

# Inledning

## BAKGRUND

Sveriges geologiska undersökning har sammanställt denna geokemiska atlas på grund av det ökade behovet i samhället av kunskap om metaller och andra grundämnens förekomst i miljön. Geokemi är vetenskapen om huvudelement och spårämnen i vår miljö, oavsett om källan är naturlig eller antropogen. Geokemi ger oss information om förekomsten av de kemiska elementen i berggrund, jord, vatten och vegetation.

Från början bedrevs geokemiska studier på 1800-talet för att undersöka jordskorpans kemiska sammansättning. F.W. Clarke vid USAs geologiska undersökning (USGS) publicerade 1889 *The Relative Abundance of Geochemical Elements* som 1908 följdes av *The Data of Geochemistry*. I Ryssland sågs V.I. Vernadsky som en föregångsman då han 1924 publicerade (på ryska) *Geochemistry*, i vilken tyngdpunkten låg på atomerna och deras rörelsemönster. Han blev också pionjär inom biogeokemin när *Essays on Geochemistry and the Biosphere* publicerades, i vilken elementens uppträdande i växter och djur behandlades. Under 1900-talet utvecklades geokemin i Ryssland starkt med inriktning på sökandet efter värdefulla mineral. Efter andra världskriget analyserades tusentals prov från jordskorpan vid Vernadskyinstitutet i Moskva och genomsnittliga värden för huvudelement bestämdes.

Användningen av glaciala avlagringar för att bestämma jordskorpans genomsnittliga elementhalter initierades 1933 av Victor Goldschmidt vid universitetet i Göttingen. Goldschmidt noterade att den genomsnittliga sammansättningen av huvudelementen i 77 prov av glacial lera (avsatt framför kanten av en inlandsis), sammanföll med den genomsnittliga sammansättning som bestämts av Clarke & Washington (1924) och som beräknats från analyser av över 5 000 bergartsprov. Medelvärdena av jordskorpans innehåll av huvudelement som räknades fram av Clarke och Washington, av Goldschmidt och vid Vernadskyinstitutet visar god överensstämmelse (Enghag 1998).

Geokemisk kartläggning är en metod för att göra det osynliga synligt och består i systematisk insamling av prov med åtföljande kemiska analyser där resultatet avrapporteras i form av kartor och en tolkning av analysresultatet. Metoden med geokemisk kartläggning togs ursprungligen fram som ett verktyg för att söka efter mineralfyndigheter (Brundin 1939). I Sverige var det Nils Herman Brundin som utvecklade tekniken för att passa svenska förhållanden. Brundin, som utbildades av Goldschmidt i Göttingen på 1930-talet, anställdes 1969 vid SGU och införde huvudsakligen två metoder i syfte att söka mineralfyndigheter: biogeokemi och morängeokemi, den senare inriktad på tunga mineral. Under en intensiv period på

# Introduction

## BACKGROUND

The Geological Survey of Sweden has compiled this geochemical atlas because of the increased societal need for knowledge about the distribution of metals and other elements in the environment. Geochemistry, the science of major and trace elements in our environment, whether the source is natural or anthropogenic, gives us information about the abundance of chemical elements in bedrock, soil, water and vegetation.

Initially, geochemical studies were conducted during the 19th century to investigate the chemical composition of the Earth's crust. In 1889, F.W. Clarke at the U.S. Geological Survey published *The Relative Abundance of Geochemical Elements*, which was followed by *The Data of Geochemistry* in 1908. In Russia, V.I. Vernadsky was seen as one of the founders of the topic when he in 1924 published *Geochemistry* (in Russian), in which the main focus was atoms and their molecular movement. Vernadsky became a pioneer within biogeochemistry when he published *Essays on Geochemistry and the Biosphere* on the significance of elements in plants and animals. In the 20th century, the study of geochemistry developed strongly in Russia with particular focus on mineral exploration. After World War II, thousands of samples of the Earth's crust were analysed at the Vernadsky Institute in Moscow and the average concentration of the major elements was determined.

The method of using samples from glacial deposits to determine the average element composition of the Earth's crust was initiated by V.M. Goldschmidt in 1933 at the University of Göttingen. Goldschmidt observed that the average abundance of the major elements in 77 glacial clay samples (deposited at the edge of an ice sheet) was similar to that of the 5 000 bedrock samples that Clarke & Washington (1924) had analysed. The mean values of the major elements of the Earth's crust calculated by Clarke and Washington, by Goldschmidt and at the Vernadsky Institute all show good agreement (Enghag 1998).

Geochemical mapping is the method of revealing "the invisible", and it involves the systematic sampling, chemical analysing and reporting of results as maps and interpretations. Geochemical mapping was originally developed as a tool for mineral exploration (Brundin 1939). In Sweden, Nils Herman Brundin adapted this technique to match Swedish conditions. Brundin, who was educated by Goldschmidt at the University of Göttingen in the 1930s, was employed by the Geological Survey of Sweden (SGU) in 1969 and he introduced primarily two exploration methods: biogeochemistry and till geochemistry, the latter with a focus on heavy minerals. During an intense period in the 1970s, prospectivity mapping was the dominant operation in geochemistry. However, the methods were not ideal for environmental studies, and in the 1980s the methods were redeveloped to meet the societal needs. This methodology has been used

1970-talet var prospekteringen dominerande för den geokemiska verksamheten. Metoderna var dock inte optimala för miljöändamål utan utvecklades under 1980-talet för att få bredare användning i samhället. Metodiken har använts för mineralprospektering, samhällsplanering, inventering av förorenad mark, human- och veterinärmedicin samt basnäringar inom skogs- och lantbruk. Inom den relativt nya vetenskapen medicinsk geologi har den geokemiska fördelningen av element en central roll i den geologiska miljö som utgör allt levandes livsrum. Vetgirigheten om vad som påverkar vår hälsa har ökat kunskapen om spårämnenas goda och dåliga influenser på människokroppen. Redan för 450 år sedan visste man att vissa element var nödvändiga för människan, men att de också kunde vara toxiska, vilket Paracelsus (1493–1541) uttryckte i frasen ”det är dosen som förgiftar”.

En växande gren av tillämpad geokemi är tätortsgeokemi som fokuserar på de urbana systemen i samhället. Varje stad har sin unika historia med industriell och kommersiell uppbyggnad som fått metaller att cirkulera i teknosfären. Utöver det antropogena tillskottet av metaller finns också den naturgivna källan till elementen i en stads geologiska miljö. I de urbana kartläggningarna ingår ofta analyser av organiska miljögifter som komplement till de metaller man i huvudsak fokuserar på.

Internationellt har geologiska undersökningar de senaste 60 åren använt geokemisk kartläggning för att få information om de kemiska elementens naturliga förekomst och spridning i litosfären, biosfären och hydrosfären. Provtagningsmedia, avstånd mellan insamlade prov

in fields like mineral exploration, social planning, inventorying of polluted ground, human and veterinary medicine, agriculture and forestry. Within a relatively new field of science called medical geology, the geochemical distribution of elements plays an essential role in the geological environment of all living organisms. The curiosity about what affects our health has led to increased knowledge of the good and bad influences of trace elements in the human body. More than 450 years ago, it was evident that some elements which were essential to the human body in small amounts became toxic at higher concentrations, something that Paracelsus (1493–1541) expressed in his phrase “the dose makes the poison”.

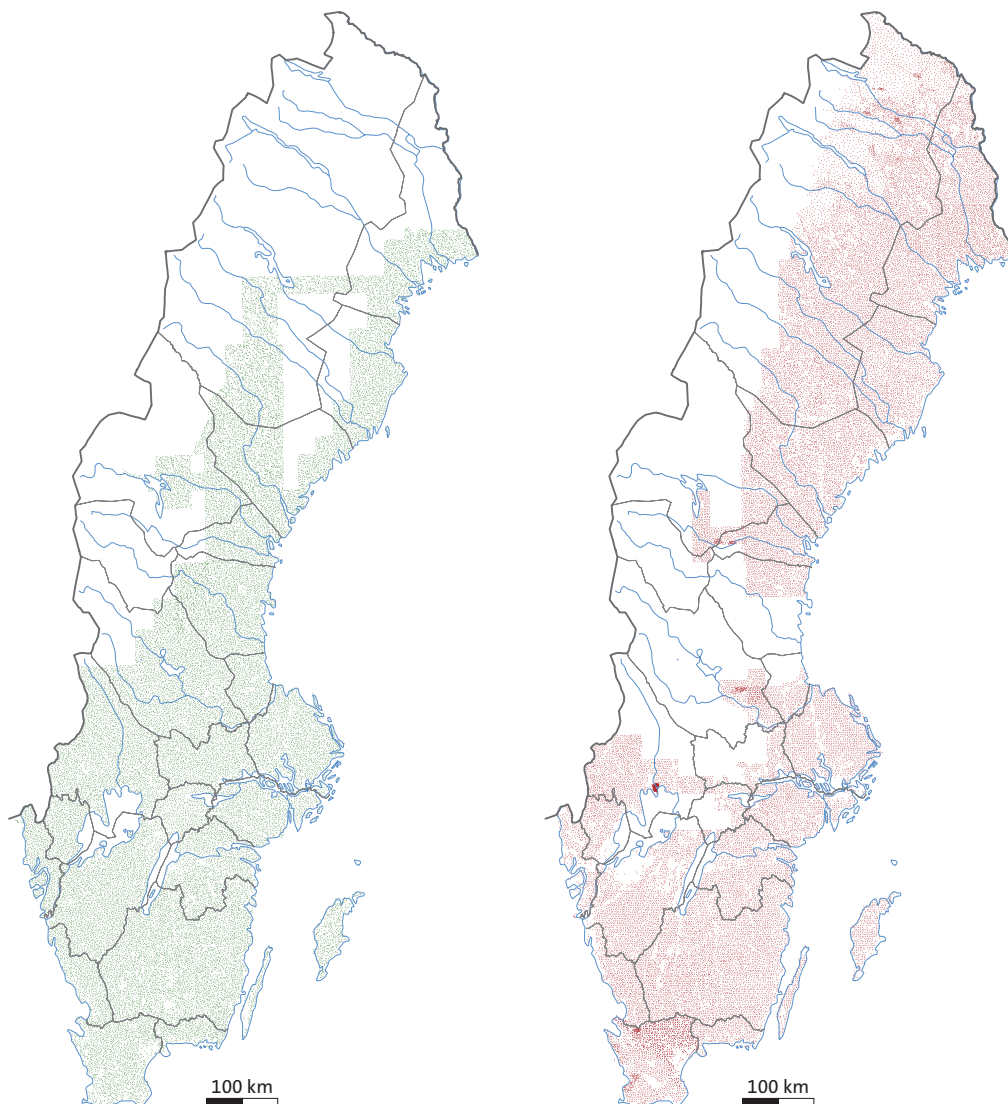
Urban geochemistry, a growing subject within the field of applied geochemistry, focuses on the presence of elements in the urban environment. Every city has its own history with industrial and commercial expansion which has deposited metals in the technosphere. In addition to anthropogenic sources of metals, there are natural sources of elements in the geological environment of a town. In the field of urban mapping, analyses of organic pollutants are often included as an additional feature to the mapping of metals that is the focus.

For the past 60 years, geological surveys around the world have used geochemical mapping to obtain information about the natural distribution of elements in the lithosphere, biosphere and hydrosphere. The sample media, distances between collected samples and analytical methods have been chosen to suit the particular survey. In cities, high sampling density is used (Johnson et al. 2011) and for specialised projects, for instance within prospectivity mapping, thousands of

Provtagning av bäckvattenväxter (till vänster) och morän (till höger).  
Sampling of stream plants (left) and till (right).







