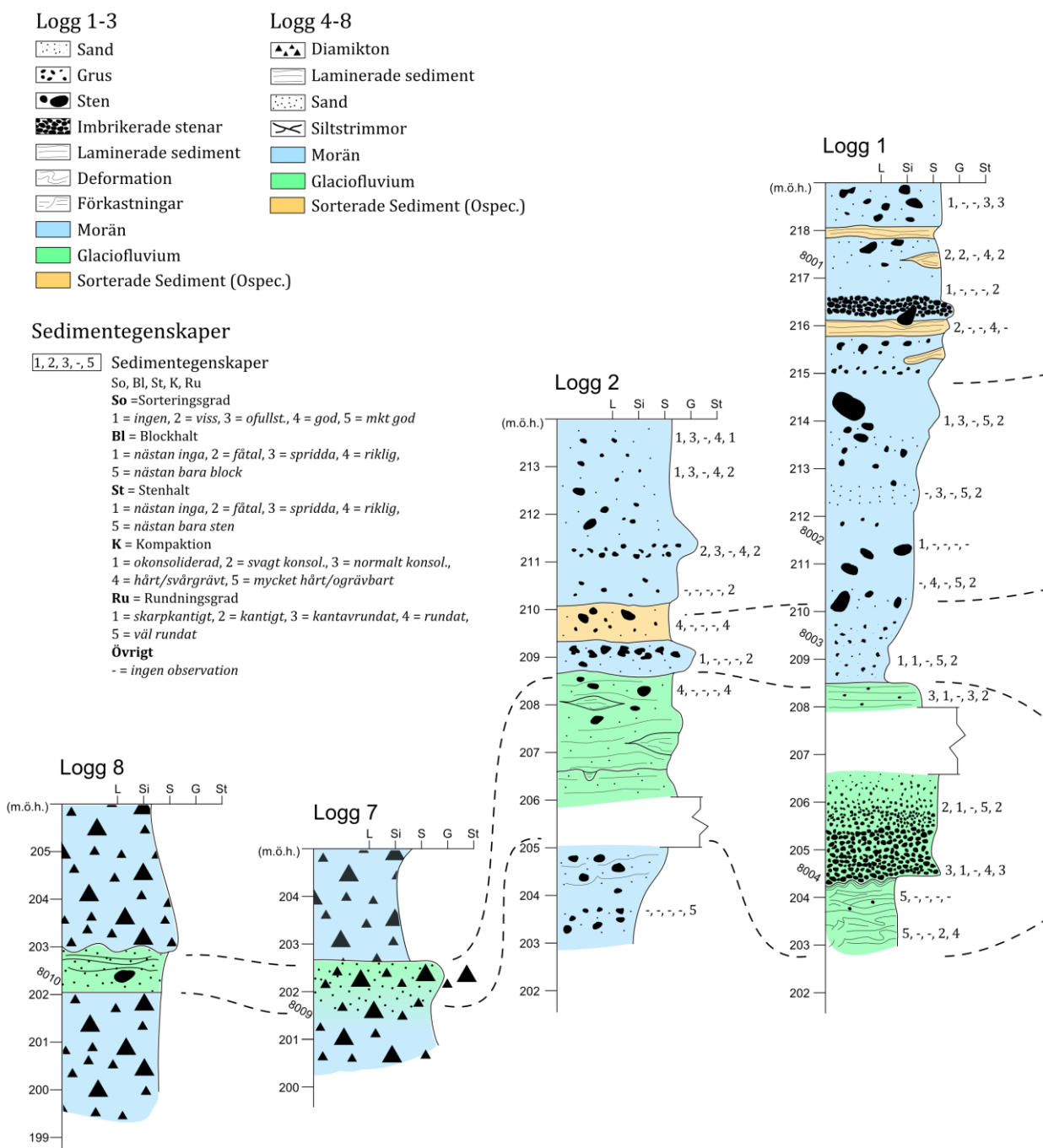
Logg 8 (6472249;430016) dokumenterades vid den södra infartsvägen öster om den huvudsakliga drumlinformationen. Överst låg en finsandig diamikt jordart med rödbrun nyans. Nedåt övergick den mot ett sandigare lager med ökad andel sten och gulare nyans. Detta lager överlagrade med en skarp kontakt laminerad sand vilken nedåt övergick till finsand med ytterligare en skarp övergång till ett siltigt grårött diamikt lager. Den laminerade sanden sträckte sig österut längs med vägen. Loggen avslutades i rasmassor cirka en meter över kalkstensytan.

