

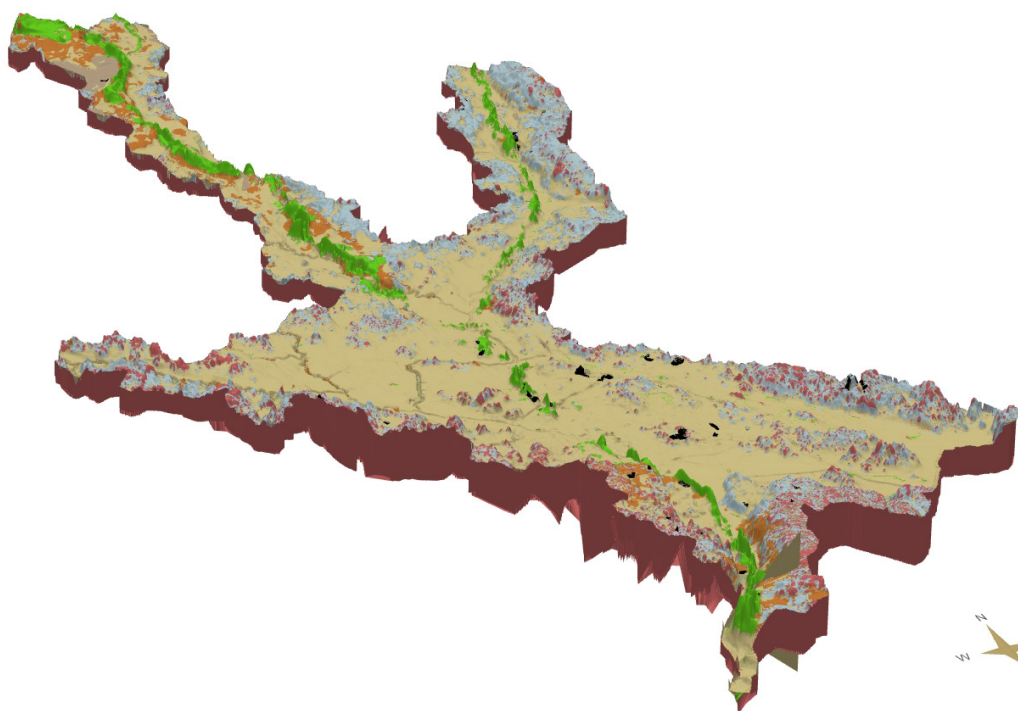
Jordlagermodellering i 3D

– exempel från Uppsalaåsen med hydrogeologisk tillämpning

Eva Jirner, Per-Olof Johansson, Duncan McConnachie,
Håkan Djurberg, Philip McCleaf, Angelica Hummel,
Sven Ahlgren, Lars Rodhe & Henrik Mikko

november 2016

SGU-rapport 2016:19



SGU

Sveriges geologiska undersökning
Geological Survey of Sweden

Omslagsbild: 3D-modellen över jordlagren i projektområdet.

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
fax: 018-17 92 10
e-post: sgu@sgu.se
www.sgu.se

FÖRORD

En tredimensionell jordlagermodell har tagits fram av Sveriges geologiska undersökning (SGU) och Uppsala Vatten för den del av Uppsalaåsen som används för Uppsalas vattenförsörjning.

Modellarbetet i SubsurfaceViewer har utförts av Eva Jirner (SGU) som tillsammans med Per-Olof Johansson (Artesia Grundvattenkonsult), skrivit denna rapport.

Per-Olof Johansson och Angelica Hummel (Uppsala Vatten) genomförde det huvudsakliga arbetet med förenkling av den befintliga jordlagerinformationen från olika källor till den generella stratigrafi som användes i modelleringen.

De stratigrafiska sektioner som utgör grunden i modelleringsarbetet granskades och reviderades i ett första skede av Per-Olof Johansson, Håkan Djurberg (AkvaNovum), Henrik Mikko (SGU) och Lars Rodhe (SGU). Vissa principiella frågor och nyckelprofiler diskuterades vid särskilda möten där också Sven Ahlgren, Philip McCleaf och Angelica Hummel deltog.

INNEHÅLL

Förord	3
Sammanfattning	6
Summary	8
Bakgrund och syfte	10
Kort hydrogeologisk beskrivning	11
Uppsalas vattenförsörjning	14
Metodik	14
Insamling av dataunderlag	15
Digital terrängmodell	15
Höjdmodell för bergets överyta	15
Jordartskartan	16
Jorddjup och jordlagerföljder (punktobservationer)	16
Sektioner	16
Definition av generell jordlagerföljd	16
Bearbetning av data och överföring till filformat för import till SubsurfaceViewer	17
Digital terrängmodell och modell över bergets överyta	17
Jordartskartan	17
Stratigrafi	17
Import av data och upprättande av sektioner	18
Bestämning av jordarternas totala utbredning	19
Beräkning av blockmodell	19
Resultat	19
Export av data	22
Överföring av jordlagermodellen till grundvattenmodellen	22
Diskussion, erfarenheter och slutsatser	30
Referenser	31

SAMMANFATTNING

I ett samarbete mellan SGU och Uppsala Vatten har en tredimensionell jordlagermodell tagits fram för den del av Uppsalaåsen som används för Uppsalas vattenförsörjning. Arbetet har gjorts som ett led i SGUs utvecklingsarbete avseende 3D-modellering och Uppsala Vattens projekt ”Funktionsanalys Uppsalaåsen” rörande kommunens framtida vattenförsörjning.

I modelleringsarbetet användes programvaran SubsurfaceViewer MX. I arbetsgången vid skapandet av jordlagermodellen ingick följande steg:

- Insamling av dataunderlag
 - Digital terrängmodell
 - Höjdmodell över bergets överyta
 - Jordartskarta
 - Information om jorddjup och jordlagerföljder i punktform
 - Sektioner (geofysiska sektioner och sektioner baserade på borrhningar och sonderingar där punkterna inte lagts in separat)
- Definition av generell jordlagerföljd för området
- Bearbetning av data och överföring till filformat som kunde importeras till SubsurfaceViewer
- Import av data och upprättande av sektioner över jordlagren
- Bestämning av jordlagrens totala utbredning
- Beräkning av en blockmodell

Modellområdets storlek är 294 km². Dataunderlaget för modelleringen innehöll information om jordlagerföljder i drygt 1100 punkter. Till detta kom ett 40-tal sektioner med tolkade jordlagerföljder baserade på geofysiska mätningar och olika typer av borrhningar och sonderingar.

Modellering i SubsurfaceViewer utgår från en generell stratigrafi för området som beskriver lagerföljden i den ordning som lagren har bildats. I det här fallet valdes följande förenklade lagerföljd: berg, morän, isälvsmaterial, silt, lera, svallmaterial, organiskt material och ospecificerat eller fyllning. All indata gällande jordlagerföljder anpassades till modellens generella stratigrafi.

Efter import av terrängmodellen, bergnivåmodellen samt jordartskartan och jordlagerdata till SubsurfaceViewer ritades sektioner genom området. För varje sektion tolkades därefter geologin utifrån jordartskartan, jordlagerdata och den generella jordlagermodellen över området. De totalt ca 165 sektionerna bildade ett rutnät, ett så kallat fence-diagram. Antalet sektioner och valet av deras läge är av avgörande betydelse för jordlagermodellens kvalitet. I ett första skede utnyttjades alla tillgängliga data. I nästa skede lades ytterligare sektioner ut för kontroll och vid behov korrigering av resultatet från modellinterpolationen, främst i områden där informationen var bristfällig och nära modellområdesgränsen. Detta arbete kräver god generell kunskap om områdets geologi. Tolkningen kvalitetskontrollerades genom granskning av alla sektioner av flera personer med goda kunskaper om områdets geologi och justeringar gjordes till konsensus nåddes. Arbetet med sektionerna var tidskrävande.

Vid uppritningen och tolkningen av sektionerna uppmärksammades att SGUs jorddjupsmodell verkade ha en tendens att ge för höga berggrundslägen i områden med topografiskt markerat åsmaterial, dvs. att bergytan i för stor utsträckning styrdes av markytans topografi. I områden med morän i dagen verkade det vara så att bergnivån i jorddjupsmodellen hade en tendens att i för liten utsträckning vara kopplad till markytans topografi. Detta gav ställvis upphov till orimliga moränmaktigheter, särskilt i högt belägna områden. Manuella korrigeringar, baserad på geologisk lokalkännedom, gjordes vid tolkningen och kontrollen av sektionerna.