Figur 1. Provtagna områden med bäckvattenväxter för den biogeokemiska karteringen 1982–2006 (till vänster) och med morän för den regionala markgeokemiska karteringen 1983–2013 (till höger). Provtagningsstätheten är lika för de båda metoderna med cirka ett prov per sex kvadratkilometer. *Sampled areas of stream plants for the biogeochemical mapping 1982–2006 (left) and till sampled for the regional geochemical mapping 1983–2013 (right). The sample density for both mapping programmes is about one sample per six square kilometres.*

och analysmetoder har anpassats till syftet med en undersökning. I städer används tät provtagning (Johnson m.fl. 2011) och vid särskilda undersökningar inom exempelvis mineralprospektering kan tusentals prov per kvadratkilometer samlas in. Vid kartläggningar där resultatet presenteras i liten skala används gles provtagning. I ett samarbete (Forum of European Geological Surveys, FOREGS) mellan de europeiska geologiska undersökningarna täcktes nästan hela Europa med en täthet av 1 prov per 5 000 km<sup>2</sup> med prov av jord från två djup, humus, älvsediment, översvämningssediment samt strömmande vatten (Salminen m.fl. 2005). Ett annat exempel på samprojekt är *Geochemical Mapping of Agricultural and Grazing Land Soil* (GEMAS) där 33 europeiska länder samlade in prov av åkermark och betesmark med en provtagningsstäthet av 1 prov per 2 500 km<sup>2</sup> (Reimann m.fl. 2013). Några resultat från GEMAS-projektet beskrivs i kapitlet Jordbruksmarkens geokemi i denna atlas.

Enligt det europeiska regelverket *Registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals (REACH)*, som tillkom 2006, krävs säker industriell produktion och hantering av såväl antropogent framställda som naturligt förekommande metaller och andra spårämnen för att minimera risken för föroreningar. Det är därför viktigt att

samples per square kilometre can be collected. For mapping where the results are presented at a smaller scale, a lower sampling density is used. In a collaborative work, the Forum of European Geological Surveys (FOREGS) conducted by the European geological surveys, an area that covered almost all of Europe was sampled with a density of 1 sample per 5 000 km<sup>2</sup> with sample media of soil (from two depths), humus, river sediment, flood sediment and stream water (Salminen et al. 2005). Another example of a collaborative project is *Geochemical Mapping of Agricultural and Grazing Land Soil* (GEMAS), in which 33 countries participated and provided samples from agricultural and grazing land with a sample density of 1 sample per 2 500 km<sup>2</sup> (Reimann et al. 2013). Some results from the GEMAS project are presented in the chapter Geochemistry of agricultural soil in this atlas.

According to the European Regulation on the *Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)* that was founded in 2006, safe handling and industrial production of anthropogenic and natural metals and trace elements are required to minimise potential pollutants. Therefore, it is important to know about the natural background levels of elements and their sources. Many countries have set limiting values for elements to allow for environ-

känna till naturliga bakgrunds nivåer av element och orsaken till dessa. Många länder har tagit fram gränsvärden som är anpassade till respektive lands förutsättningar för att arbeta för en säker miljö. I Sverige har Naturvårdsverket bestämt gränsvärden och riktvärden för bland annat dricksvatten, ytvatten, rötslam, jord, sjösediment och damm. För jord finns hittills riktvärden för antimon, arsenik, barium, bly, kadmium, kobolt, koppar, krom, kvicksilver, molybden, nickel, vanadin och zink samt ett flertal organiska miljögifter (Naturvårdsverket 2009). Den naturliga bakgrunden av element är dock inte homogen utan varierar beroende på karaktären hos berggrunden och sammansättningen av det jordmaterial som överlagrar denna. Kartläggning av elementens rumsliga fördelning visar att det kan finnas så stora regionala skillnader att naturligt uppträdande metaller har halter som överstiger de uppsatta gränsvärdena.

Nya användningsområden inom elektronik och teknologi har gjort att efterfrågan under 2000-talet av tidigare inte använda metaller ökat dramatiskt. Hittills täcks Europas behov genom import, men mineralstrategiskt måste europeiska unionen (EU) säkra egna tillgångar på råvaror. Under ledning av EU-kommissionen har en arbetsgrupp, *Raw Materials Supply Group, Defining Critical Raw Materials*, identifierat metaller (metallgrupper) och råvaror som särskilt viktiga. EUs kritiska lista omfattade år 2010 antimon, beryllium, kobolt, flusspat, gallium, germanium, grafit, indium, magnesium, niob, tantal, platinagruppens metaller, sällsynta jordartsmetaller och wolfram. En uppdaterad lista 2014 saknar tantal, men borater, fosfat, kisel, koks, krom och magnesit har tillkommit. Flertalet av dessa finns i den svenska berggrunden.

För Sveriges del baseras geokemiska databaser och kartor huvudsakligen på elementens förekomst och spridning i den morän som täcker 75 % av landet och som vanligtvis inte är påverkad antropogent eller av omfattande vittringsprocesser på det djup moränproven tas.

Noggrannhet vid provtagning, provberedning och analysering är nödvändig för att bygga upp de högkvalitativa databaser en kartläggning syftar till. Moderna analysmetoder med multielementteknik har möjliggjort att ett stort antal element kan bestämmas samtidigt. Över 50 element kan tillförlitligt analyseras med både röntgenfluorescenspektrometer (XRF) och med induktivt kopplad plasmasspektrometri (ICP-MS), vilket har sänkt kostnaderna radikalt för geokemisk kartläggning. Varje analysprogram kräver dock ett omfattande kvalitetsarbete för att undvika feltolkning av analysresultatet och för att ange hur data bör användas (Lax & Selinus 2005).

Huvudmålet för geokemisk kartläggning vid SGU har under drygt 30 år varit att med kontinuerlig provtagning ta fram analysdata av hög kvalitet. Två typer av provmedia har använts för detta ändamål (fig. 1). Den biogeokemiska metoden utvecklades från att samla in inhomogent, dött växtmaterial (bäcktorv) från bäck- och dikeskanter till att provta levande rötter och vattenmossa från strömmande små vattendrag. Den andra provtypen är morän och i mindre omfattning andra sediment. Provtätheten för båda provtyperna är 1 prov per 7 km<sup>2</sup> och båda typerna har analyserats med flera analysmetoder för att optimera antalet element. Den biogeokemiska databasen består av analyser av bäckvattenväxter insamlade under perioden 1982–2006 från 38 000 vattendrag. Med nuvarande karteringsmetodik har insamling av morän gjorts från mer än 40 000 lokaler. Införandet av förbättrade analysmetoder under åren har dock medfört olika yttäckning per analysmetod i de provtagna områdena.

mental safeguarding. The Swedish Environmental Protection Agency (EPA) has, so far, set benchmark values e.g. for drinking water, surface water, sludge, soil, lake sediments and dust. When it comes to soil, so far there are benchmark values for antimony, arsenic, barium, lead, cadmium, cobalt, copper, chromium, mercury, molybdenum, nickel, vanadium, zinc and several organic pollutants (Naturvårdsverket 2009). However, the natural background levels of elements are not homogeneous but vary depending on the character of the bedrock and the composition of the soil matter that overlies the bedrock. The geochemical maps reveal large regional differences in element distribution patterns, locally with naturally high metal concentrations above the established limiting values.

During the 2000s, the rapid development in electronics and technology has dramatically increased the market for previously overlooked metals. So far, the demand in Europe has been covered through import, but for a sustainable future the European Union (EU) must rely on sources within the European economic area. The European Commission leads the working group *Raw Materials Supply Group, Defining Critical Raw Materials*, which has identified metals (metal groups) and raw materials of major importance. In 2010, this, so-called, critical list comprised antimony, beryllium, cobalt, fluor spar, gallium, germanium, graphite, indium, magnesium, niobium, tantalum, platinum group elements, rare earth elements and tungsten. An updated list 2014 lacks tantalum, but borates, phosphate, silicon (rock), coking coal, chromium and magnesite have been added. Many of these are abundant in the Swedish bedrock.

Geochemical databases and maps of Sweden are mainly based on the distribution of elements in till, which covers about 75% of the country and only in rare cases is influenced by anthropogenic impact and extensive weathering processes at the sampling depth.

Accuracy in field sampling, sample preparation and analysis are necessary in order to build the high quality databases that a mapping programme contains. Modern methods that can do multi-element analysis have made it possible to determine the concentrations of many elements simultaneously. More than 50 elements can be consistently analysed both with X-ray fluorescence (XRF) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), which has lowered costs radically within geochemical mapping programmes. However, every analytical programme needs extensive groundwork in order to avoid misinterpretations of the analytical results and to specify how the data can be used (Lax & Selinus 2005).

For more than 30 years, the main goal of the geochemical mapping programme at SGU has been to provide high quality, consistently sampled and analysed data. Two types of sample media have been used for this purpose (Fig. 1). The biogeochemical method developed from sampling of heterogeneous, non-living vegetation (stream peat) from streams and ditches to the sampling of living roots and mosses from small streams. The other sampling medium is till, and to some extent other soils. The sample density for both methods is 1 sample per 7 km<sup>2</sup> and both types have been analysed with several analytical instruments to optimise the number of elements. The biogeochemical database consists of analyses of stream plants sampled between 1982 and 2006 from 38 000 watercourses. Today, till samples are available from more than 40 000 sites. The introduction of improved analytical methods has, however, led to disparate areal coverage per analytical method in the sampled regions.





Foto: Kajsa Bovin

Vid urban geokemisk kartläggning samlas ett flertal provtagningsmedier in. Här provtas ytlig jord på en lekplats i Karlstad. Provtagningstätheten i tätorter är cirka ett prov per kvadratkilometer.

*In urban geochemistry mapping, several media are sampled. Here, a topsoil is collected at a day-care centre in Karlstad. The sample density in cities is about one sample per square kilometre.*

Med början 1999 har SGU genomfört tätortsgeokemiska undersökningar där flera provtagningsmedia använts. Hittills är Göteborg, Västerås, Stockholm, Uppsala, Malmö, Lund, Helsingborg och Karlstad kartlagda med syftet att ge en bild av aktuell metallstatus, inte att spåra föroreningar. Resultaten visar att den naturliga bakgrunden av element påspädda med ett diffust antropogent tillskott varierar mellan städerna vilket möjliggör framtagande av lokala gränsvärden (Lax & Andersson 2011).

Alla oanvända rester av moränproven har sparats omsorgsfullt sedan 1983. Moränprov från denna provbank kombinerat med gles provtagning i tidigare okarterade områden har gett det underlag för analyser som denna geokemiska atlas baseras på. Analyser av 66 element med ICP-MS har gjorts efter lakning av proven med kungsvatten. Detta är en mångsidig metod som ger analysresultat för ett stort antal element. Provtätheten är 1 prov per 150 km<sup>2</sup> över hela landet med undantag av några mindre områden i fjällkedjan som saknar både morän och vägar. Generellt är avståndet mellan proven 12,5 km vilket gör att detaljeringsgraden för kartorna är anpassad för en småskalig presentation av elementens spridningsmönster.

Urban geochemical mapping started at SGU at the beginning of 1999 and several sample media have been used. So far, Göteborg, Västerås, Stockholm, Uppsala, Malmö, Lund, Helsingborg and Karlstad have been surveyed to define the metal status of these towns rather than to trace pollutants. The results show that the natural background of elements influenced by diffuse anthropogenic impact varies between the towns, and results can be used to define local limiting values (Lax & Andersson 2011).

Starting in 1983, all unused leftovers from all samples of the modern geochemical mapping programme have been carefully stored. Till samples from this collection, together with low-density sampling from previously non-sampled areas, have been used as the base for this geochemical atlas. 66 elements were analysed by ICP-MS after preparation by aqua regia digestion. This all-round method gives analytical results for a large number of elements. The sample density is 1 sample per 150 km<sup>2</sup> applied to the entire country, with exceptions of minor areas of the Caledonian mountain chain that lack both till and accessibility. Generally, the distance between samples is 12,5 km, which provides a precision adapted to small-scale presentation of the element distribution patterns.

## GEOLOGI

Jordklotet, vårt planetsystem och solen anses ha bildats samtidigt i utkanten av galaxen Vintergatan för 4,6 miljarder ( $10^9$ ) år sedan (Grotzinger & Jordan 2010). Det är så långt tillbaka geologisk aktivitet kan spåras med hjälp av datering med radioaktiva isotoper av de äldsta meteoriter och bergarter som hittats på jorden.