## Sektioner

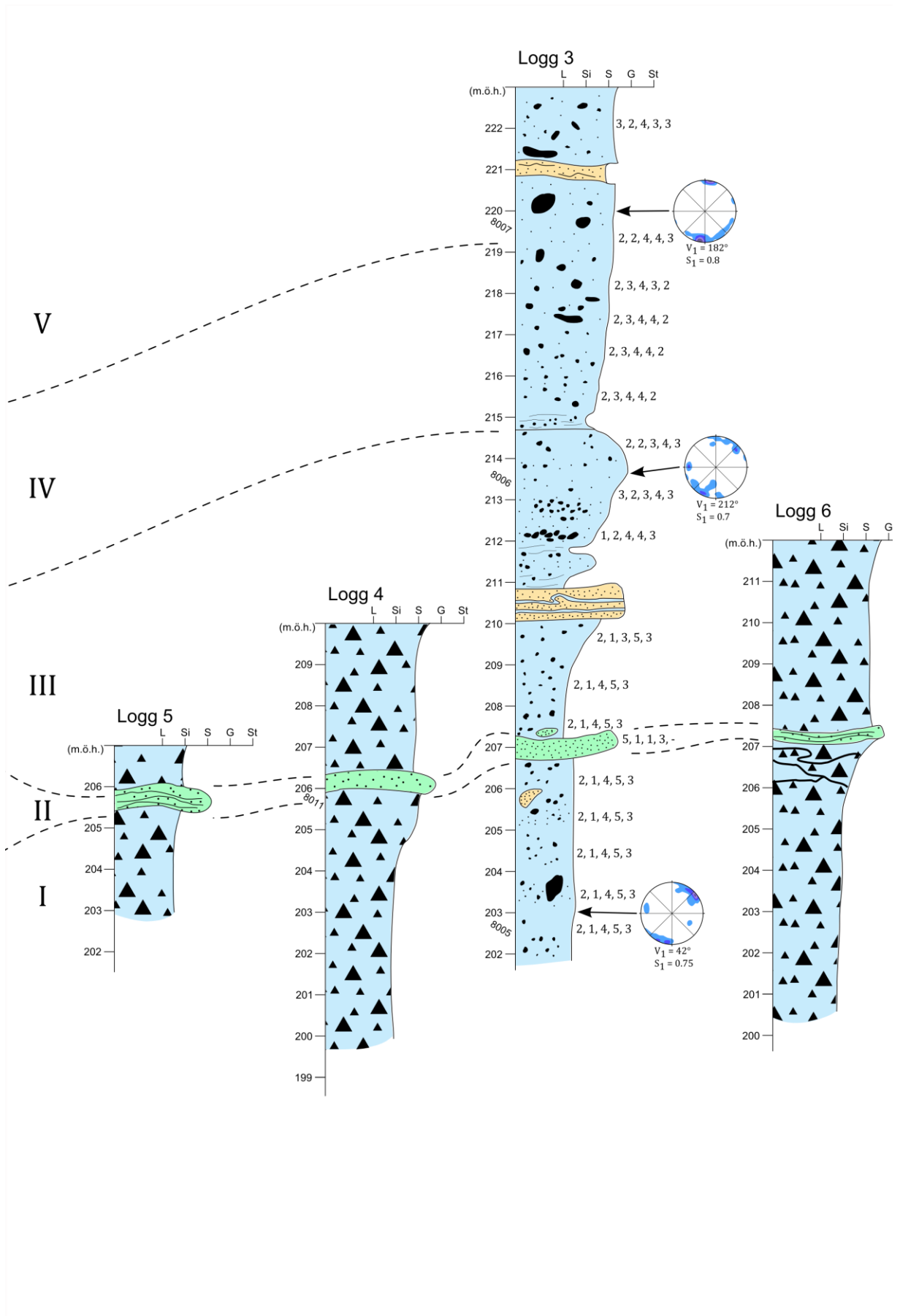
Två sektioner fotograferades och skissades av, en i nord-sydlig riktning och en i ost-västlig riktning. Den ost-västliga sektionen var tydlig utan terrasser som försvårade tolkningen. Den nord-sydliga sidan var däremot genomgrävd i ett flertal terrasser och arbetsvägar, varför denna sektion är väldigt skissartad (fig. 5).