En tredimensionell blockmodell beräknades därefter baserad på varje enskild jordarts totala utbredning i plan och dess utsträckning i höjddled vilken erhöles från sektionerna. Programmet

använder Delaunay-triangulering vid beräkning av övre respektive undre begränsningsyta av varje jordart. I modellen togs också de översta 100 m av berget med (den del av berget som skulle ingå i den matematiska grundvattenmodell som skulle upprättas för området).

En generell erfarenhet från modelleringsarbetet var att det krävs en gedigen kunskap om modellområdets geologi, en väldefinierad arbetsgång och kvalitetskontroll i varje steg.

Ett av huvudsyftena i den här presenterade studien var att få fram en jordlagermodell som kunde användas i en matematisk grundvattenmodell där kontinuerliga lager krävdes. En procedur som utvecklades i ArcGIS möjliggjorde en effektiv överföring av de GRID-filer för jordlagren som exporterades från SubsurfaceViewer till ett format som direkt kunde importeras till grundvattenmodellen (Feflow 6.2).

Den framtagna jordlagermodellen kan användas i den fysiska planeringen, till exempel vid bedömning av grundvattnets sårbarhet och skyddsbehov vid olika typer av exploatering. Kunskaper och förståelse gällande jordlagerförhållandena på djupet är viktiga för att kunna bedöma påverkan på grundvattennivåer, grundvattenflöden och grundvattenkvaliteten, till exempel vid inläckage till undermarkskonstruktioner, borttagning eller punktering av tätande jordlager och vid olika typer av utsläpp av förorenande ämnen. Sektioner, kartor och 3D-illustrationer kan enkelt visas och exporteras från modellen för att användas vid presentationer, som diskussionsunderlag och som beslutsstöd.

SUMMARY

A three-dimensional geological model was developed by Swedish Geological Survey (SGU) and Uppsala Vatten for the part of the Uppsala Esker used for the water supply of Uppsala. The cooperation was a part of SGU's development work for use of 3D geological models in ground-water mapping of important aquifers and in Uppsala Vatten's strategic project on the future water supply.

The software SubsurfaceViewer MX was used as the modelling tool. The working process included the following steps:

- Collection of data
 - Digital terrain model (DTM)
 - Elevation model of the bedrock surface
 - Map of Quaternary deposits
 - Data points on depth to bedrock and stratigraphy
 - Stratigraphic cross-sections based on geophysics etc.
- Definition of a general stratigraphy for the study area
- Processing, analysis and transfer of data to file formats readable by SubsurfaceViewer
- Import of data and drawing and interpretation of cross-sections
- Estimation of the total extension of each layer of overburden
- Calculation of a block model

The size of the modelling area is 294 km². Input data for the modelling included stratigraphical information in more than 1100 points. Furthermore, c. 40 stratigraphical cross-sections based on geophysical measurements, drilling and soundings were imported.

Modelling in SubsurfaceViewer is based on a general chronological geological stratigraphy of the study area. In this study the simplified stratigraphy included bedrock, till, glaciofluvial material, silt, clay, outwash deposits, organic soils and unspecified filling. All input data was adapted to the general stratigraphy of the model.

After the import of the DTM, the elevation model, the map of the Quaternary deposits, and stratigraphical data, cross-sections were drawn across the study area. The stratigraphy of all sections was then interpreted based on the geological map, the available specific stratigraphy data and the general stratigraphy of the model. The number of cross-sections, c. 165, formed a so called fence diagram.

The number of cross-sections and the selection of the position of them are decisive for the quality of the model. In a first stage all available data was used. In a second stage additional cross-sections were placed to check the model interpolations and if necessary correct them. This was especially important in areas with scarce data and close to the model boundaries. A profound knowledge of the geology of the study area is critical for the interpretation and corrections of the cross-sections. The interpretations were reviewed by a group of experts familiar with the geology of the area and adjustments were made until consensus was reached. The work with the cross-sections was time consuming.

When drawing and interpreting the cross-sections it was noticed that the depth to bedrock model of SGU seemed to have a tendency to allocate to high bedrock surfaces in areas where the esker had a pronounced ridge shape. In areas with outcropping till, especially in topographically elevated areas, the model by contrast did not seem to follow the topography of the ground close enough, resulting in too deep till layers. Manual corrections, based on geological local knowledge, were made in these cases in connection to the interpretation and check of the cross-sections.

A 3D block model was calculated for each layer of the stratigraphy by use of the maps showing the total horizontal extension and the depth obtained from the cross-sections. The software uses Delaunay-triangulation in the calculation of the top and base of the layers. The uppermost 100 m of the bedrock was incorporated in the model since it should be included in the export to the mathematical groundwater model to be developed for the study area.

A general experience of the modelling work is that a solid knowledge of the geology of the area is necessary and should be combined with a well-defined working procedure and quality control in each step.

One of the main objectives of the present study was to develop a geological model which could be used in a mathematical groundwater model where continuous layers covering the whole model area were required. A procedure was developed in ArcGIS that allowed for an effective transfer of the GRID-files exported from SubsurfaceViewer to a format that could be imported to the groundwater model (Feflow 6.2).

The developed model can be used in physical planning, for example for groundwater vulnerability assessment and need for protective measures connected to different types of exploitation. Knowledge and understanding of the geological stratification is important to assess the influence on groundwater levels, groundwater flow and groundwater quality from underground constructions, removal of confining layers, and different types of release of polluting substances etc. Cross-sections, maps and 3D-illustrations can readily be shown and exported from the model and be used in presentations and as basis for discussion and decision support.

BAKGRUND OCH SYFTE

I ett samarbete mellan SGU och Uppsala Vatten har en tredimensionell jordlagermodell tagits fram för den del av Uppsalaåsen som används för Uppsalas vattenförsörjning. Arbetet har gjorts som ett led i SGUs utvecklingsarbete avseende 3D-modellering kopplat till grundvattenkartläggningen och Uppsala Vattens projekt "Funktionsanalys Uppsalaåsen" rörande Uppsalas framtida vattenförsörjning.

SGUs information om grundvatten utgör ett viktigt underlag i planeringen av samhällets vattenförsörjning. Den är också en av förutsättningarna för att miljökvalitetsmålet "Grundvatten av god kvalitet" ska kunna uppnås. Grundvatteninformationen används exempelvis i kommunal planering, vid upprättande av vattenförsörjningsplaner, vid planering av infrastruktur och som underlag för miljökonsekvensbeskrivningar och åtgärdsprogram för skydd av grundvattnet.

SGUs kartläggning av grundvattentillgångar syftar till att ge en översiktlig bild av bland annat grundvattenmagasinens utbredning, hydrauliska egenskaper, tillrinningsområden, anslutande ytvattensystem, förekomst av tätande lager, vattendelare och grundvattnets strömningsriktning. Magasinen klassificeras också efter bedömd uttagsmöjlighet, det vill säga hur mycket grundvatten som kan utvinna långsiktigt.

Kartläggningen bygger på sammanställning av tidigare gjorda utredningar, analys av geologiska kartor, inventering av brunnar och källor, mätning av grundvattennivåer, geofysiska mätningar (främst seismik och georadar) och borrhningar. Informationen lagras i SGUs allmänna databaser; dels som grunddata, till exempel borrhloggar och grundvattennivåer, och dels som tolkade data, till exempel magasinogränser och olika magasinsegenskaper.

Ett urval av informationen presenteras i grundvattenkartor i skala 1:50 000. Informationen används även som underlag för att ta fram olika typer av tematiska kartor, till exempel för grundvattenskydd.

SGU har sett ett behov av att komplettera grundvattenkartläggningen genom att ta fram tredimensionella geologiska modeller för viktiga grundvattenmagasin som ett medel för ökad förståelse och förbättrade möjligheter till pedagogiska illustrationer. Framtagna geologiska modeller skulle också kunna utgöra underlag vid upprättandet av konceptuella och matematiska tredimensionella grundvattenmodeller. I ett utvecklingsarbete testar SGU metodik och programvaror för upprättandet av tredimensionella geologiska modeller.

Uppsalaåsen försörjer i dag Uppsala kommun med dricksvatten och är också av strategisk betydelse för kommunens framtida vattenförsörjning. Uppsala kommun har en snabb befolkningsutveckling och därmed ett ökande vattenbehov. Uppsalaåsen är till stora delar belägen under mäktiga lerlager som ger ett bra skydd mot förorening men i områden där åsen ligger i dagen är föroreningsrisken stor vilket ställer krav på planering och skyddsåtgärder. Uppsala Vatten initierade 2013 ett projekt kallat *Funktionsanalys Uppsalaåsen* med målsättningen att ta fram en strategi för framtida utveckling och drift av kommunens vattenförsörjningsanläggningar i åsen avseende vattenkvantitet och -kvalitet samt sårbarhet och skydd.