Tiden från bildningen av jordklotet delas in i tre eoner: arkeikum (för 4,6 till 2,5 miljarder år sedan), proterozoikum (för 2,5 miljarder till 541 miljoner år sedan) och fanerozoikum (för 541 miljoner år sedan till nutid), se figur 2.

Sett ur ett geologiskt perspektiv är den kvartära perioden, som inleddes för ca 2,6 miljoner år sedan, mycket kort. Ett varierande klimat under denna period ledde till att glaciärer bildades och att de smälte bort. Varje gång omformades landets relief genom erosion av landytan och avsättning av material.

Det landskap vi känner idag har i stort sett fått sin karaktär under de senaste ca 117 000 åren, som utgör Weichselistiden. De glaciala avlagringar som fanns kvar när den sista isen smälte bort för ungefär 10 000 år sedan är bland annat den morän som utgör grunden för denna atlas.

### Berggrunden

Sveriges berggrund består av några av Europas äldsta bergarter (fig. 3). Berggrunden kan indelas i stora litotektoniska enheter (Stephens m.fl. 1997, Bergman m.fl. 2012) som består av bergarter med en särpräglad tektonisk historia och geokemisk karaktär. Huvuddelen av berggrunden tillhör den fennoskandiska skölden, som består av den svekokarelska orogenen inkluderande arkeiska bergarter i landets norra del, post-svekokarelska magmatiska och sedimentära provinser som inte påverkats av orogen aktivitet, Blekinge-Bornholmsorogenen i den sydöstra delen, samt den svekonorvegiska orogenen i den sydvästra delen av landet. De återstående enheterna är den kaledoniska orogenen och bergarter i det sedimentära täcket, diabas och basalt, som vilar på den fennoskandiska skölden (fig. 3).

De äldsta arkeiska bergarterna finns enbart i norra Sverige och består av 3,2–2,6 miljarder år gammal tonalit–trondhjemit–granodioritgnejs, granitoid, diorit, paragnejs och metavulkaniska bergarter. De flesta av dessa bergarter påverkades av en metamorf händelse för ca 2,7–2,6 miljarder år sedan, och de blev senare deformerade och metamorfoserade ytterligare en gång under den svekokarelska orogenesen. De sydligaste områdena där dessa bergarter går i dagen är mellan Luleå och Piteå, nära Boden samt norr om Jokkmokk.

Huvuddelen av Sveriges berggrund består av bergarter som bildades längs en aktiv kontinentkant i samband med subduktionsprocesser under den svekokarelska orogenesen (2,0–1,8 miljarder år sedan). Detta orogena system påverkade även äldre, 2,4–2,0 miljarder år gamla sedimentära och magmatiska bergarter som avsattes i riftbassänger på den arkeiska kontinenten. Den svekokarelska orogenen utmärks av stora batoliter, huvudsakligen sura vulkaniska bergarter och klastiska sedimentära bergarter. Alla dessa bergarter blev i varierande grad metamorfoserade under lågt tryck upp till amfibolit- och granulitfacies, delvis med migmatitbildning. De 1,9 miljarder år gamla bergarterna i den svekokarelska orogenen innehåller några av Europas viktigaste mineralförekomster och nästan alla aktiva gruvor, till exempel järnoxidmalmen i Kiruna i Norrbotten och Dannemora

## GEOLOGY

The solar system with the Sun, the Earth and other planets was formed at the periphery of the Milky Way Galaxy 4,6 billion ( $10^9$ ) years ago (Grotzinger & Jordan 2010). This formation event can be traced with the help of isotopic dating of the oldest meteorites and rocks found on the Earth.

Starting with the Earth's formation, the time scale is divided into three eons: Archean (4,6 to 2,5 billion years ago), Proterozoic (2,5 billion to 541 million years ago) and Phanerozoic (541 million years ago until present), see Figure 2.

From a geological perspective, the Quaternary period, which began about 2,6 million years ago, is very short. Climate variations during this period led to the multiple formations of ice sheets and their later retreat. Within every glacial cycle, the Earth's surface was deeply eroded and covered by sequences of deposits, resulting in a modified relief.

The landscape we know today has largely acquired its character during the last c. 117 000 years, which is the Weichselian glacial interval. Till represents the major type of glacial deposits that remain after the ice melted c. 10 000 years ago and constitutes the base sample type for this atlas.

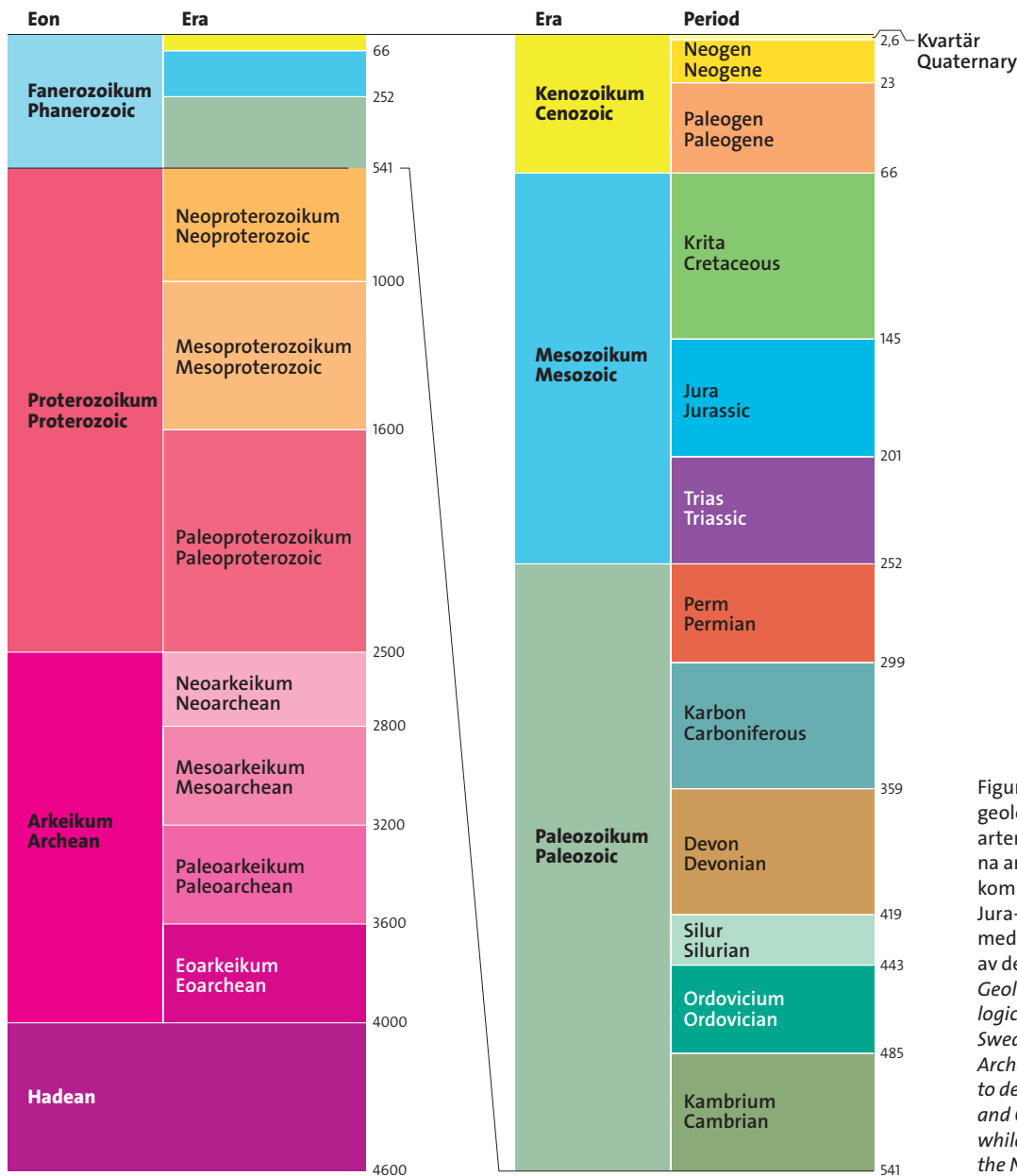
### Bedrock

The bedrock in Sweden includes some of the oldest rocks in Europe (Fig. 3). The Swedish bedrock can be divided into major lithotectonic units (Stephens et al. 1997, Bergman et al. 2012), many of which contain rocks with a distinct tectonothermal history and geochemical character. Most of the bedrock in Sweden belongs to the Fennoscandian Shield, which consists of the Svecokarelian orogen including Archean rocks in the northern part of the country, post-Svecokarelian magmatic and sedimentary provinces unaffected by orogenic activity, the Blekinge-Bornholm orogen in south-easternmost Sweden, and the Sveconorwegian orogen in the south-western part of the country. The remaining units include the Caledonian orogen and sedimentary cover rocks, dolerite and basalt, resting on the Fennoscandian Shield (Fig. 3).

The oldest Archean rocks occur exclusively in northern Sweden and are composed of 3,2–2,6 billion years old tonalit–trondhjemit–granodiorite gneiss, granitoid, diorite, paragneiss and metavolcanic rocks. Most of these units resulted from a metamorphic event at 2,7–2,6 billion years ago, and were subsequently deformed and metamorphosed again during the Svecokarelian orogeny. The southernmost outcrops of Archean rocks occur between Luleå and Piteå, near Boden, and north of Jokkmokk.

Most of the Swedish bedrock is composed of rocks that formed along an active continental margin related to subduction processes during the Svecokarelian orogeny (2,0–1,8 billion years ago). This orogenic system also affected older, 2,4–2,0 billion years, sedimentary and igneous rocks that were deposited in rift basins on the Archean continent. Characteristic features of the Svecokarelian orogen are the presence of large batholiths, predominantly acid volcanic rocks and siliciclastic sedimentary rocks. All these rocks were variably metamorphosed under low pressure conditions and with metamorphic grades reaching amphibolite to granulite facies, partly with migmatization. The 1,9 billion years old rocks within the Svecokarelian orogen host some of the most important mineral deposits in Europe and the most active mines. Some examples are the iron oxide deposits at Kiruna in Norrbotten and at Dannemora in Bergslagen, and the





Figur 2. Geologisk tidsskala med åldrar för de större geologiska perioderna i miljoner år. De flesta bergarter i Sverige bildades under prekambrium (eoner-na arkeikum och proteroziikum). Därefter började komplexa livsformer utvecklas under ordovicium. Jura- och krita-perioderna blev dinosauriernas tid, medan hominider började uppträda först mot slutet av den neogena perioden.  
*Geological time scale with ages of the main geological time periods in million years. Most rocks in Sweden formed during the Precambrian (the eons Archean and Proterozoic). Then complex life began to develop during the Ordovician period. The Jurassic and Cretaceous periods were the time of dinosaurs, while hominids began to appear towards the end of the Neogene period.*

i Bergslagen, och de polymetalliska basmetallsulfidmalmerna i Skelleftefältet och Bergslagen.