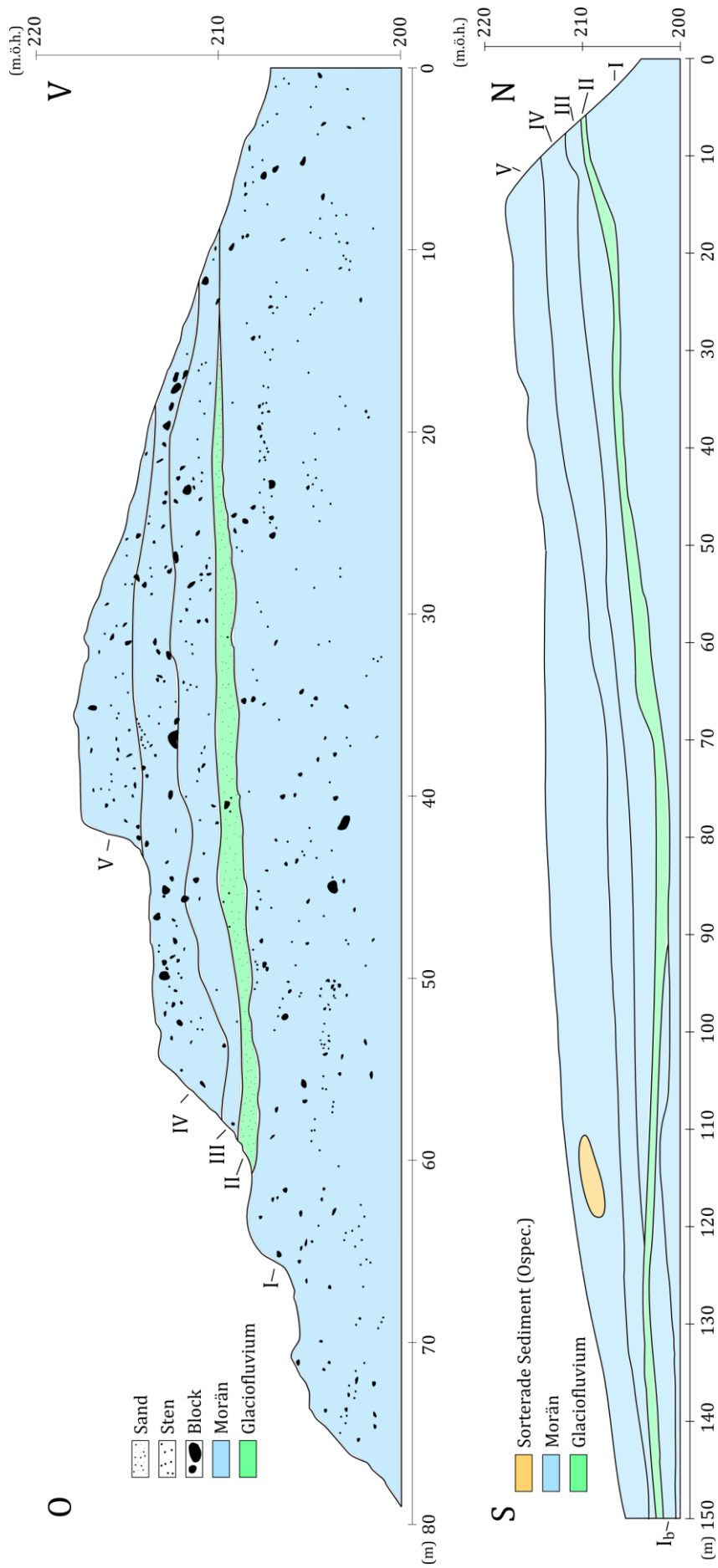
Den nord-sydliga sektionen uppfattas ha en komplexare uppbyggnad än den ost-västliga, vilket delvis kan bero på att den var söndergrävd av idoga grävmaskinister. Med hjälp av de två loggarna och flertalet punktobservationer med spadborr utmed skärningen skissades en bild av de kvarvarande sedimenten upp. Den undre enheten, ett grått kompakt diamikt material, vilade på kalkstensytan. Mäktigheten var störst i de norra delarna, omkring tio meter, och sänktes söderut och enheten var där svår att finna. Det anses troligt att den fortsätter kontinuerligt söderut även om den inte konstateras över allt i skärningen. I de södra delarna uppträdde enheten i en brunare nyans. Båda dessa diamikta lager var siltiga till leriga och mycket kompakterade. De överlagrades av en grusig diamikt jordart som ställvis, speciellt i den norra delen, innehöll laminerad sand. Den sorterade sanden skissades som ett kontinuerligt lager, om än tunnare i de södra delarna. Ovanpå det skissades en enhet som ska symbolisera det grusiga diamikta sedimentet. Övergången mellan dessa var otydlig och det är osäkert om den laminerade sanden alltid låg underst även om den, då det fanns möjlighet att avgöra det, gjorde det. Denna enhet överlagrades av ett kompakt grårött siltigt diamikt lager vilket övergick till ett finsandigt hårt packat diamikt lager. Uppåt övergick sedimentet till ett gulare sandigare material vars konsolidering minskade uppåt. Den generella bilden visar hur de flesta lager lutade mot syd och att det gråa leriga diamikta lagret utgjorde en stor del av drumlinformen i de norra delarna. Däremot utgjorde det gula sandiga diamikta lagret den största delen av landformen i söder.