I Uppsala Vattens projekt ingår att ta fram en GIS-baserad hydrogeologisk databas och en konceptuell hydrogeologisk modell över den del av Uppsalaåsen som används för kommunens vattenförsörjning. Baserat på dessa ska en tredimensionell matematisk grundvattenmodell upprättas. Databasen och modellerna ska användas som verktyg för en ökad förståelse av hur åsen fungerar hydrogeologiskt och för test av olika driftscenarier, exempelvis lokalisering av nya infiltrations- och uttagsområden och vid olika typer av krislägen, men också för analys av föroreningsrisker och olika skyddsstrategier och -åtgärder. Vidare är avsikten att databasen och modellerna ska utgöra ett operativt stöd vid driften vad gäller exempelvis balansen mellan infiltration och uttag och därav beroende grundvattennivåer.

För den tredimensionella matematiska grundvattenmodellen krävs en tredimensionell geologisk modell som beskriver modellområdets geometri och jordlagerföljder som grund för tilldelning av hydrauliska gränser och hydrauliska egenskaper som genomsläpplighet och lagringsförmåga.

Vi har haft stor hjälp av Antti Pasanen från GTK, Finland, eftersom de har gjort ett liknande arbete, alltså att ta fram en 3D-modell som sen kan användas för grundvattenmodellering. (Pasanen & Okkonen 2016).

Kort hydrogeologisk beskrivning

Det stora stråk av isälvsavlagringar som kallas Uppsalaåsen har sin början på Södertörn, ca 4 mil sydväst om Stockholm. Åsen korsar Mälaren via Ekerö och Munsö och kan sedan följas norrut från Bålsta till Uppsala och vidare norrut till Billudden, öster om Gävle, där åsen dyker ner i Gävlebukten. Till stora delar täcks åsens isälvsmaterial av finsediment och i vissa avsnitt är åsen helt dold. I Uppsalatrakten förekommer åsen både som topografiskt framträdande åsryggar i dagen och under mer än 50 m djupa lager av finsediment. Genom Uppsala har åsen avlagrats längs en nord-sydlig förkastning i berggrunden.

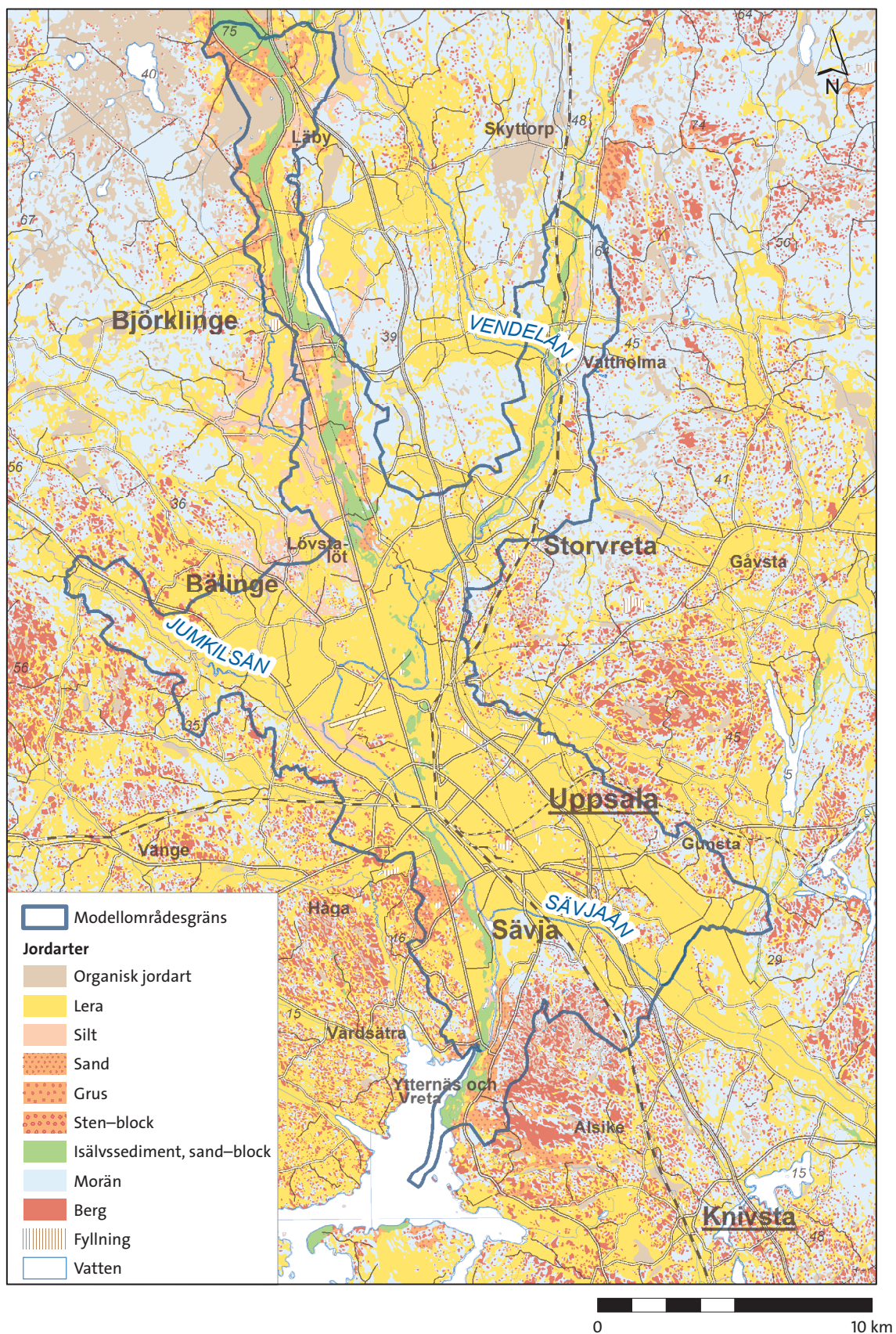
I Uppsala Vattens projekt "Funktionsanalys Uppsalaåsen" har en avgränsning gjorts av projektområdet till den sträcka av Uppsalaåsen, huvudåsen med tillhörande biåsar, som används för Uppsalas vattenförsörjning. Jordarts- och grundvattenkartor över projektområdet, som sammanfaller med området för vilket en grundvattenmodell ska upprättas, visas i figur 1 och figur 2. Områdets storlek är 294 km² och överensstämmer i stort med åsens tillrinningsområde. Vissa perifera tillrinningsområden har inte tagits med i modellområdet medan utströmningsområden i Långsjön och Mälaren inkluderats.

Av figurerna 1 och 2 framgår att större delen av åsen täcks av finsediment av varierande tjocklek. Områdena med åsmaterial i dagen utgör endast 16 procent av den totala utbredningen av åsens grundvattenmagasin inom modellområdet. Där åsen går i dagen uppgår den omättade zonen i vissa markerade höjdområden, som exempelvis vid Tunåsen, till mer än 30 m. Huvudåsens vattenförande mäktighet överstiger ställvis 30 m och åsens centrala delar ligger ofta direkt på berg. Den vattenförande mäktigheten i biåsarna i Sävjaåns och Jumkilsåns dalgångar (figur 1) är väsentligt mindre, oftast inte mer än ca 5 m, medan den i Vattholmaåsen ställvis är mer än 10 m.