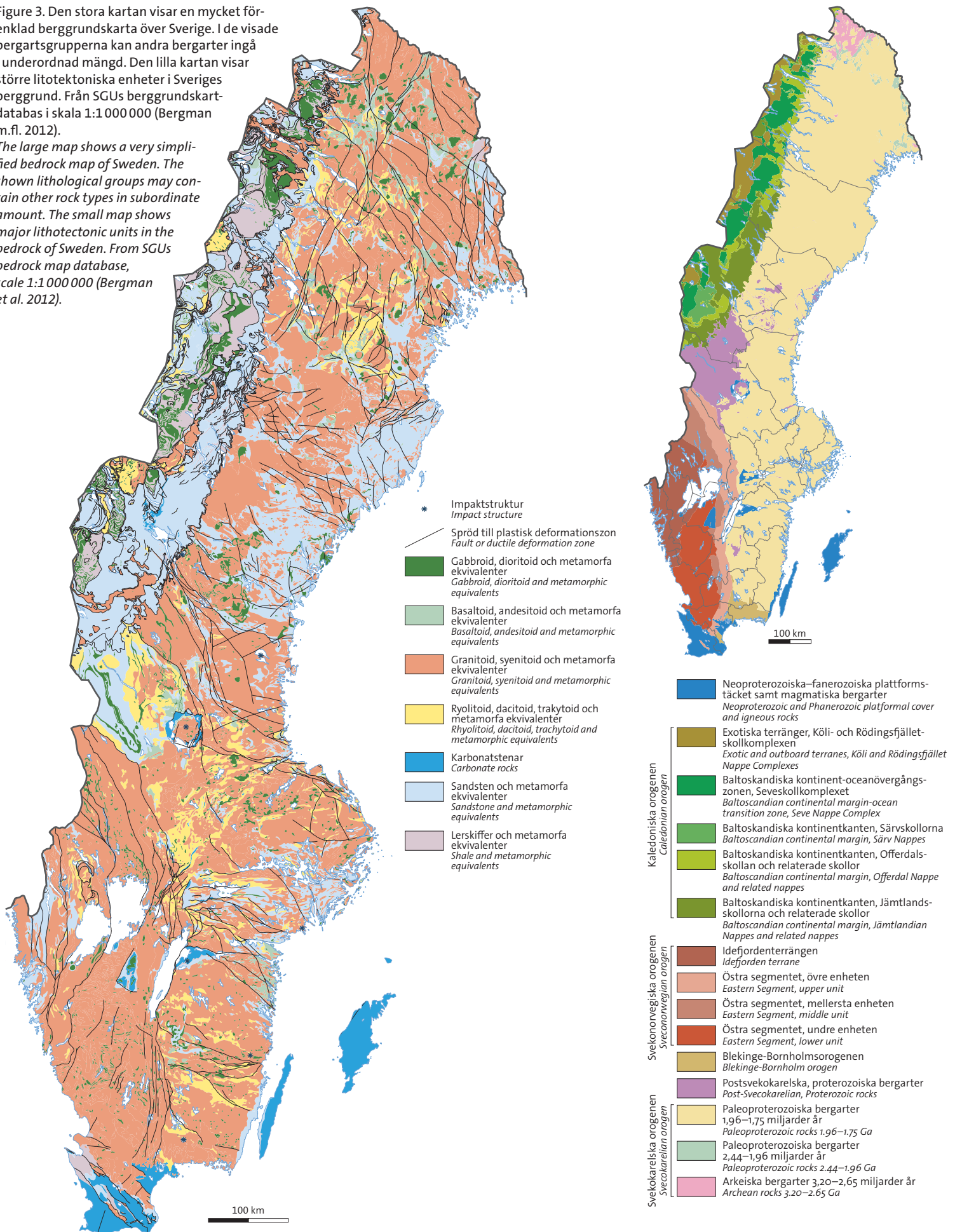
En större grupp av senpaleoproterozoiska magmatiska bergarter (det transskandinaviska magmatiska bältet) bildades under (för ca 1,87–1,84 och 1,8 miljarder år sedan) och efter (för ca 1,7 miljarder år sedan) den svekokarelska orogensen. De förekommer från sydligaste Sverige och norrut, in under den kaledoniska orogensen och upp till norra Norges kustområden. Bergarterna utgörs av gabbro, monzodiorit, syenitoid och granit och associerade vulkaniska bergarter. Den postsvekokarelska utvecklingen fortsatte med intrusion av mesoproterozoisk gabbro och rapakivigranit (ca 1,6–1,5 miljarder år sedan), avsättning av sandsten med inlagring av basalt (ca 1,5–1,4 miljarder år sedan) och intrusion av diabas som gångar och lagergångar (1,27–1,25 miljarder år sedan). Dessa bergarter utgör en volymmässigt underordnad men viktig komponent i centrala Sverige.

polymetallic base-metal sulphide deposits in the Skellefte district and in Bergslagen.

A major group of late Paleoproterozoic magmatic rocks (Transscandinavian Igneous Belt) formed during (c. 1,87–1,84 and 1,80 billion years ago) and after (1,7 billion years ago) the Sveco-Karelian orogeny. They extend from southernmost Sweden and northwards, beneath the Caledonian orogenic belt and up to the coastal regions in northern Norway. The rock types consist of gabbro, monzodiorite, syenitoid and granite, and associated volcanic rocks. The post-Sveco-Karelian evolution continued with the intrusion of Mesoproterozoic gabbro and rapakivi granite (at 1,6–1,5 billion years ago), deposition of sandstone with basalt intercalation (at 1,5–1,4 billion years ago) and the intrusion of dolerite dykes and sills (at 1,27–1,25 billion years ago). These rocks form a subordinate but important component in the central part of Sweden.

Figure 3. Den stora kartan visar en mycket förenklad berggrundskarta över Sverige. I de visade bergartsgrupperna kan andra bergarter ingå i underordnad mängd. Den lilla kartan visar större litotektoniska enheter i Sveriges berggrund. Från SGUs berggrundskartdatabas i skala 1:1 000 000 (Bergman m.fl. 2012).

The large map shows a very simplified bedrock map of Sweden. The shown lithological groups may contain other rock types in subordinate amount. The small map shows major lithotectonic units in the bedrock of Sweden. From SGUs bedrock map database, scale 1:1 000 000 (Bergman et al. 2012).





Blekinge-Bornholmorogenen i den sydöstra delen av den fennoskandiska skölden består av sedimentära, vulkaniska och intrusiva, 1,8–1,7 miljarder år gamla bergarter. De påverkades av plastisk deformation, medel- till höggradig metamorfos och magmatisk aktivitet under den danopoloniska orogenesen för 1,5–1,4 miljarder år sedan.

Den svekonorvegiska orogenen dominerar den sydvästra delen av den fennoskandiska skölden och kan indelas i flera nord–sydliga segment som begränsas av plastiska deformationszoner, till exempel den så kallade Mylonitzonen mellan Östra segmentet och Idefjordenterrängen. Orogenen består huvudsakligen av intrusiva, sedimentära och vulkaniska bergarter som bildats under tidigare orogena händelser: de svekokarelska, gotiska (1,6–1,5 miljarder år sedan) och hallandiska-danopoloniska (1,5–1,4 miljarder år sedan) orogenerna. Även intrusiva och övervägande klastiska sedimentära bergarter, som bildades för 1,3 miljarder år sedan eller senare, ingår. Alla dessa berggrundsenheter genomgick deformation och metamorfos för ca 1,1 miljarder år sedan i samband med kontinental subduktion och kontinent–kontinentkollision. Detta skedde vid höga tryck under amfibolit- och granulitfacies, lokalt med bildning av eklogit. Den senorogena fasen utmärks av intrusion av gabbro, granit och pegmatit och flera generationer av diabas (0,98–0,95 miljarder år gamla), samt avsättning av sandsten.

I nordvästra Sverige utgör den kaledoniska orogenen ett ca 1 000 km långt bälte som bildades under tidig- till medelpaleozoisk tid (kambrium till devon) när en gammal ocean (Iapetus) mellan kontinenterna Baltica (Skandinavien) och Laurentia (Nordamerika och Grönland) försvann och kontinenterna slutligen kolliderade. Den kaledoniska orogenen består huvudsakligen av neoproterozoiska till siluriska sedimentära, vulkaniska och intrusiva bergarter som bildades längs Balticas kontinentkant och i Iapetusocenen. Dessa enheter sköts, tillsammans med skivor av underlaget, ca 300 km mot öster upp på den fennoskandiska skölden i ett flertal stora överskjutningsskollor. Metamorfosen i skollorna varierar från grönskiffer- till amfibolitfacies och lokalt upp till högtrycksgranulit- och eklogitfacies.

Neoproterozoiska och tidigpaleozoiska bergarter utanför den kaledoniska orogenen finns i centrala och södra Sverige. Neoproterozoiska bergarter påträffas nära Sundsvall (det intrusiva, alkaliska och karbonatitiska Alnökomplexet) och nära Vättern (sandsten, lerskiffer, dolomit och konglomerat i Visingsögruppen). Huvuddelen av de paleozoiska enheterna är rester av kambrosiluriska plattformsavlagringar (540–420 miljoner år gammal sandsten, lerskiffer och kalksten) som tidigare täckte stora delar av centrala och norra Europa. Dessa sedimentära bergarter finns i centrala Sverige nära Östersund och runt Siljan, och i södra Sverige vid Billingen–Kinnekulle, i Skåne och på Gotland och Öland.

Sveriges yngsta berggrund finns bevarad i landets södra del där permisk, riftrelaterad magmatisk aktivitet följdes av mesozoisk och kenozoisk nedsänkning, avsättning av sandsten, lerskiffer och kalksten samt lokalt basaltisk vulkanism.

## DEN KVARTÄRA PERIODEN

Under kvartärtiden, som inleddes för ca 2,6 miljoner år sedan, har området som idag utgör Sverige utsatts för flera glaciationer, speciellt under de senaste en miljon åren. Under kvartärtidens kallperioder utvecklades inlandsisar över hela eller delar av Sverige. Dessa glaciationer avbröts temporärt av interstadialer (tillfälliga varmperioder

The Blekinge-Bornholm orogen, located in the south-easternmost part of the Fennoscandian Shield, consists of sedimentary, volcanic and intrusive rocks that are 1,8–1,7 billion years old. They were affected by ductile deformation, medium- to high-grade metamorphism and igneous activity during an orogenic event at 1,5–1,4 billion years ago (Danopolonian).

The Sveconorwegian orogen dominates in the south-western part of the Fennoscandian Shield and can be divided into several north–south trending segments, which are separated by ductile deformation zones, including the so-called Mylonite Zone which separates the Eastern Segment from the Idefjorden terrane. The orogen consists predominantly of intrusive, sedimentary and volcanic rocks formed during older orogenic events, i.e. the Svekokarelian, Gothian (1,6–1,5 billion years old) and Hallandian-Danopolonian (1,5–1,4 billion years old) orogenies. Intrusive and predominantly siliciclastic sedimentary rocks, which formed 1,3 billion years ago or later, are also present. All these rock units were deformed and metamorphosed c. 1,0 billion years ago in connection with continental subduction and continent–continent collision. High pressure conditions prevailed, with the metamorphic grade reaching amphibolite and granulite facies conditions, and with the formation locally of eclogite. The late orogenic phase is characterised by the intrusion of gabbro, granite and pegmatite and several generations of dolerite (at 0,98–0,95 billion years ago) and the deposition of sandstone.

In north-western Sweden, the Caledonian orogen extends in the form of a c. 1 000 km long belt, which was formed during the early to mid Paleozoic (Cambrian to Devonian), when the old Iapetus ocean, separating the old continents Baltica (Scandinavia) and Laurentia (North America and Greenland), disappeared and the continents ultimately collided. The Caledonian orogen is mainly composed of Neoproterozoic to Silurian sedimentary, volcanic and intrusive rocks, which were deposited along the continental margin of Baltica and in the Iapetus ocean. These units, together with slices of older basement, were thrust c. 300 km eastwards onto the Fennoscandian Shield in several large thrust sheets. The metamorphic grade within the Caledonian thrust sheets varies from greenschist to amphibolite facies, and locally to high pressure granulite and eclogite facies.

Neoproterozoic and Early Paleozoic rocks outside the Caledonian orogen occur in central and southern Sweden. Neoproterozoic rocks outcrop near Sundsvall (the Alnö carbonatite complex) and close to Vättern (sandstone, shale, dolomite and conglomerate of the Visingsö Group). The majority of Paleozoic rocks are remnants of the Cambro-Silurian platformal deposits (540–420 million years old sandstone, shale and limestone) that once covered large parts of central and northern Europe. These sedimentary rocks occur in central Sweden near Östersund and around Siljan, and in southern Sweden at Billingen–Kinnekulle, Skåne and on Gotland and Öland.

The youngest bedrock in Sweden is preserved in the southern part of the country where Permian rift-related magmatic activity was followed by Mesozoic and Cenozoic subsidence, deposition of sandstone, shale and limestone, and locally by basaltic volcanism.