Sektionen som löper ost till väst visade överlag en enklare uppbyggnad. Ovanpå kalkstensytan låg ett gråaktigt lerigt diamikt lager som var mycket konsoliderat och ställvis innehöll sandlinser. Enheten var åtta till tio meter mäktig. Ett gult grusigt lager, med viss sorteringsgrad, överlagrade den undre enheten. I det grusiga lagret gick det att följa ett kontinuerligt laminerat sandigt lager. Denna enhet övergick till ett gulbrunt diamikt lager med finkornigt matrix vilket sedan övergick till ett sandigt gult diamikt lager.



Figur 4. De 8 loggarna presenteras i ordning från syd till nord. Loggarna är avvägda i höjdlid, de enheter som tolkats i studien visas med streckade linjer och partikelanalyserna presenteras. Logg 1-3 är mer detaljerade och har därför en annan legend än 4-8. Figuren fortsätter på nästa sida.





Figur 5. De två sektioner som ritades av. Överst visas den ost-väsliga sektionen vilken är mer detaljerad än den nord-sydliga (under).

## Partikelorientering

Partikelorienteringsanalys 1 gjordes så långt ned i den understa enheten som möjligt, cirka en och en halv meter ovanför kalkstensytan. 20 partiklar mättes och plottades i ett stereonät. Analysen visade på en egenvektor ( $V_1$ ) på  $40^\circ$ , vilken är parallell med den tydligaste punktansamlingens riktning. De beräknade egenvärdena ( $S_1$ ,  $S_2$  och  $S_3$ ) gav en indikation på att riktningen är tydlig då egenvärde  $S_1$  är betydligt större än  $S_2$  och  $S_3$  (tabell 1). Alltså en isrörelseriktning från  $40^\circ$ .

Partikelorienteringsanalys 2 gjordes i det sandiga gulorange diamikta lagret, cirka tolv meter ovanför kalkstensytan. 20 partiklar mättes och plottades på i stereonät. Analysen visar på en egenvektor ( $V_1$ ) med värdet  $212^\circ$ . De beräknade egenvärdena ( $S_1$ ,  $S_2$  och  $S_3$ ) gav en indikation på att det finns en riktning i lagret (tabell 2). Analysen indikerar en isrörelse från  $32^\circ$ .

Partikelorienteringsanalys 3 gjordes i det övre finsandiga gulaktiga diamikta lagret, cirka 18 meter ovanför kalkstensytan. 20 partiklar mättes och plottades i ett stereonät. Analysen visade på en egenvektor ( $V_1$ ) med värdet  $182^\circ$ . De beräknade egenvärdena ( $S_1$ ,  $S_2$  och  $S_3$ ) gav en indikation på att det fanns en mycket tydlig partikelorientering, från  $2^\circ$  (tabell 3).

Tabell 1. Beräknad statistik på data från partikelorienteringsanalys 1.  $S_1 \gg S_2$  och  $S_3$  och visar därför på en mycket tydlig riktning.

Eigenvektor	Strykning	Stupning	Eigenvärde	$S_1+S_2+S_3=1$
<b>V1</b>	40,187	5,213	<b>S<sub>1</sub></b>	0,745
<b>V2</b>	131,141	10,335	<b>S<sub>2</sub></b>	0,187
<b>V3</b>	283,804	78,399	<b>S<sub>3</sub></b>	0,068

Tabell 2. Beräknad statistik på data från partikelorienteringsanalys 2.  $S_1 > S_2$  och  $S_3$  och visar därför på en tydlig riktning.

Eigenvektor	Strykning	Stupning	Eigenvärde	$S_1+S_2+S_3=1$
<b>V1</b>	211,833	7,129	<b>S<sub>1</sub></b>	0,706
<b>V2</b>	302,400	4,520	<b>S<sub>2</sub></b>	0,195
<b>V3</b>	64,532	81,546	<b>S<sub>3</sub></b>	0,099

Tabell 3. Beräknad statistik på data från partikelorienteringsanalys 13.  $S_1 \gg S_2$  och  $S_3$  och visar därför på en mycket tydlig riktning.

Eigenvektor	Strykning	Stupning	Eigenvärde	$S_1+S_2+S_3=1$
<b>V1</b>	181,852	7,042	<b>S<sub>1</sub></b>	0,779
<b>V2</b>	90,907	7,611	<b>S<sub>2</sub></b>	0,202
<b>V3</b>	314,167	73,602	<b>S<sub>3</sub></b>	0,018

## Isräfflor

Strax öster om de nordliga delarna av sektionerna (6472389;430064) mättes en isräffla på kalkstensytan. Den visade en riktning från  $27^\circ$  och överensstämmer med uppmätta isräfflor av Lokrantz & Mikko (2007) med riktning från  $20^\circ$ .