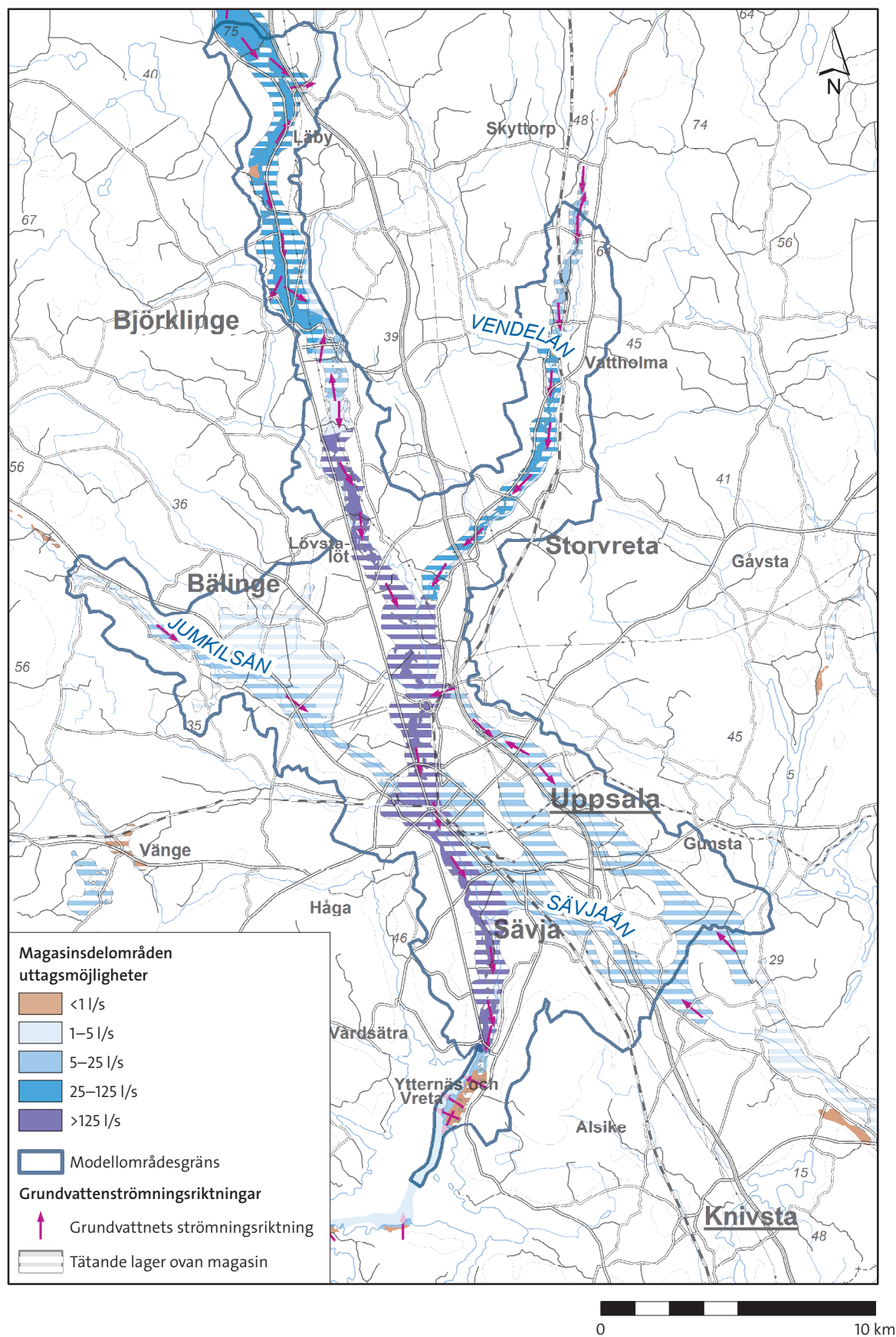
Den huvudsakliga naturliga grundvattenströmningen i modellområdet är riktad mot söder och en utströmning sker till Mälaren, se figur 2. I modellområdets nordligaste del finns två mindre grundvattenmagasin i åsen, Läby- och Björklunge-Sandmomagasinen, vilka avvattnas mot Vendelån respektive Långsjön (figur 2).

I områden där åsmaterialet går i dagen varierar medelgrundvattenbildningen i olika delar av modellområdet från knappt 250 till drygt 300 mm/år. Även om den specifika grundvattenbildningen är högst i dessa områden bildas dock huvuddelen av det grundvatten som tillförs åsen i den resterande delen av åsens tillrinningsområde. Preliminära vattenbalansberäkningar indikerar att den naturliga grundvattenbildningen till åsen inom modellområdet uppgår till ca 400 l/s, exklusive Läby- och Björklunge-Sandmomagasinen och området söder om Fyrisåns utlopp i Mälaren. Av dessa 400 l/s kommer endast ca en femtedel från infiltration i områden där åsmaterialet går i dagen.

Längst norrut i Läbymagasinet återfinns de högsta grundvattennivåerna i åsen inom modellområdet, ca +40 m (RH2000). Vid grundvattendelaren vid Björklunge-Sandmomagasinet södra gräns, i höjd med Drälinge (se figur 2), ligger grundvattennivån på ca +35 m. Därifrån sjunker grundvattennivån successivt hela vägen ner till Mälaren där grundvattennivån är ca +1 m. I Vattholmaåsen, i modellområdets nordostligaste del, är grundvattennivån ca +23 m. I höjd med Lena kyrka finns ett markant stalp i grundvattennivån, från drygt +22 m till knappt +17 m (ett stalp är ett parti med brant lutande grundvattenyta, "grundvattenfall"). Grundvattennivån i Vattholmaåsen sjunker sedan successivt och är vid sammanflödet med huvudåsen knappt +13 m.



Figur 1. Jordartskarta över modellområdet (SGU 1993).



Figur 2. Utbredningen av åsens grundvattenmagasin (SGU 2015).

Långsjön och Mälaren är under naturliga förhållanden utströmningsområden för åsens grundvatten. Fyrisån, Sävjaån, Jumkilsån, Björklingeån och Vendelån rinner alla på vissa sträckor längs med åsarna eller korsar dem och utgör där potentiella in- eller utströmningsområden beroende på relationen mellan grundvattennivån och vattendragens nivåer. Jordlagerförhållandena på dessa sträckor är avgörande för om det finns en hydraulisk kontakt av praktisk betydelse. Exempel på områden där utströmning av grundvatten kan ske är i anslutning till stalpet vid Lena kyrka och nedströms Ekeby kvarn i Vattholmaåsen. Under normala förhållanden sker också en utströmning vid Ultunakällan. Uppströms Ekeby kvarn och Ensta kvarn är exempel på platser där åns vattennivå är högre än grundvattennivån och där isälvs materialet inte täcks av finkorniga sediment. Förutsättningar finns där för inflöde av åvatten till grundvattenmagasinet.

UPPSALAS VATTENFÖRSÖRJNING

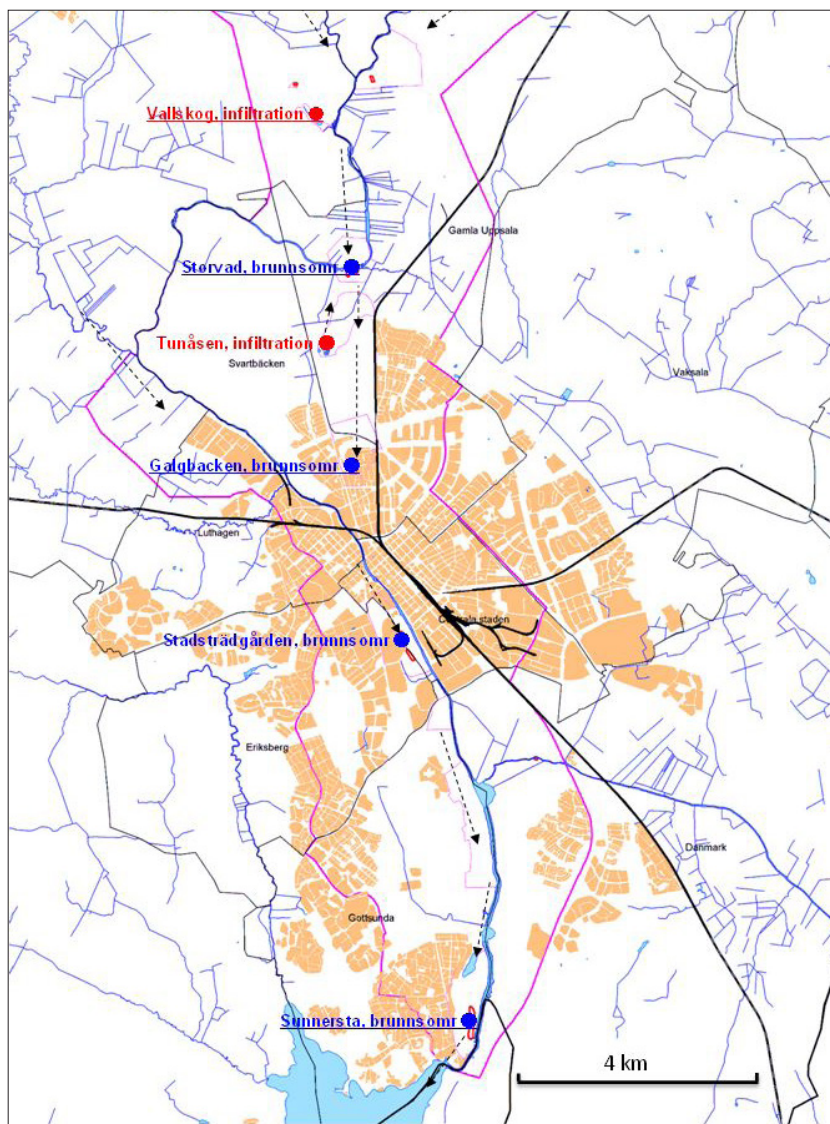
Uppsalas vattenförsörjning baseras på att den naturliga grundvattenbildningen förstärks med infiltration av vatten från Fyrisån, se figur 3. Infiltration sker i bassänger på fyra platser, varav de två anläggningarna i Vallskog och Tunåsen svarar för den helt dominerande andelen. Totalt infiltreras drygt 270 l/s i genomsnitt, vilket kan jämföras med den ovan uppskattade naturliga grundvattenbildningen på drygt 400 l/s. De största uttagen sker i brunnsområdena i Storvad, Galgbacken, Stadsträdgården/Kronåsen och Sunnersta. Det sammanlagda uttaget uppgår till ca 670 l/s. Infiltrationen, uttagen och förändringar i dessa påverkar grundvattennivåer och grundvattenströmning. Driften måste ske på ett sådant sätt att grundvattennivåerna inne i Uppsala hålls inom ett visst intervall för att undvika problem med sättningar och fuktskador. Vid stora uttag i Sunnersta sänks grundvattennivån under Fyrisåns och Mälarens nivå och ger en grundvattenströmning också söder ifrån liksom förutsättningar för en inströmning av ytvatten till grundvattenmagasinet.