## THE QUATERNARY PERIOD

During much of the Quaternary period, which started about 2,6 million years ago, Sweden was subjected to cycles of glaciations of varying magnitudes. This was especially pronounced during the last 1 million years. During the cold intervals of the Quaternary period, ice sheets

under en glacial) samt separerades av interglacialer (mellanistider). Under interglacialerna och i isfria områden under interstadialerna var temperaturerna tillräckligt höga för att vegetation skulle finnas i Sverige. Eftersom varje glaciation helt eller delvis förstör spår efter äldre glaciationer finns relativt få spår efter kvartära glaciationer kvar på land. Däremot kan cykliska klimatvariationer bestämmas i marina sediment och deras geokemiska signatur (Shackleton & Opdyke 1976).

I Sverige finns spår efter den senaste glaciationen, Weichsel, bevarade på land. Weichsel kan generellt separeras i tre stadialer (perioder med större inlandsisar) med interstadialer (med mindre inlandsisar) emellan. Under tidig Weichsel (för ca 117 000–105 000 år sedan) blev klimatet kallare och en inlandsis växte fram från fjällkedjan mellan Sverige och Norge och expanderade senare mot Östersjön (Lundqvist 2004). Spår efter denna tidiga inlandsis finns i norra Sverige där de flesta glacialt eroderade landformerna visar en isrörelseriktning från nordväst mot sydöst (Lagerbäck & Robertsson 1988). Inlandsisens omfattning i söder vet man mindre om, men troligtvis sträckte sig inlandsisen till de centrala delarna av Sverige (Lundquist 1992, Kleman m.fl. 1997).

Den tidiga Weichselstadialen följdes av Brörupinterstadialen (också kallad Peräpohjolainterstadialen). Under detta skede drog sig isranden tillbaka till fjällkedjan och avsatte istransporterade avlagringar i form av morän längs kanterna. Dessa moräner markerar föregående gränser för inlandsisen. Mest välkänd är veikimoränen i norra Sverige (Lagerbäck 1988a).

Under den andra Weichselstadialen (för ca 93 000–85 000 år sedan) växte istäcket åter fram från fjällkedjan. Utbredningen av inlandsisen är osäker men den uppskattas från att endast ha täckt fjällkedjan och dess närområden (Kleman m.fl. 1997) till att ha täckt hela norra delen av Sverige ner till Stockholmstrakten. Den vidsträckta förekomsten av flera distinkt skilda moränbäddar i stratigrafin visar att den andra Weichselisen hade en betydande utbredning i centrala Sverige (Lundqvist 1992, Robertsson m.fl. 2005). Trots detta är landformer från den tidigare Weichselisen i stort sett opåverkade av detta andra istäcke. Den nästan totala avsaknaden av erosion har tolkats som att denna senare inlandsis var kallbaserad och frusen till sitt underlag (Lagerbäck & Robertsson 1988).

Odderadeinterstadialen (också kallad Tarendöinterstadialen) följde på den andra Weichselstadialen. Även om istäcket drog sig tillbaka till bergskedjan var klimatet fortfarande relativt kallt. Bevarade periglaciala formationer, som sandfyllda iskilar, bekräftar de kalla förhållandena i norra Sverige (Lagerbäck 1988b).

Under den tredje och sista Weichselstadialen bredde inlandsisen ut sig över norra Europa (för ca 70 000–13 000 år sedan) med sin största utbredning under hela Weichsel (fig. 4). Vid sitt maximum för ca 20 000 år sedan täckte isen hela Norge, Sverige och Finland och sträckte sig söderut till kontinental Europa och österut in i Ryssland. I tillväxtfasen och under den maximala utbredningen var en stor del av ismassan kallbaserad och icke-eroderande, och landformer från tidigare Weichselstadialer bevarades nästan fullständigt i norra Sverige. Bottenfrusen is sträckte sig så långt söderut som 60,5° (Hättestrand 1997), men med färre bevarade äldre landformer på grund av de tempererade förhållandena under deglaciationen med erosiv bottenmältande is. Kanske är det de begränsade effekterna av bottenfrusen is som gör att det fortfarande pågår diskussioner huru-

utvecklades över delar eller alla av Sverige. Dessa glaciala intervaller blev avbrutna av interstadialer, korta perioder av relativt varmt klimat inom en glaciation, och separerades av interglacialer. Temperaturerna var höga nog under interglacialerna för att vegetation skulle finnas även i isfria områden under interstadialerna. På grund av att varje glaciation förstör spår efter tidigare glaciationer, finns lite bevis för tidigare glaciationer på land. Trots detta kan den cykliska klimatmönstret bestämmas från marina sediment och deras geochemiska signatur (Shackleton & Opdyke 1976).

Records of the most recent glacial interval, the Weichselian, have been preserved on land in Sweden. During the Weichselian, there were three periods of extensive ice sheets (stadials) separated by less extensive ice sheets during interstadials. During the early Weichselian (c. 117 000–105 000 years ago), the climate cooled and an ice sheet developed over the Swedish and Norwegian mountains and expanded towards the Baltic Sea (Lundqvist 2004). Evidence of this early Weichselian ice sheet is found in northern Sweden where most of the glacially moulded landforms show a preferred orientation from north-west to south-east, the direction of early Weichselian ice flow (Lagerbäck & Robertsson 1988). The southern extent of the early Weichselian ice sheet is less well known, but is believed to have extended to somewhere in central Sweden (Lundquist 1992, Kleman et al. 1997).

The early Weichselian stadial was followed by the Brörup interstadial (also called the Peräpohjola interstadial). During this interval, the margin of the ice sheet retreated towards the mountains and the ice sheet deposited moraines, piles of glacially transported debris, along its margin. These moraines mark the former limit of the ice sheet; the best known is the Veiki moraine in northern Sweden (Lagerbäck 1988a).

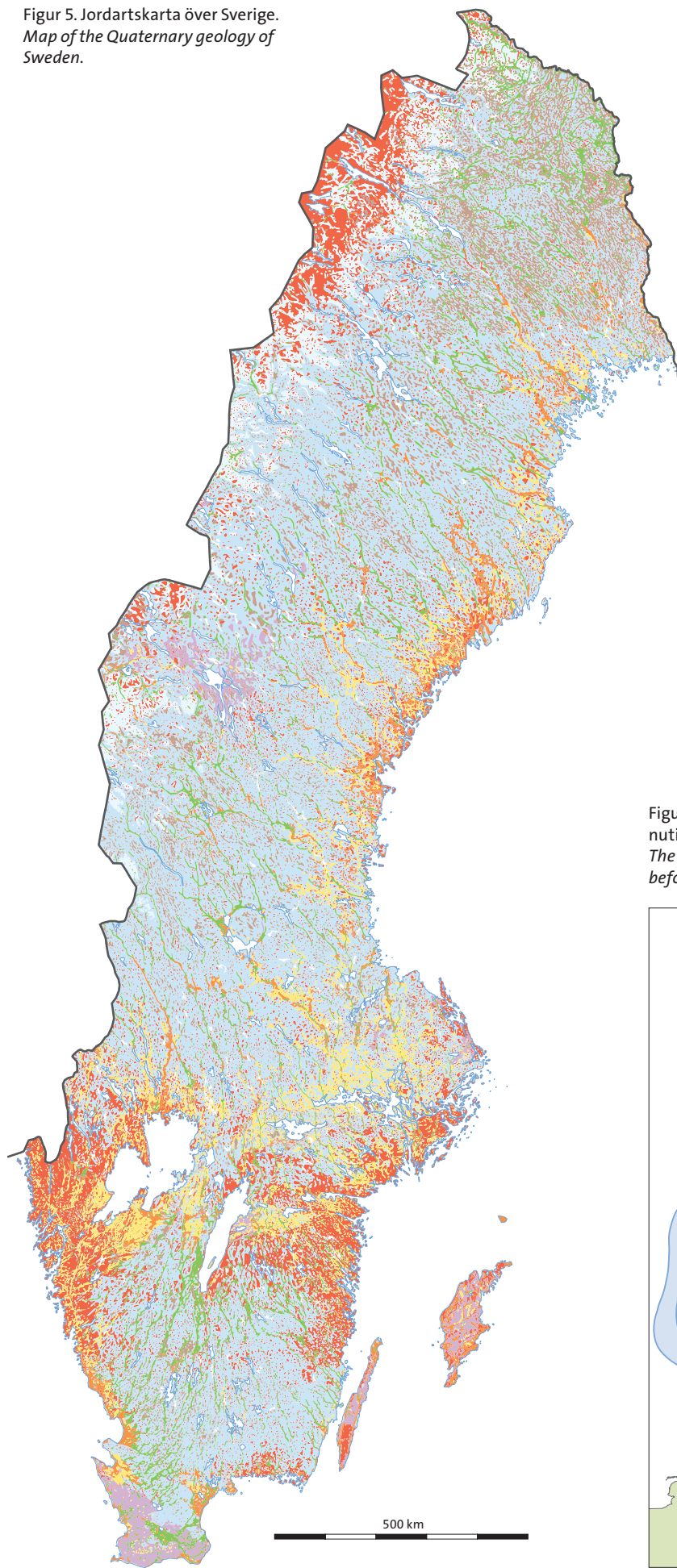
During the second Weichselian stadial (c. 93 000–85 000 years ago), an ice sheet again expanded from the mountains. The extent of this ice sheet is largely unknown, with estimates ranging from as small as only covering the mountains and near-mountain areas (Kleman et al. 1997) to as large as covering all of northern Sweden and extending as far south as Stockholm. The widespread presence of several distinct till beds in the stratigraphy shows that the second Weichselian ice advance covered extensive areas in central Sweden (Lundqvist 1992, Robertsson et al. 2005). Regardless, the landforms from the earlier Weichselian stadial were largely unaffected by the second ice sheet. This near absence of erosion suggests that the latter ice sheet was cold-based and frozen to its bed (Lagerbäck & Robertsson 1988).

The Odderade interstadial (also called the Tarendö interstadial), followed the second Weichselian stadial. Although the ice sheet retreated again into the mountains, the climate remained relatively cold. The presence of preserved periglacial features, such as sand-filled ice wedges, attests to these cold conditions in northern Sweden (Lagerbäck 1988b).

The ice sheet that spread across northern Europe during the third and final Weichselian stadial (c. 70 000–13 000 years ago) was the most extensive (Fig. 4). At its maximum about 20 000 years ago, this ice sheet covered all of Norway, Sweden and Finland, and extended south into continental Europe and east into Russia. During the advance and maximum extent phases, much of the ice sheet was cold-based and non-erosive. Thus, it left behind nearly perfectly preserved landforms from previous Weichselian stadials in northern Sweden. Cold-based ice extended as far south as 60,5° (Hättestrand 1997), but preservation appears to be more limited this far south due to the erosive, wet-based glacial conditions that prevailed during deglaciation.

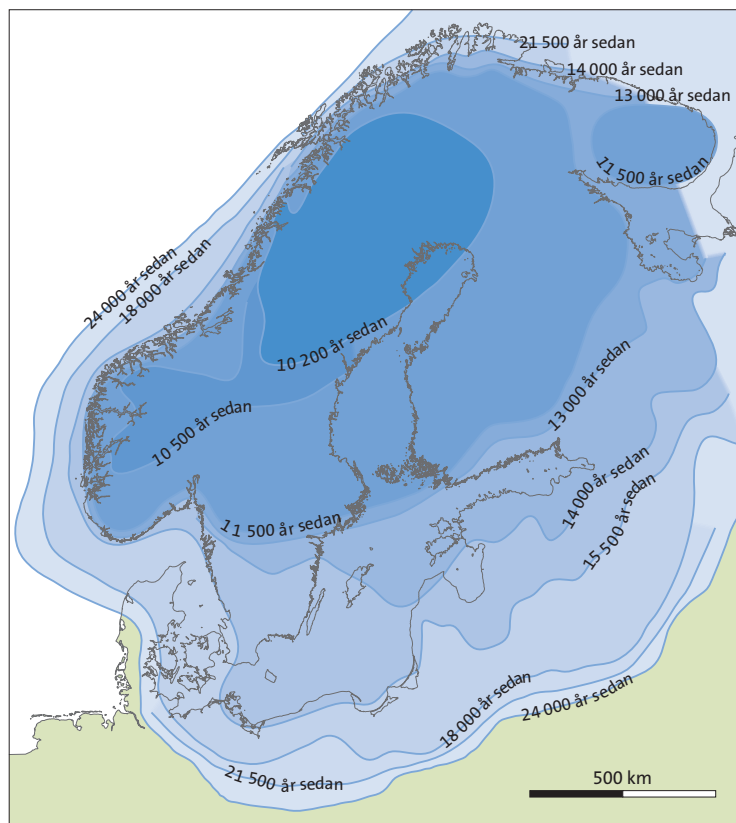


Figur 5. Jordartskarta över Sverige.  
Map of the Quaternary geology of Sweden.