## **Tolkade enheter**

I de loggar och sektioner som ritats går det att följa fem enheter. En undre kompakt morän, ett lager glacifluvialt material och ovanpå det tre olika moränbäddar. Enheterna har namngetts från I–V med enhet I underst.

### ***Enhet I***

Den undre enheten, I, utgörs av ett grått diamikt material. Materialet ligger direkt på kalkstensytan och varierar i mäktighet mellan en till tio meter. I den norra delen av landformen är enheten mäktigast. Den är mycket kompakterad med lera som primär kornstorlek men blir grövre uppåt. Inga block och endast ett mindre antal större stenar går att urskilja. Dock är det en stor mängd mindre stenar i hela enheten och ställvis även sandlinser. Materialet har ingen sortering och tolkas som en lerig morän. I enheten gjordes partikelanalys vilken visade på en riktning från 42°.

### ***Enhet II***

Den andra enheten som går att urskilja i loggar och sektioner är lager av sorterad sand eller grus. Denna enhet skiljer sig mycket från övriga enheter, vilka genomgående är siltiga och leriga. Enhet II överlagrar regelbundet enhet I och varierar i mäktighet från en halv till fem meter, där de största mäktigheterna finns i de centrala delarna. Enhet II växlar från sorterad sand med lamineringar till grus som inte visar lika hög sorteringsgrad. Enheten har en gulröd ton. Ofta finns det en lagring mellan sandiga och finsandiga sediment. I de laminerade sandpartierna syns ställvis förkastningsstrukturer. Block har inte påträffats i enheten dock finns det en del större kantrundade stenar. Enhet II, i och med dess höga sorteringsgrad och rundade partiklar, klassas som ett glaciofluvialt påverkat material.

### ***Enhet III***

Färgen är grå till rödgul. Enhet III överlagrar ofta enhet II med en skarp kontakt. Mäktigheten varierar från en halv till sju meter med de största mäktigheterna i de norra delarna. Sorteringsgraden är låg med siltlinser och kantiga partiklar. Block är inte vanliga men en hög andel sten finns i hela enheten. Vanligen är materialet mycket hårt men inte så kompakterat som i enhet I. Den primära kornstorleken är finsand till silt. Sorteringsgraden samt de kantiga partiklarna gör att materialet tolkas som en morän med hög andel finsand. Partikelanalys i de övre delarna av enheten visar på en partikelorientering från 32°.

### ***Enhet IV***

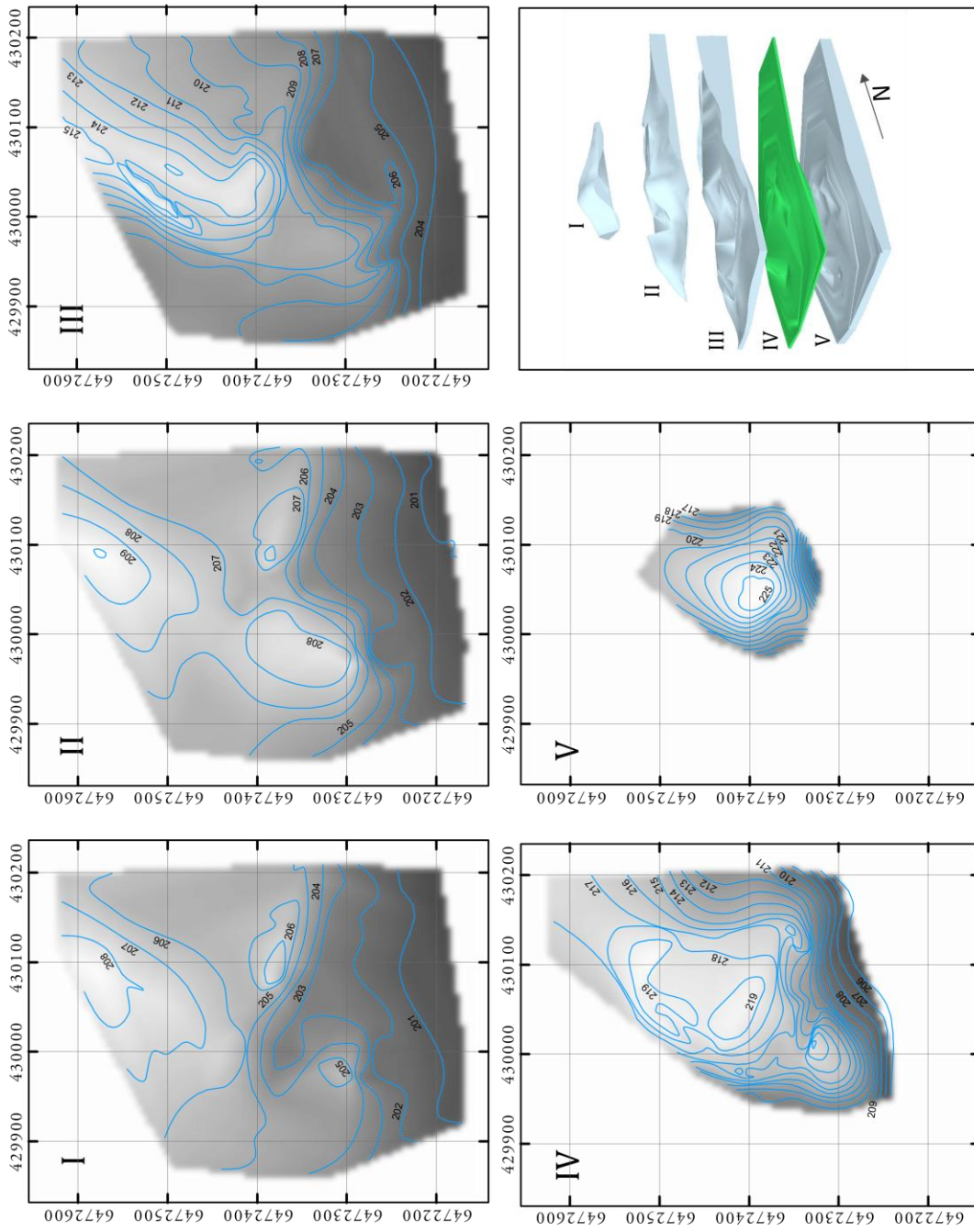
Enhet IV har endast påträffats i de mäktiga delarna av landformen. Enheten har en till synes jämn fördelning med en mäktighet kring fyra meter. Enheten varierar mellan gul och orange nyanser. Sorteringen av materialet är låg med mycket sten och en betydande mängd block. Partiklarna är kantiga. Den dominerande kornstorleken är finsand med lager av grövre sand och grus. Enheten tolkas som en finsandig morän.