METODIK

Vid skapandet av den tredimensionella jordlagermodellen för det definierade projektområdet användes programvaran SubsurfaceViewer MX (INSIGHT Geologische Softwaresysteme GmbH 2014) som utvecklats för att kunna analysera och visualisera geologiska data och skapa modeller baserade på dessa. Exempel på indata är kartor, digitala terrängmodeller, borrhåldata och geologiska sektioner vilka kan kombineras, analyseras och presenteras i såväl två som tre dimensioner. Genererade ytor och sektioner kan exporteras i flera olika format och hela modellen kan exporteras för att kunna öppnas i en gratisversion av SubsurfaceViewer.

Arbetsgången vid skapandet av jordlagermodellen kan indelas i följande steg:

- Insamling av dataunderlag
- Digital terrängmodell, batymetri
- Höjdmodell över bergets överyta
- Jordartskarta
- Information om jorddjup och jordlagerföljder i punktform
- Sektioner (geofysiska sektioner och sektioner baserade på borrhningar och sonderingar där punkterna inte lagts in separat)
- Definition av generell jordlagerföljd för området
- Bearbetning av data och överföring till filformat som kan importeras till SubsurfaceViewer
- Import av data och upprättande och tolkning av sektioner över jordlagerföljden
- Bestämning av jordlagrens totala utbredning
- Beräkning av en blockmodell



Figur 3. Schematisk karta över Uppsalas vattenförsörjning med de största infiltrations- och uttagsområdena. Kartan är framtagen av Uppsala Vatten.

Modellen som utvecklas är inte statisk utan det finns möjlighet att justera, omarbета eller utveckla modellen ytterligare. Exempelvis kan modellen enkelt uppdateras när ytterligare data görs tillgängliga.

Insamling av dataunderlag

Digital terrängmodell

Lantmäteriets produkt GSD-höjddata 2+ har använts. Inom berörda delar av Långsjön och Mälaren har batymetriska data från sjödjupskartor använts.

Höjdmodell för bergets överyta

För att erhålla en modell för bergets överyta inom modellområdet digitaliserades en befintlig bergnivåkarta som täcker centrala delar av modellområdet längs åsen (Ahlgren 1971). För övriga delar av modellområdet användes information från SGUs jorddjupskarta (Daniels och Thunholm 2014). I gränsområdet mellan de båda underlagen gjordes en anpassning i ArcGIS genom att ett medelvärde beräknades för en 100 m bred överlappande zon.

Jordartskartan

SGUs digitala jordartskarta över Uppsalaområdet, skala 1:50 000 har använts. Kartan ingår i produkten Jordarter 1:25 000–1:50 000. Kartan ger information om jordarternas utbredning, och egenskaper, samt förekomsten av block i markytan. Kartläggningen grundar sig på omfattande fältarbete kompletterat med flygbildstolkning. Noggrannheten uppges vara ca 50 m (med elfel). Områdets jordarter har beskrivits av Möller (1993).

Jorddjup och jordlagerföljder (punktobservationer)

Databasen över jordlagerföljder innehåller uppgifter om jordlagerföljder, jordlagrens mäktighet och egenskaper. Uppgifterna kommer från SGUs jordartsgeologiska kartläggning samt från ett antal geotekniska undersökningar. I modellen har information från 105 punkter använts. Lägesnoggrannheten är i regel 50 m eller bättre.

I SGUs hydrogeologiska parameterdatabas (HPAR) finns både data från SGUs egna grundvattenundersökningar (borrningar och fältinventeringar av grävda brunnar och borrningar) och borrningar och sonderingar insamlade från konsultrapporter, sammanlagt 10 250 st. Av dessa punkter ligger 40 st inom det här aktuella projektområdet.

Brunnsarkivet (BARK) vid SGU är databasen över brunnar i Sverige och innehåller data om drygt 500 000 brunnars geografiska läge, jorddjup och i vissa fall uppgifter om lagerföljd, djup, dimension, kapacitet och grundvattennivå. Uppgifterna gäller främst bergborrade brunnar och utgörs av de uppgifter som brunnsbörare sedan 1976 enligt lag är skyldiga att skicka in till SGU. I BARK finns 3 300 brunnar inom modellområdet. Alla dessa brunnar ingår i underlaget till SGUs jorddjupskarta medan 651 st har jordlagerföljder som använts i modelleringen.

I samband med den successiva utbyggnaden av Uppsalas vattenförsörjning har ett stort antal utredningar gjorts där olika typer av jordborrningar utförts. I projektet *Funktionsanalys Uppsala-åsen* har en genomgång gjorts av Uppsala Vattens och Uppsala kommuns arkiv och utöver den information som finns i SGUs databaser har 428 st brunnar, borrningar och sonderingar lagts in i projektets databas (x-, y- och z-koordinater, jordlagerföljd m.m.). Detta material inkluderar också ett antal sonderingar och borrningar som utförts i samband med byggnads- och infrastrukturprojekt.

Totalt finns punktinformation avseende jorddjup och jordlagerföljder från 1 119 punkter i dataunderlaget som använts för modelleringen.

Sektioner

Under många av SGUs undersökningar samlas geofysiska data in. De typer som är av nytta för modellutvecklingen är i första hand seismik- och georadardata. I Uppsala Vattens databas finns också ett antal seismiska sektioner. Sammanlagt ingår 10 geofysiska sektioner i dataunderlaget för modelleringen.

Utöver de geofysiska sektionerna har ett 20-tal sektioner med tolkningar av borrningar och sonderingar från Uppsala Vattens arkiv lagts in i projektets databas. Dessa sektioner är baserade på borrningar och sonderingar, varav några av borrningarna ofta också ingår som punktinformation i dataunderlaget för modelleringen. Ett 10-tal tolkade geotekniska sektioner från infrastrukturprojekt har också inkluderats i dataunderlaget.

Definition av generell jordlagerföljd

Modelleringen i SubsurfaceViewer utgår från en generell stratigrafi för området som beskriver lagerföljden i den ordning som lagren bildats. Baserad på allmän kunskap om områdets geologi och insamlat underlagsmaterial och med hänsyn till att huvudändamålet med modelleringen var att få underlag till en hydrogeologisk modell, definierades en förenklad generell lagerföljd, se figur 4.

Ospecificerat (fyllning)
Organiskt material
Svallmaterial
Silt, lera
Isälvsmaterial
Morän
Berg

Figur 4. Generell jordlagerföljd för modellområdet.

Bearbetning av data och överföring till filformat för import till SubsurfaceViewer

Vissa delar av det insamlade underlagsmaterialet kunde importeras direkt till SubsurfaceViewer medan bearbetning av data och överföring till annat filformat krävdes för andra delar av underlaget.