- Torv  
Peat
- Lera-silt  
Clay-silt
- Sand, grus  
Sand, gravel
- Isålvssediment  
Glaciofluvial sediment
- Moränlera eller lerig morän  
Clay till or clayey till
- Morän  
Till
- Morän eller vittringsjord  
Till or weathered surface layer
- Berg  
Rock
- Glaciär  
Glacier

Figur 4. Maximal utbredning av tredje Weichselisen. Tidsangivelsena från nutid markerar det krympande istäcket under avsmältningen.  
The maximum extent of the third Weichselian ice sheet. The specified times before present indicate the retreating ice.



vida denna period avbröts av en interstadial (Wohlfarth m.fl. 2011) eller inte (Lundqvist 2004).

Då klimatet blev varmare började istäcket retirera. Under reträtten ändrades den basala isen på de flesta ställen från att vara bottenfrusen och icke-eroderande till att vara bottenmältande och eroderande. Det är alltså från reträttstadiet som spåren av den sista Weichselisen är bäst bevarade i stratigrafiska lagerföljder och morfologiska formelement.

Deglaciationen i Sverige började i Skåne, längst i söder, för ca 15 000 år sedan (Lundqvist & Wohlfarth 2001) och de sista fragmenten av inlandsisen försvann i Sarekregionen i norr (Kleman 1992). Det är fortfarande oklart när det allra sista av istäcket försvann från inlandet och norra Sverige, men det måste ha varit senare än för ca 10 500 år sedan då isen försvann från kustnära områden (Lindén m.fl. 2006).

Sediment som deponerades under deglaciationen kan indelas i tre grupper: morän, glaciofluviala grovkorniga sediment och glaciala finkorniga sediment. Morän, som strukturmässigt utgörs av partikelstorlekar från lera till block, deponerades över stora områden av en tempererad inlandsis. Det mesta av Sveriges yta täcks av morän (fig. 5) som dock lokalt överlagras av yngre sediment. Glaciofluviala sediment (sand, grus och sten) deponerades antingen under eller framför glaciärkanten av smältvattenströmmar. Även dessa sediment associeras endast med tempererade istäcken och finns ofta som linjära avlagringar i dalgångar. Finkorniga sediment (silt och lera) avsattes i större områden som täckts av uppdämda issjöar eller i låglandsområden där istäckets vikt pressat ned jordskorpan under havsnivån. Dessa sediment är mycket vanliga i södra och östra Sverige.

De två första sedimentgrupperna associeras med distinkta landformer, t.ex. moränryggar, som ofta markerar tidigare israndlägen. Under tempererade istäcken kunde moränen deformeras och bilda drumlinoida former, vilket är moränryggar utsträckta i isrörelseriktningen. Glaciofluviala sediment som deponerats i strömmande vatten under isen bildade vindlande ryggar, s.k. rullstensåsar. Där åsarna mynnade ut från glaciärkanterna kunde deltaområden bildas i stagnanta vattensamlingar. Dessa olika landformer kan, tillsammans med stratigrafiska lagerföljder, användas för att rekonstruera Sveriges glaciala historia.

## TOPOGRAFI, KLIMAT OCH JORDMÅNER

I Sverige förekommer stora skillnader i höjd, terrängformer, nederbörd och klimat, där de två senare beror av landets långsmala form som sträcker sig 1 572 km från Treriksröset i norr till Smygehuk i söder. Höga berg i väster och slättland i söder samt längs kusterna gör att topografin är varierande. Fjällkedjan i nordväst når höjder upp till ca 2 000 m över havet (m ö.h.) medan den centrala delen av landet karakteriseras av nivåer på 200–800 m ö.h.

Klimatet varierar från subarktiskt i nordligaste delen av Sverige till ett mildare och fuktigare klimat i södra delen. Stora områden på högre altitud i nordväst har alpint tundraklimat. I fjällkedjan utgör de höga bergen en naturlig barriär för nederbörd, även om den västra delen får omfattande regn och snöstormar. Centrala Sverige domineras av ett kallt klimat. I sydväst är klimatet påverkat av Atlantens dominerande västliga och sydvästliga vindar med mycket nederbörd, medan den östra delen har ett kontinentalt klimat med mindre nederbörd.

Under den senaste istiden täcktes landet av enorma istäcken med en maximal tjocklek av 3 000 m. Tyngden av istäcket gjorde att

Perhaps due to the limited effect of cold-based glaciers, there is still debate about whether this period was interrupted by an interstadial (Wohlfarth et al. 2011) or not (Lundqvist 2004).

As climate warmed, the ice sheet began to retreat. As it did so, the basal ice changed in most places from a cold-based, non-erosive ice to a wet-based, erosive ice. It is therefore the retreat phase of the last Weichselian ice sheet that is best preserved in the stratigraphic and geomorphic records of glaciation.

Deglaciation of Sweden started in Skåne in the far south at around 15 000 years ago (Lundqvist & Wohlfarth 2001), and the last remnants of the ice sheet disappeared in the Sarek region of the far north (Kleman 1992). The timing of the final decay of ice from inland areas of northern Sweden is not well constrained, but is known to have occurred more recently than the deglaciation of the coastal areas at about 10 500 years ago (Lindén et al. 2006).

Sediments deposited during deglaciation can be divided into three groups: till, glaciofluvial coarse-grained sediments and glacial fine-grained sediments. Till, which is a composite of grain sizes from clay to boulders, was deposited directly by the ice throughout areas of wet-based ice. Till thus covers most of Sweden, but is locally buried by younger sediments (Fig. 5). Glaciofluvial sand, gravel and cobbles were deposited either beneath or in front of the glacier by meltwater streams. These sediments are also associated only with wet-based conditions and are often found as linear deposits in valleys. Fine-grained sediments (silt and clay) were deposited in broad areas once occupied by ice-dammed lakes and in low-lying areas where the weight of the ice had depressed the crust below sea level following deglaciation. These sediments cover much of southern and eastern Sweden.

The first two sediment groups, till and glaciofluvial sand, gravel and cobbles, can be associated with the presence of distinctive geomorphic landforms. As mentioned previously, moraines, ridges composed of till, often demarcate the past margins of an ice sheet. Additionally, till beneath wet-based ice can be deformed to create drumlinoids, linear ridges that are elongated in the direction of ice flow. Glaciofluvial sediments deposited in streams beneath the ice formed winding ridges known as eskers. When the eskers emerged from beneath the ice, they often formed deltas if they were in contact with a standing body of water. These landforms, in conjunction with the stratigraphy, can be used to reconstruct the history of glaciation and deglaciation in Sweden.

## TOPOGRAPHY, CLIMATE AND SOIL FORMATION

In Sweden there are large differences in elevation, terrain, precipitation and climate, where the latter two are due to the country stretching 1 572 km from Treriksröset in the north to Smygehuk in the south. The topography varies, with mountains in the west and lowlands in the south and along the coasts. The Caledonian mountain range in north-west reaches altitudes of c. 2 000 m above sea level (m a.s.l.). The central part is characterised by altitudes of 200–800 m a.s.l.

The climate varies from subarctic conditions in northernmost Sweden to mild and humid in the south. Large areas at higher altitudes in the north-west exhibit alpine tundra climate. The mountain chain is a natural barrier for precipitation, although heavy rain and snow storms can occur in the western parts of the range. In central Sweden, a cold climate dominates. The climate of the south-west is strongly influenced by the Atlantic ocean with dominating westerly or



landmassan trycktes ner till åtminstone 800 m under dagens landyta. Under isavsmältningen började isostatiska processer att höja upp landet. Denna landhöjning pågår fortfarande och är som störst ca 10 mm per år vid kusten i Ångermanland. Inlandsisen fungerade som en gräns mot det salta havet, vars yta låg lägre än idag. Stora delar av landet låg lägre än havsyttnivån och även lägre än uppdämda issjöar i öster, t.ex. Baltiska issjön. Gränsen till land på högre nivåer dit Östersjön aldrig nått kallas högsta kustlinjen (HK), och är som högst där istäcket pressat ner jordskorpan maximalt. Nivån för HK (fig. 6) varierar därför från ca 289 m ö.h. i Ångermanland till ca 10 m ö.h. i södra Sverige.

När inlandsisen började smälta rann sötvatten från glaciärerna ut mot öster i den sänka som nu utgör Östersjön. En barriär av is förhindrade en förbindelse med Västerhavet ända tills iskantens reträtt nådde norr om Billingen i Västergötland och den uppdämda Baltiska issjön kunde dräneras ut till Nordsjön. Glaciala avlagringar och postglaciala processer är orsaker till utbredda moränområden, formationer av åsar och drumlinor och det stora antalet sjöar som finns över hela landet. Över 92 400 sjöar finns i Sverige och tack vare landhöjningen bildas fortfarande nya sjöar (Sveriges Nationalatlas 1995).

Markytans geomorfologi varierar beroende på den underliggande berggrundens relief och kvartära avlagringars landformer. Fjällkedjans toppar och plåtar har skapats genom erosion där ”mjuka” bergarter nöts bort medan mer motståndskraftiga finns kvar som ryggar. Utanför fjällkedjan utbreder sig långsträckta höjdområden. De finns i stort sett i hela landet ovanför högsta kustlinjen och hit hör exempelvis Sydsvenska höglandet. Vidsträckta slätter med restberg (bergkullar och plåtar) som motstått erosion finns längs ostkusten, i mellansvenska sänkan, och i centrala och södra delen av landet men också i norr. Bergkullterrängen finns i Gästrikland, Hälsingland, Värmland och Västmanland medan plåtar finns i Västergötland och Dalarna. Slättlandet ligger i huvudsak under högsta kustlinjen, men restbergen kan nå upp till 400 m ö.h. Väl utvecklade och breda älvdalar liksom sprickdalar som följer berggrundens strukturer finns över hela landet, från fjälldalarna i nordväst till slätternas kustdalar och Höga kustens sprickdalar. Branter bildade genom erosion finns exempelvis på Öland och Gotland. Förkastningar har också skapat branta sluttningar, exempelvis kliporna vid Höga kusten i Ångermanland, Kullaberget i Skåne och Kilsbergen i västra Närke.

Skilnaderna i Sveriges klimat är avgörande för intensiteten av vittring i landet. Höjdnivåer och klimat är fundamentala parametrar som påverkar vittringen av minerogen och organisk jord och därmed också jordmänsbildningen. Utvecklingen av jordmänsregioner beror på tillgängligt ursprungsmaterial och vegetation, och på processer som mekanisk och kemisk vittring. Jordmänsbildningen når därför aldrig jämvikt utan fortsätter kontinuerligt.

Jord som utvecklats från näringsfattigt glacialt ursprungsmaterial bildar sura podsolprofiler, vilket är den vanligaste jordmånstypen i Sverige. Om ursprungsmaterialet är ler- och näringsrikt bildas en brunjordsprofil (cambisol), speciellt då mafiska mineral och kalk ingår. Cambisol förekommer speciellt i södra Sverige där temperatur (fig. 6A) och nederbörd (fig. 6B) bidrar till en snabbare jordmänsbildning. I tunna jordlager bildas lithosoler, som är svagt utvecklade jordprofiler. Dessa är vanliga i Bohuslän samt i kustnära områden i

south-westerly winds and high annual precipitation, while the eastern part is dominated by a continental climate and less precipitation.