**Enhet V**

Enhet V utgör den översta av enheten och består av ett normalkonsoliderat gult sandigt diamikt material. En betydande mängd sten finns i enheten medans block är mer sällsynta. Partiklarnas rundningsgrad är låg och sedimentet är osorterat förutom i linser av sand. Den dominerande kornstorleken är sand men blir finare nedåt i enheten. Enhet V tolkas som en sandig morän. I de mellersta delarna av enheten gjordes partikelanalys vilken visar en partikelorientering från 2°, vilket överensstämmer med landformens riktning.

**Tredimensionell modell**

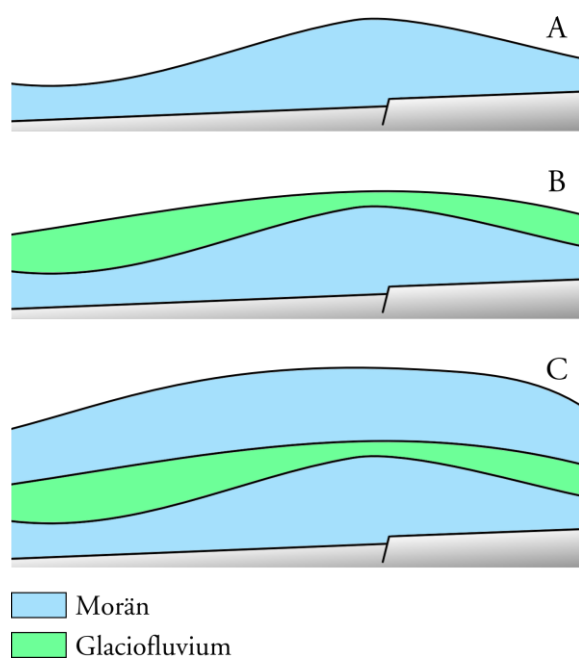
De fem enheter som har kunnat urskiljas i landformen har använts som grund till modelleringen (fig. 6). Modelleringen skapade överytor för varje enhet och med hjälp av dem var det möjligt att visualisera topografin för varje enhet. Den undre enheten (I) ligger utsmetad över hela drumlinområdet med en varierande mäktighet. I de nordöstra delarna är sedimenten mäktigast och tunnast ut söderut. Mitt i området börjar en svacka som sträcker sig mot sydost. Enhet (II) täcker hela undre enheten. Denna enhet har liten variation i mäktighet och fyller i princip de håligheter som finns i undre lagret. I övrigt följer topografin enhet I:s yta. Den tredje enheten (III) har däremot en tydlig egenform och reser sig betydligt i de nordöstra delarna, det som är landformens kärna, för att sedan tunnast ut lateralt. Även enhet III täcker hela drumlinområdet. Ovanpåliggande enhet (IV) däremot, täcker inte hela drumlinområdet. Enhet IV är mäktigare än de underliggande lagren och utgör stora delar av landformen. Även enhet V täcker endast delar av landformen och kan liknas vid en hatt som ligger allra högst upp på landformen. Enhet V är mäktigast i de centrala delarna.