Digital terrängmodell och modell över bergets överyta

Höjdmodeller importeras till SubsurfaceViewer som ASCII GRID-filer. I det här fallet användes en grid-storlek på 25 m. För de delar av Mälaren och Långsjön som ingår i modellområdet ersattes höjdmodellens vattennivåer med bottennivåer baserade på digitaliserade djupkartor för sjöarna före importen till SubsurfaceViewer.

Den modell som togs fram över bergets överyta, baserad på en kombination av Uppsala Vattens bergnivåkarta och SGUs jorddjupskarta, exporterades från ArcGIS till en ASCII GRID-fil som därefter importerades till SubsurfaceViewer på samma sätt som den justerade höjdmodellen (terrängmodellen).

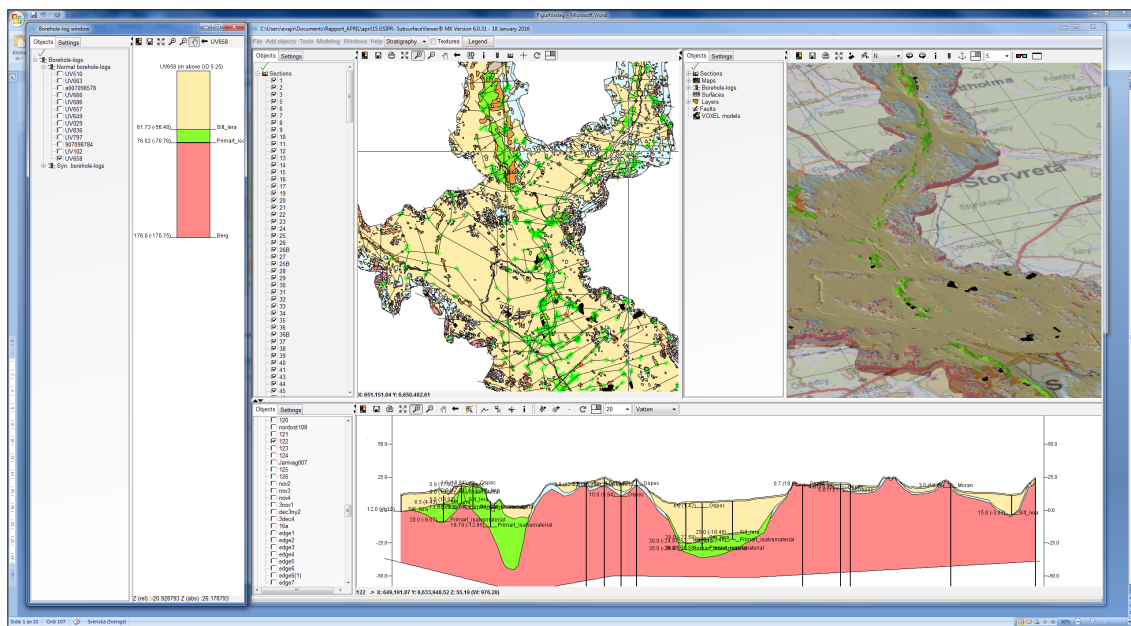
Jordartskartan

SGUs jordartskarta förenklades i ArcGIS till klasserna i den generella jordlagerföljden (figur 4). Därefter importerades polygoner och linjer till SubsurfaceViewer i vektorformat som ESRI 2D-shapefiler.

Stratigrafi

Grunden i ett SubsurfaceViewer-projekt är filen som beskriver områdets generella stratigrafi, GVS-filen (jfr fig. 4). Hur de olika lagrens ska visas specificeras i en separat fil (GLEG-filen) där färg och transparens m.m. bestäms.

Djupdata i punktform importeras i två separata filer: en där positionen för varje punkt anges (BID-filen som innehåller punkt-id, x- och y-koordinater samt z-koordinat för marknivån), och en som innehåller information om stratigrafin (BLG-filen som innehåller punkt-id., djup till lagrets underkant från markytan och jordarten). I denna fil kan ytterligare kolumner läggas till med information som exempelvis kornstorlek eller vattengenomsläpplighet.



Figur 5. SubsurfaceViewers grafiska användargränssnitt med fönster för djupdata, sektioner, kartdata och 3D.

All insamlad punktinformation sammanställdes i BID- och BLG-filer i Excel. Huvuddelen av arbetet utgjordes av omklassningen av de i indatafilerna angivna jordarterna till klasserna i den generella jordlagerföljden. Excelfilerna överfördes sedan till ASCII-textfiler som är det format som används vid importen till SubsurfaceViewer.

Höjddjusterad data från olika typer av sektioner, skisser av skärningar och fotografier kan importeras till SubsurfaceViewer som bildfiler (rasterformat). En sektion behöver skapas som följer den linje där mätningarna utförts. Därefter kan bilden importeras, skalas och dras på plats.

Import av data och upprättande av sektioner

När insamlat underlagsmaterial överförs till rätt format kan data importeras och presenteras visuellt i ett grafiskt användargränssnitt med fönster för djupdata, sektioner, kartdata och 3D (figur 5).

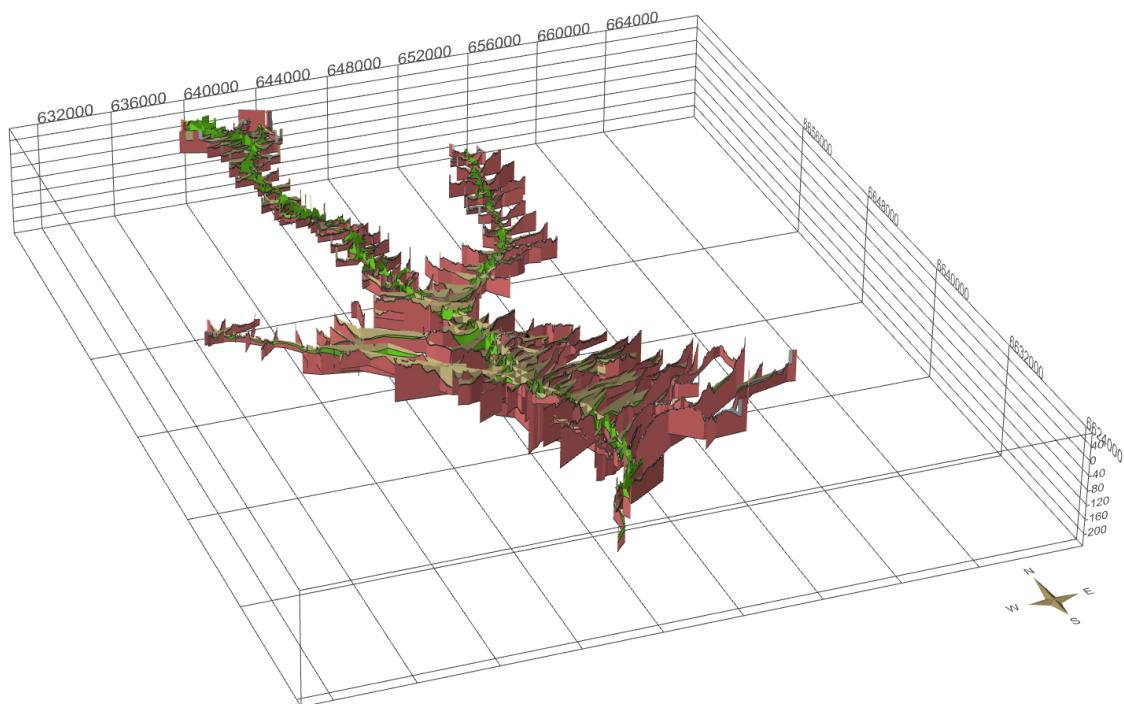
Efter import av terrängmodellen, bergnivåmodellen, jordartskartan och djupdata ritas sektioner genom området. Sträckningen av dessa baseras på var djupdatapunkter finns men det är också möjligt att lägga dem genom områden utan data.

I projektet ritades i första skedet sektioner var femhundra meter tvärs åsen sträckning, totalt 105 st. Varannan sektion sträckte sig över hela modellområdet och varannan över själva grundvattenmagasinet som det avgränsats på SGUs grundvattenkarta.

För varje sektion tolkades därefter geologin utifrån den generella jordlagermodellen över området, djupdata och jordartskartan. Jordartskartan projicerades på sektionernas överytor och gav tillsammans med höjdmodellen viktig information till tolkningen.