During the most recent glaciation, ice sheets with a maximum thickness of 3 000 m depressed the crust to at least 800 m below the present land surface level. During deglaciation, the crust began to recover to its normal levels. This postglacial isostatic rebound continues today with a maximum uplift of 10 mm per year at the coast of Ångermanland. The ice sheet formed a barrier to the salt water ocean, which had a surface level much lower than it is today. Large parts of the country were situated below the surface level of the ocean or of ice-dammed lakes, such as the Baltic ice lake. The maximum extent of postglacial inundation is delimited by the highest coastline. The level of the highest coastline depends on how far the crust had been depressed. Therefore, the highest coastline (Fig. 6) varies between c. 289 m a.s.l. in Ångermanland and c. 10 m a.s.l. in the south of Sweden.

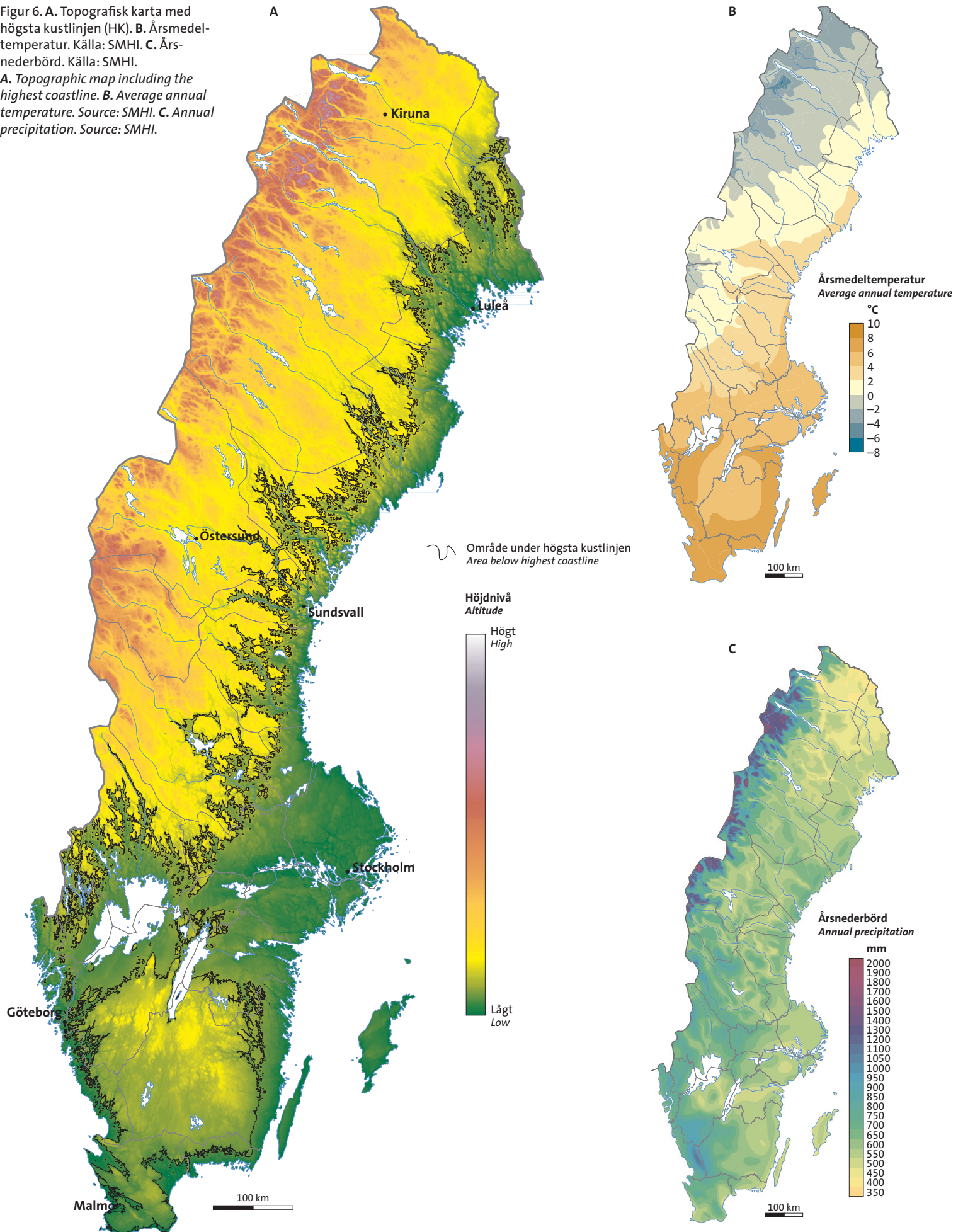
When deglaciation started, meltwater from the glaciers was trapped in an ice-dammed lake in the Baltic basin. As the ice margin retreated to the area north of Billingen in Västergötland, the lake drained westwards into the North Sea. Glacial deposition and the postglacial history are responsible for vast till deposits, landforms such as eskers and drumlins, and the large number of lakes all over the country. There are more than 92 400 lakes in Sweden and new lakes still form because of land uplift (Sveriges Nationalatlas 1995).

The geomorphology of the ground surface varies due to the underlying bedrock relief and landforms of Quaternary deposits. The mountain tops and plateaus were formed through physical and chemical weathering. When “soft rocks” eroded and were removed, more resistant rocks became relict features in the landscape. Above the highest coastline, extensive highlands are widely spread outside the mountainous areas, for example Sydsvenska höglandet. Widespread plains with relict mountains (hills of bedrock that resisted erosion) and plateau mountains are abundant along the eastern coast in the central and southern parts of the country and to some extent in the north. Terrain characterised by undulating bedrock hills is common in Gästrikland, Hälsingland, Värmland and Västmanland, while plateau mountains occur in Västergötland and Dalarna. The plains occur mainly below the highest coastline, but the relict mountains can reach 400 m a.s.l. Well-developed broad river valleys and ravines, that often follow bedrock structures, exist across the country, from the valleys in the mountain range in the north-west to the coastal plains and rifts at the coast. Scree slopes formed by erosion can be found on Öland and Gotland. Fault processes have also created steep slopes, for instance the cliffs of the High Coast (Höga kusten) in Ångermanland, at Kullaberget in Skåne and Kilsbergen in western Närke.

The differences in the Swedish climate are decisive for the intensity of weathering throughout the country. The altitude and varying climate affect the weathering conditions of both minerogenic and organogenic soils, and are therefore fundamental for soil formation. The evolution of soil regions depends on the available parent material and the vegetation, as well as on the processes of mechanical and chemical weathering. Therefore, the formation of soil never reaches a steady state but is a continuous process.

Soils developed from nutrient-poor glacial debris form an acidic podzol profile, which is the most common soil profile in Sweden. If the parent material is rich in clay and nutrients, a cambisol is developed, particularly in soil containing mafic minerals and carbonates.

Figur 6. A. Topografisk karta med högsta kustlinjen (HK). B. Årsmedeltemperatur. Källa: SMHI. C. Årsnederbörd. Källa: SMHI.  
 A. Topographic map including the highest coastline. B. Average annual temperature. Source: SMHI. C. Annual precipitation. Source: SMHI.





nordöstra Småland, Östergötland och Södermanland. De nämnda jordmånstyperna förekommer mer eller mindre frekvent i områden med morän.

### METALLOGENETISKA OMRÅDEN

Sverige är ett erkänt viktigt land för malmbrytning och har en stor metallpotential som inkluderar några av de största metallförekomsterna i Europa. Utnyttjandet av metallresurser har i själva verket bidragit till den ekonomiska utvecklingen i landet i mer än 1 000 år.

Datering med kol-14-metoden visar att exploatering av en av de viktigaste metallfyndigheterna, Falu gruva (koppar-guld) i Bergslagen i centrala Sverige, började för ca 700 år sedan (Eriksson & Qvarfort 1996). Efter i stort sett kontinuerlig brytning stängdes gruvan 1992, men prospektering har fortsatt i området. Exploateringen av Falu gruva resulterade i bildandet av ett av världens första aktiebolag år 1288. Företaget är inte längre involverat i gruvindustrin, men är i sin nuvarande form ett av de äldsta företagen i världen. I Sverige har malmbrytningen också varit en viktig faktor för utvecklingen av den moderna industrin och affärsverksamhet i allmänhet.

Potentiella metallogenetiska områden täcker omkring 22 % av landets yta (Hallberg m.fl. 2012) och de har delats upp i 42 områden som karaktäriseras av specifika grupper av metaller, historisk produktion, kända mineraliseringar och potentiella fyndigheter (fig. 7 och tabell 1). Basmetaller (Cu, Zn, Pb, Ni och Co) dominerar i 16 områden, järn och legeringsmetaller (Fe, Mn, Ti, V och Cr) i tretton områden, energimetall (U och Th) i sex områden, ädelmetaller (Au, Ag och platinagruppen) i fyra områden och "specialmetaller" (W, sällsynta jordartsmetaller m.fl.) i tre områden. De flesta malmförande områdena karaktäriseras dock av fler än en metallgrupp.

Fyra områden utgör de ekonomiskt viktigaste och anses som klassiska malmdistrikt i Sverige. Dessa är norra Norrbotten i nordligaste Sverige, Skelleftefältet i norra Sverige, Kaledoniderna längs gränsen mot Norge och Bergslagen i södra-centrala Sverige.

Malmdistriktet norra Norrbotten inkluderar både fyndigheter av massiv järnmalm i Kiruna, Gällivare–Malmberget, Vittangi och Lannavaara, och koppar-guldmineraliseringar som Aitik, Pajala och Viscaria. Alla dessa har bildats för mellan 2,1 och 1,86 miljarder år sedan. Även kobolt, molybden och zink är viktiga i norra Norrbotten.

Även om Skelleftefältet är relativt litet till ytan, ca 140 × 50 km, utgör det ett av de viktigaste guld- och basmetalldistrikten i Europa. Denna paleoproterozoiska (1,96–1,86 miljarder år gamla) magmatiska region omfattar mer än 150 massiva Zn-Cu-Pb-Ag-Au-sulfidmineraliseringar varav 30 har producerat metaller sedan 1924. Den östra delen av Skelleftefältet (nr 41 i fig. 7) är speciellt rik på guld och har producerat mer än 50 % av allt guld från Sverige.

Kaledoniderna skiljer sig geologiskt från resten av Sverige och består främst av yngre sedimentära bergarter som pressats upp på gammal berggrund. Denna region innehåller distinkta typer av mineraliseringar. Dominerande är bas- och ädelmetaller (främst Pb-Zn med Ag) i sedimentära bergarter, men en signifikant men fortfarande outnyttjad resurs är energimetallen uran som förekommer rikligt i låggradig svartskiffer.

Bergslagen är ett extremt rikt polymetalliskt område som har utgjort en central del för den svenska malminindustrin och ekonomin i över 1 000 år. Området kan generellt delas in i en nordlig del där

Cambisols är especially abundant in the southern part of Sweden, where temperature (Fig. 6A) and precipitation (Fig. 6B) contribute to the more rapid formation of soil. A very thin parent soil layer will form a lithosol, which is a poorly developed soil profile. Lithosols are common in areas in and surrounding Bohuslän, and in the coastal areas of north-eastern Småland, Östergötland and Södermanland. All these soil profiles are more or less frequent in till areas.

### METALLOGENIC AREAS

Sweden is recognised as an important mining country and possesses a rich metal resource that includes some of the largest metallic deposits in Europe. Indeed, the exploitation of metallic resources has contributed to the country's economic development for well over 1 000 years.

Carbon-14 dating of charcoal shows that exploitation of one of the most important metal deposits, the Falun copper-gold deposit in the Bergslagen area of south-central Sweden, began around AD 700 (Eriksson & Qvarfort 1996). After almost continuous exploitation, the mine closed in 1992, but exploration continues in the area. Exploitation of the Falun deposit resulted in the formation of one of the world's first limited companies in 1288. Although no longer involved in the mining industry, the company constitutes one of the oldest extant companies in the world. As such, metal exploitation has also been an important factor in the development of modern business practises in Sweden.