Figur 6. Den tredimensionella modellen av drumlinen (nere till höger). Topografin av de fem enheternas (I–V) överytor presenteras med de interpolerade höjdmödelerna i bakgrunden och konturer med en meters ekvidistans. Koordinater anges i SWEREF99 TM.

## DISKUSSION

En hypotes för drumlinens bildning innefattar tre utvecklingsfaser: två glaciationsfaser och en glacifluvial fas (fig. 7). Initialskedet antas vara en närmast plan kalkstensyta med en skarp nivåskillnad rakt under landformen. Detta jack i kalkstensytan ligger rakt under de mäktigaste delarna av landformen och antas vara utbildad innan överlagringen då det inte är möjligt att finna några storskaliga förkastningsstrukturer i de överliggande sedimenten. Initialiseringen av den undre moränenheten (I) kan möjligen vara en läsidesdeposition i det hålrum som bildades distalt nivåskillnaden i kalkstensytan. Detta skulle kunna vara en startpunkt för bildandet av drumlinen. Detta förklarar dock inte varför det finns andra drumliner i området. Enhet I avsattes av en is med riktning från nordnordost och verkar ha varit endast lite påverkad av Billingens topografi (fig. 7A). Efter deposition av enhet I drog sig isen tillbaka. Fasen vid denna retirering och senare vid avancering igen karakteriserades av vattenflöden med visst sedimentinnehåll, troligtvis en glacifluvial miljö. De variationer i enhet I:s tjocklek som var möjliga att se med hjälp av den 3-dimensionella modellen kan förklaras av glacifluvial erosion av den undre moränenheten (A i fig. 7) innan avsättning av sand och grus sker (B i fig. 7). Det tidsspänn som landformen inte var täckt av is är svårt att avgöra men kan ha varit allt från en hel stadial till betydligt kortare säsongsvariationer som skulle kunna ge glaciala fluktuationer. Efter den glacifluviala faser avancerade således isen ännu en gång och avsatte en morän (C i fig. 7). Denna fas kan delas in i tre undergrupper, vilka överensstämmer med enhet III–V. Varje enhet kan möjligen förklaras med säsongsvariationer i isutbredningen. Partikelanalys i de övre tre enheterna visar på en mer nordlig isrörelseriktning. Vid depositionen av enhet III hade isen en riktning från nordost. Enhet IV avsattes som ett täcke över de underliggande enheterna. När den översta enheten (V) avsattes var även glaciala erosiva krafter aktiva. I detta skede förstärktes landformens topografi genom erosion på sidorna, vilket förklarar att de två övre enheterna är avklippta. Isrörelsen var nu från nordnordost.



Figur 7. Schematisk figur av bildningshypotesen, från övre till nedre: En bar kalkbergsyta, Deposition av morän (A – glacial fas), Glacifluvial erosion samt deposition av glacifluvialt material (B – glacifluvial fas), Deposition, deformation och glacial erosion av moränbäddar (C – glacial fas).

Enhet I kan ses som en depositionsfas där material i första hand avsattes och i andra hand deformerades till en form som var början till drumlinens egenform. Bildningen av enhet II, den glaci-fluviala, kan tolkas som en period med både erosion i underliggande sediment samt deposition av nytt material. Avlagringen av de tre enheterna (III–V) kan ses som en kombination mellan erosion och deformation. Deformation har troligtvis varit en aktiv process under delar av drumlinens bildande, dock finns endast mindre förkastningsstrukturer i sedimenten och inga större veck har noterats i lagerföljden.

Den tredimensionella modelleringen av sedimentutbredningen som gjorts i den här studien kan ses som en test av programvaran GSI3D. Den datamängd som använts i modelleringen är troligen i minsta laget för de analysers som gjorts av den. Detta är viktigt att trycka på och till exempel kan flera av de topografiska variationerna i de olika enheternas överytor bero på artefakter vid interpoleringen. Hur som helst, data som genererats vid den tredimensionella modelleringen kan ändå antas ge en generell bild av lagrens utbredning och topografi.