I nästa steg ritades längdsektioner (tvärs över de gamla) för att se att grundvattenflödet i åsen inte stoppades av höga berglägen som kunde ha uppkommit vid felritningar, totalt ca 60 st.

De slutligen totalt 165 sektionerna bildar ett rutnät, ett så kallat fence-diagram (figur 6).



Figur 6. Fence-diagram som visar samtliga sektioner som användes för uppbyggnaden av jordlagermodellen.

Bestämning av jordarternas totala utbredning

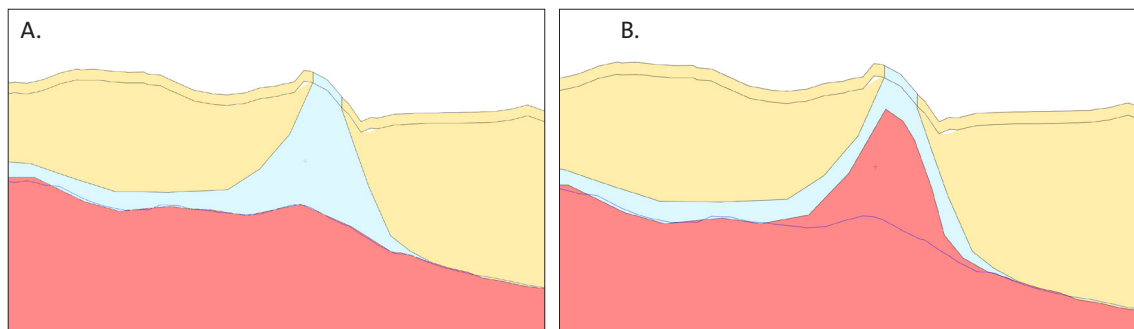
När tolkningen av sektionerna är klar tas jordartskartor fram som visar varje jordarts totala utbredning oberoende av jordartens läge i lagerföljden, till skillnad från en vanlig jordartskarta som endast visar jordartens utbredning i markytan. Detta kan utföras i SubsurfaceViewer eller externt i en GIS-miljö (t.ex. ArcGIS).

Beräkning av blockmodell

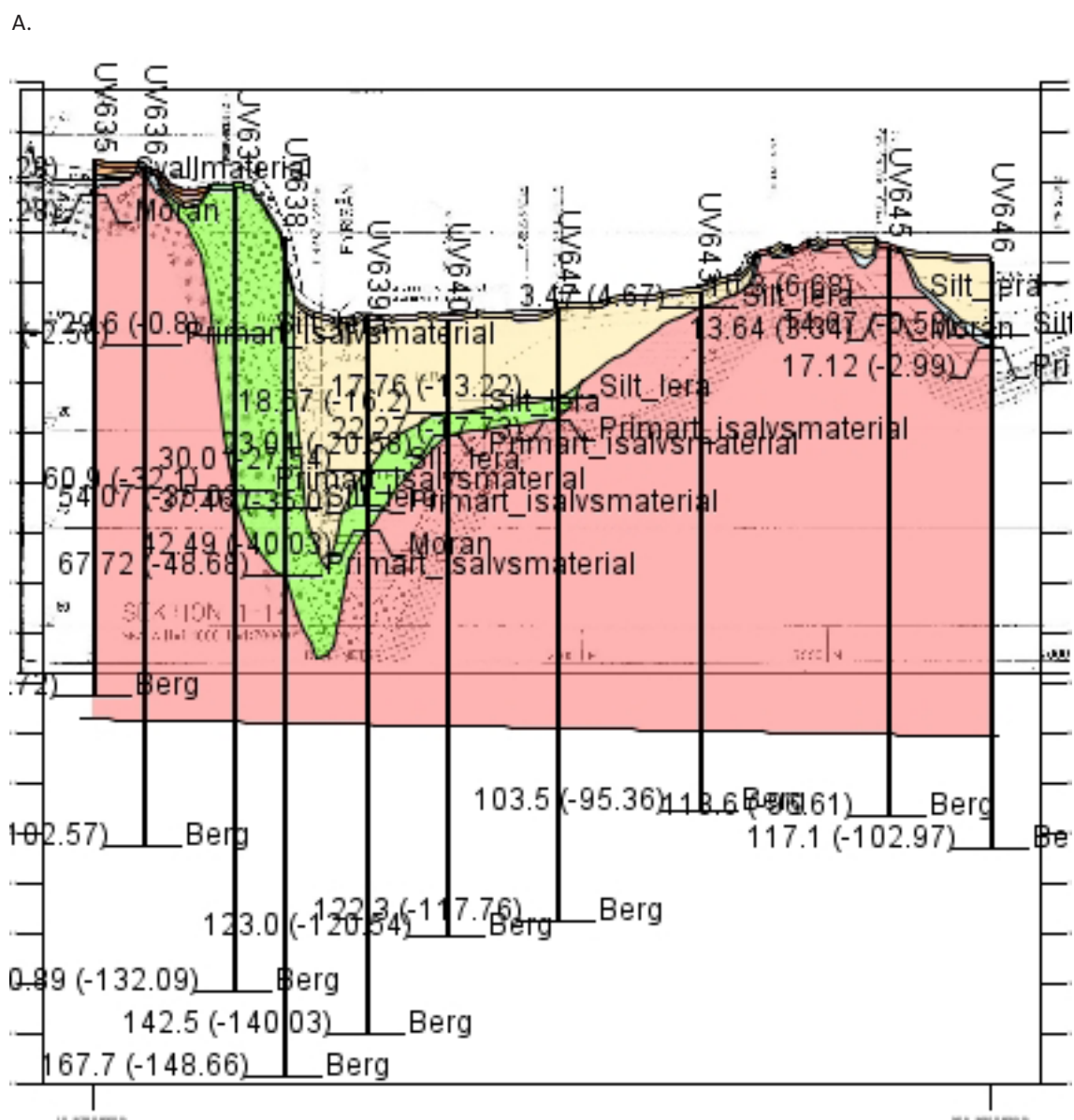
För varje enskild jordart beräknas därefter utbredningen i tre dimensioner med hjälp av dels ytan med jordartens utbredning i plan och dels jordartens utsträckning i höjddled som erhålls från sektionerna. Programmet använder Delaunay-triangulering vid beräkning av övre respektive undre begränsningsyta av varje jordart. I modellen togs också de översta 100 m av berget med (den del av berget som skulle ingå i den matematiska grundvattenmodellen).

RESULTAT

Vid uppritandet av sektioner efter importen av terrängmodellen, bergnivåmodellen, jordartskartan och djupdata uppmärksammades att SGUs jorddjupsmodell verkar ha en tendens att ge för höga berggrundslägen i områden med topografiskt markerat åsmaterial, dvs. att bergytan i för stor utsträckning styrs av markytans topografi. I områden med morän i dagen föreföll det istället vara så att bergnivån i jorddjupsmodellen hade en tendens att i för liten utsträckning vara kopplad till markytans topografi vilket ställvis gav upphov till orimliga moränmäktigheter. I arbetet med upprättandet av sektioner som berördes av ovan nämnda problem gjordes korrigeringar av bergytans nivå baserat på generell kunskap om områdets geologi. I figur 7 visas ett exempel på en sektion där bergnivån bedömdes att i för stor utsträckning styrs av markytans topografi under en isälvsavlagring tillsammans med den korrigering som gjordes.