Potential metallogenic areas cover approximately 22% of the country (Hallberg et al. 2012), and they have been divided into 42 areas characterised by particular sets of significant metals, past production, known deposits and estimated potential for future mineral discoveries (Fig. 7 and Table 1). Base metals (Cu, Zn, Pb, Ni and Co) dominate in 16 areas, ferrous metals (Fe, Mn, Ti, V and Cr) in thirteen areas, energy metal (U and Th) in six areas, precious metals (Au, Ag and the platinum group) in four areas, and "special" metals (W, REE and other) in three areas. Most metallogenic areas are, however, characterised by more than one metal group.

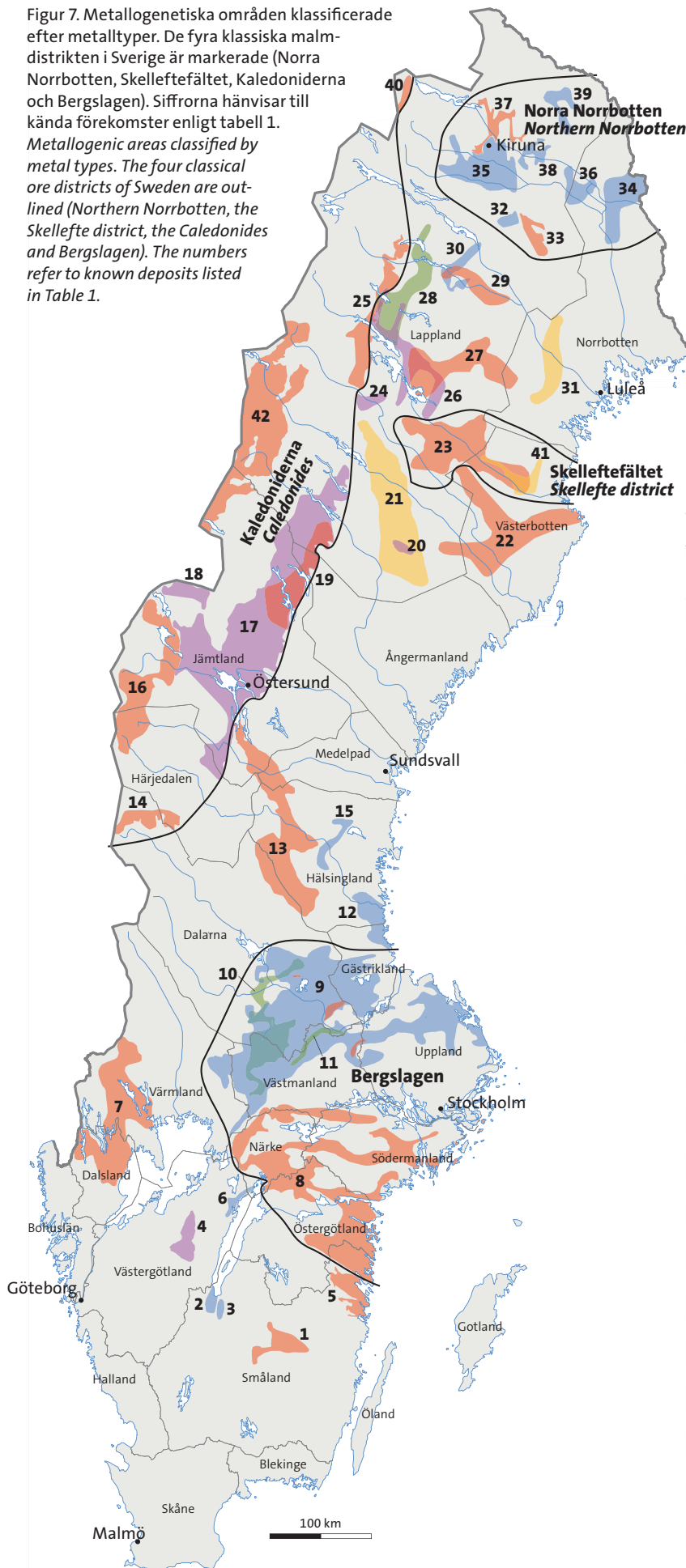
Economically, four areas stand out and are considered the classic ore districts of Sweden. These are northern Norrbotten in northernmost Sweden, the Skellefte district in northern Sweden, the Caledonides along the border with Norway, and the Bergslagen area in south-central Sweden.

The northern Norrbotten ore district contains the massive iron deposits of Kiruna, Gällivare–Malmberget, Vittangi and Lannavaara, as well as copper-gold deposits such as Aitik, Pajala and Viscaria, all formed between 2,1 and 1,86 billion years ago. In this district, Co, Mo and Zn are important in addition to copper and gold.

While being relatively small at approximately 140 × 50 km, the Skellefte district is one of the most important gold and base-metal districts in Europe. This Paleoproterozoic (1,96–1,86 billion years old) magmatic region hosts more than 150 Zn-Cu-Pb-Ag-Au massive sulphide deposits of which 30 have produced metals since 1924. The eastern end of the district (area 41 in Fig. 7) is especially rich in gold and has produced more than 50% of all gold mined in Sweden.

The Caledonides are geologically distinct from the rest of Sweden, consisting of younger sedimentary rocks thrust over the ancient basement rocks, and hosts distinctly different types of ore deposits. The majority are sedimentary hosted base and precious metal deposits (predominantly Pb-Zn with Ag), but a significant, as yet untapped reserve of the energy metal uranium exists in the extensive but low-grade black shale.

Figur 7. Metallogenetiska områden klassificerade efter metalltyper. De fyra klassiska malm-distrikten i Sverige är markerade (Norra Norrbotten, Skelleftefältet, Kaledoniderna och Bergslagen). Siffrorna hänvisar till kända förekomster enligt tabell 1. *Metallogenic areas classified by metal types. The four classical ore districts of Sweden are outlined (Northern Norrbotten, the Skellefte district, the Caledonides and Bergslagen). The numbers refer to known deposits listed in Table 1.*



- Basmetaller (Co, Cu, Ni, Pb, Zn)  
*Base metals*
- Energimetaller (U, Th)  
*Energy metals*
- Järn (Cr, Fe, Mn, Ti, V)  
*Ferrous metals*
- Ädelmetaller (Ag, Au, Pd, Pt, Rh)  
*Precious metals*
- Specialmetaller (Be, Li, Mo, Nb, REE, Sc, Sn, Ta, W, Zr)  
*Special metals*

Tabell 1. Metallogenetiska områden i Sverige. *Metallogenic areas in Sweden.*

| Område<br><i>Area name</i>    | Huvudmetaller<br><i>Main metals</i> | Malmdistrikt<br><i>Ore district</i> |
|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Vetlanda                    | Cu, Ni, Au                          |                                     |
| 2 Taberg                      | Fe, Ti, V                           |                                     |
| 3 Spexeryd                    | Mn                                  |                                     |
| 4 Billingen                   | U, V, Mo                            |                                     |
| 5 Gladhammar–Västervik        | Cu, Co, U, REE, Fe                  |                                     |
| 6 Bölet                       | Mn                                  |                                     |
| 7 Dalsland–Värmland           | Cu, Ag, U, Au, Fe, Mn               |                                     |
| 8 Södra Bergslagen            | Zn, Pb, Fe, Co, Ni                  | Bergslagen                          |
| 9 Norra Bergslagen            | Fe, Cu, Zn, Pb, Ag                  | Bergslagen                          |
| 10 Västra Bergslagen          | W, Mo                               | Bergslagen                          |
| 11 Riddarhyttan               | REE, Fe                             | Bergslagen                          |
| 12 Hamrånge                   | Fe, Cu, W                           |                                     |
| 13 Överturingen–Los           | Au, Zn, U                           |                                     |
| 14 Vassbo                     | Pb, Zn                              | Kaledoniderna                       |
| 15 Dellen–Ljusdal             | V                                   |                                     |
| 16 Sylarna                    | Cu, Zn, Pb, Ag                      | Kaledoniderna                       |
| 17 Kaledoniska svartskifferar | U, V, Mo                            | Kaledoniderna                       |
| 18 Hotagen                    | U                                   | Kaledoniderna                       |
| 19 Dorotea                    | Pb, Zn, Ag                          | Kaledoniderna                       |
| 20 Björkråmyran               | U                                   |                                     |
| 21 Guldlinjen                 | Au                                  |                                     |
| 22 Lappvattnet                | Ni, Cu                              |                                     |
| 23 Skelleftefältet            | Zn, Cu, Pb, Ag, Au                  | Skelleftefältet                     |
| 24 Duobblon                   | U                                   |                                     |
| 25 Laisvall                   | Pb, Zn, Ag                          | Kaledoniderna                       |
| 26 Arjeplog–Arvidsjaur        | U                                   |                                     |
| 27 Radnejaur–Moskosel         | Cu, Au, Zn, Pb, Ag                  |                                     |
| 28 Rappen–Ultevis             | Mo, Cu, Au                          |                                     |
| 29 Vaikijaur                  | Cu, Mo, Au                          |                                     |
| 30 Kallak                     | Fe, Mn, Cu, Au                      |                                     |
| 31 Boden                      | Au, Ag, Cu                          |                                     |
| 32 Gällivare–Malmberget       | Fe                                  | N. Norrbotten                       |
| 33 Aitik–Nautanen             | Cu, Au                              | N. Norrbotten                       |
| 34 Pajala–Kolari              | Fe, Cu, Au                          | N. Norrbotten                       |
| 35 Kiruna                     | Fe, Cu, Au                          | N. Norrbotten                       |
| 36 Tändö                      | Fe, Zn, Cu                          | N. Norrbotten                       |
| 37 Viscaria–Sautusvaara       | Cu, Fe, Au, Zn, Ag, Co              | N. Norrbotten                       |
| 38 Vittangi                   | Fe, Cu, Au, Co, Mo                  | N. Norrbotten                       |
| 39 Lannavaara                 | Fe, Cu                              | N. Norrbotten                       |
| 40 Sjangeli                   | Cu, Ag, Au, U                       |                                     |
| 41 Skelleftefältet guld       | Au                                  | Skelleftefältet                     |
| 42 Grong–Stekenjokk–Hemnes    | Cu, Zn, Pb, Au                      | Kaledoniderna                       |



järnmalmsförekomster dominerar och en sydlig del där sulfidmineraliseringar med basmetaller dominerar. Denna uppdelning är inte exklusiv utan viktiga sulfidförekomster, som de i Falu gruva, finns också i den nordliga delen och mindre järnmalmsförekomster i den södra delen. Inom området förekommer även mineraliseringar med sällsynta jordartsmetaller. Många av dessa identifierades för första gången i Bergslagen och har fått sina namn från lokala platser, som yttrium, erbium, terbium och ytterbium efter byn Ytterby i Stockholms skärgård, och holmium efter Stockholms stad.

The Bergslagen area is an extremely rich, polymetallic region that has been at the heart of the Swedish mining industry and economy for over 1 000 years. The area can be roughly divided into a northern half, where iron deposits dominate, and a southern half, where base-metal sulphide deposits dominate. This division is, however, by no means exclusive with the important Falun copper sulphide deposit occurring in the northern area and many smaller iron deposits occurring in the south. The Bergslagen area is also host to some of the longest known rare earth element deposits. Indeed, many of these elements were first identified in the Bergslagen area and derive their names from local places such as yttrium, erbium, terbium and ytterbium after the village of Ytterby in the Stockholm archipelago, and holmium after Stockholm itself.

Nedan: Karta över Stora stöten i Falu koppargruva. Utsnitt ur "Karta öfver Fahlu eller Stora Kopparbergs grufwor, sammandragen och utgifven år 1845 af J.J. Tjäder, Löjtnant vid Kongl. Dahl Regementet". Motstående sida: Flygbild över Malmberget och järnmalmsgruvan där.

Below: Map of the open pit at Falun mine. Extract from a map of Falu or Stora Kopparberg mines, outlined and published in 1845 by J.J. Tjäder, lieutenant at Kongl. Dahl Regemente. Opposite page: The Malmberget iron mine from above.







Foto: Fredric Alm