## REFERENSER

- Benn, D.I. & Evans, D.J.A., 1998: *Glaciers and glaciation*. Arnold, London.
- Benn, D.I. & Evans, D.J.A., 2006: Subglacial megafloods: outrageous hypothesis or just outrageous? I P. Knight (red.): *Glacier science and environmental change*. Blackwell, Oxford.
- Bennett, M.M. & Glasser, N.F., 2009: *Glacial geology: ice Sheets and landforms*. John Wiley & Sons.
- Boulton, G. S. & Hindmarsh, R.C.A., 1987: Sediment deformation beneath glaciers: rheology and geological consequences. *Journal of Geophysical Research* 92, 9059–9082.
- Boyce, J.I. & Eyles, N., 1991: Drumlins carved by deforming till streams below the Laurentide ice sheet. *Geology* 19, 787–790.
- Clark, C.D. Hughes, A.L.C., Greenwood, S.L., Spagnolo, M. & Ng, F.S.L., 2009: Size and shape characteristics of drumlins, derived from a large sample, and associated scaling laws. *Quaternary Science Reviews* 28, 677–692.
- ESRI (2011), *ArcGIS Desktop*.
- Embleton, C. & King, C.A.M., 1975: *Glacial geomorphology*. Edward Arnold, London.
- Fairchild, H.L., 1929: New York drumlins. *Proceedings of the Rochester Academy of Science* 7, 1–37.
- Flint, R.F., 1947: *Glacial geology and the Pleistocene epoch*. Wiley, New York.
- Hart, K.J., 1997: The relationship between drumlins and other forms of subglacial glaciotectonic deformation. *Quaternary Science Reviews* 16, 93–107.
- Hess, D.P. & Briner, J.P., 2009: Geospatial analysis of controls on subglacial bedform morphometry in the New York drumlin field—implications for Laurentide ice sheet. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 1126–1135.
- Iverson, N.R., Hooyer, T.S., Fischer, U.H., Cohen, D., Moore, P.L., Jackson, M., Lappégard, G. & Kohler, J., 2007: Soft-bed experiments beneath Engabreen, Norway: regelation infiltration, basal slip and bed deformation. *Journal of Glaciology* 53, 323–340.

- Kessler, H. & Mathers, S.J., 2004: From geological maps to models—finally capturing the geologists' vision. *Geoscientist* 14, 4–6.
- Kleman, J. & Borgström, I., 1996: Reconstruction of paleo-ice sheets—the use of geomorphological data. *Earth Surface Processes and Landforms* 21, 893–909.
- Knight, J., 2010: Drumlins and the dynamics of the subglacial environment. *Sedimentary Geology* 232, 91–97.
- Lantmäteriet, 2009: *Fastighetskartan*.
- Lantmäteriet, 2010: *Produktbeskrivning: GSD-Höjddata, grid 2+*.
- Lindström, M., Lundqvist, J. & Lundqvist, T., 2000: *Sveriges geologi från urtid till nutid*, Andra uppl. Studentlitteratur, Lund.
- Lokrantz, H. & Mikko, H., 2007: Studie av skärning genom drumlin i Cementas täkt, Skövde. *Sveriges geologiska undersökning Rapport 2007:32*.
- Menzies, J., 1979: A review of the literature on the formation and location of drumlins. *Earth-Science Reviews* 14, 315–359.
- Möller, P., 1987: Moraine morphology, till genesis, and deglaciation pattern in the Åsnen area, south-central Småland, Sweden. *Lundqua Thesis* 20, 146.
- Patterson, C.J. & Hooke, R.L., 1995: Physical environment of drumlin formation. *Journal of Glaciology* 41, 30–38.
- Påsse, T., 1998: Early Weichselian interstadial deposits within the drumlins at Skrea and Vinberg, southwestern Sweden. *GFF* 120, 349–356.
- Shaw, J., 1983: Drumlin formation related to inverted melt-water erosional marks. *Journal of Glaciology* 29, 461–479.
- Shaw, J. & Munro-Stasiuk, M., 2006: Subglacial megafloods: Outrageous hypothesis or just outrageous? I P. Knight (red.): *Glacier science and environmental change*. Blackwell, Oxford.
- Spagnolo, M., Clark, C.D., Hughes, A.L.C., Dunlop, P. & Stokes, C.R., 2010: The planar shape of drumlins. *Sedimentary Geology* 232, 119–129.
- Stokes, C.R., Spagnolo, M. & Clark, C.D., 2011: The composition and internal structure of drumlins: complexity, commonality, and implications for a unifying theory of their formation. *Earth-Science Reviews* 107, 398–422.
- Stokes, C.R. & Clark, C.D., 2002: Are long subglacial bedforms indicative of fast ice flow? *Boreas* 31, 239–249.
- Whittecar, G.R. & Mickelson, D.M., 1977: Sequence of till deposition and erosion in drumlins. *Boreas* 6, 213–217.