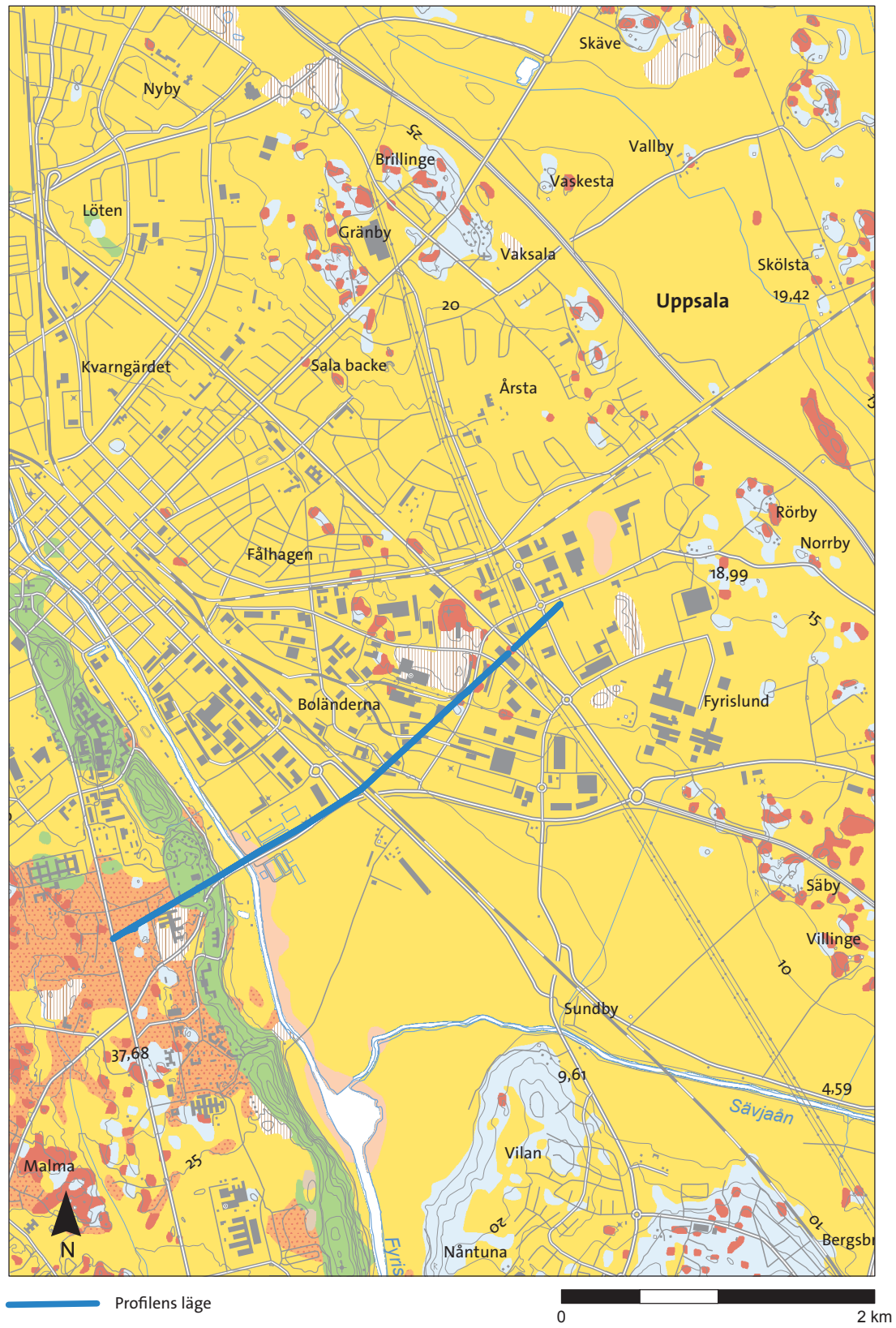


Figur 7 A & B. Exempel på en sektion där bergnivån bedömdes i för stor utsträckning styras av markytans topografi under en isälvavlagring (A) tillsammans med den korrigering som gjordes (B).



Figur 8A. Exempel på till SubsurfaceViewer importerad och skalad handritad sektion med införda tolkningar tvärs åsen i centrala Uppsala, figur 8B (sektionen från Lundin 1988).

B.



Figur 8B.

I figur 8 visas en sektion i modellen som konstruerades genom import av en bildfil i rasterformat av en tidigare publicerad handritad sektion tvärs åsen i centrala Uppsala. Sektionens läge i plan lades in och en skalning gjordes av bilden i längd- och höjdd. Därefter ritades lagerföljden in manuellt i modellen med en anpassning till de jordarter som ingår i den generella lagerföljden.

Isälvsmaterialet i Uppsalaåsen och biåsarna är i stor utsträckning täckta av andra jordarter, främst lera. I figur 9 visas isälvsmaterialets utbredning i markytan och dess totala utbredning. Utbredningen i ytan är ca 17 km² medan den totala utbredningen är ca 109 km². I figur 10 visas två sektioner från Jumkilsåns och Sävjaåns dalgångar som exempel på där inget isälvsmaterial finns i markytan men där det har en betydande utbredning djupare ner i markprofilen.

I figur 11 illustreras hur jorddjupet kan variera kraftigt också i slättområden. Exemplet är från Svista, ca 10 km norr om centrala Uppsala. Här finns en markant sprickdalgång i berggrunden fylld med isälvsmaterial och lera av betydande mäktighet och med ett totalt jorddjup av ca 80 m.

3D-modellen över jordlagren och de översta 100 m av berget i hela projektområdet visas i figur 12 och i figur 13 visas en illustration där lagren separerats från varandra i höjdd vilket gör att varje lager syns tydligare.

I tabell 1 redovisas volymerna av de olika jordarterna och berget inom modellområdet.

EXPORT AV DATA

Sektioner kan exporteras som 3D shape-filer. I den färdiga modellen finns ytor genererade för top och base för varje jordartsklass. Dessa kan exporteras som olika grid, ts-filer samt indata direkt till Modflow för grundvattenmodellering. Hela modellen kan också sparas för att kunna öppnas i gratisversionen av SubsurfaceViewer. För att göra detta krävs i nuläget att modellen skickas till INSIGHT för kryptering.

ÖVERFÖRING AV JORDLAGERMODELLEN TILL GRUNDVATTENMODELLEN

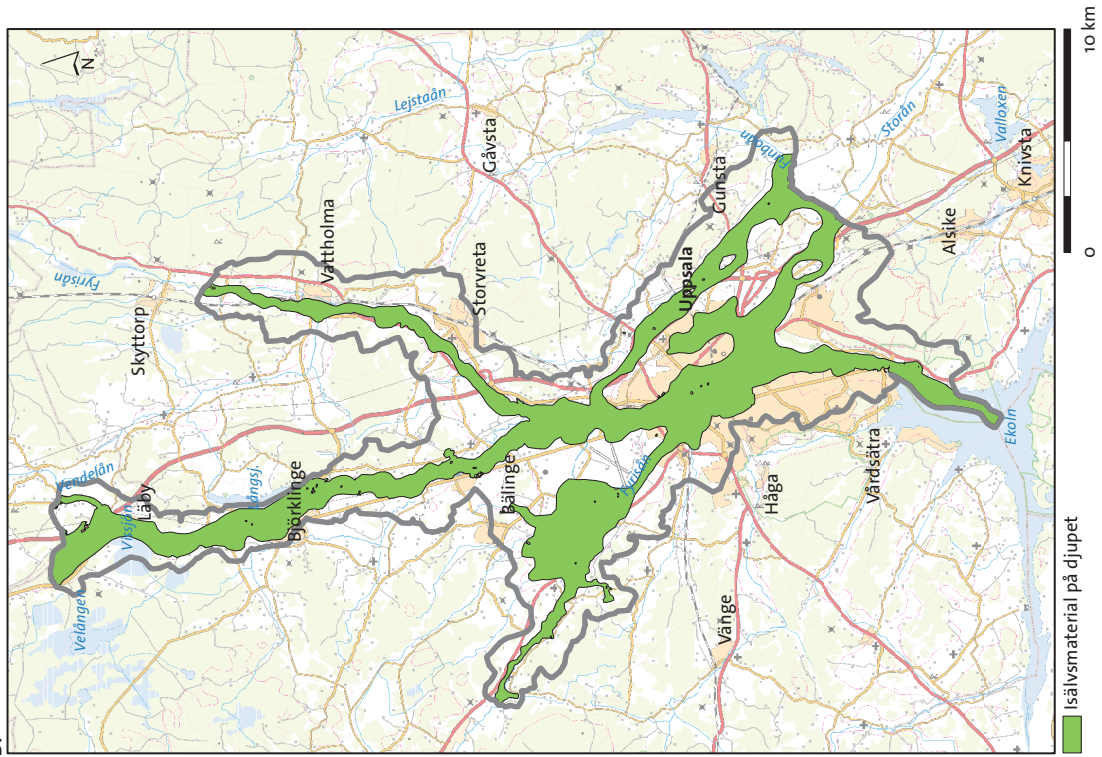
I SubsurfaceViewer kan jordlagren i modellområdet vara diskontinuerliga medan den matematiska grundvattenmodell som används i Uppsala Vattens projekt *Funktionsanalys Uppsalaåsen*, Feflow 6.2, kräver lager som är kontinuerliga över hela modellområdet.

För att skapa kontinuerliga lager som kunde användas i Feflow exporterades överkanten på varje jordlager som GRID-filer från SubsurfaceViewer för bearbetning i ArcGIS med tilläggswerktygen i Spatial Analyst. I områden med berg i dagen måste, som exempel, en korrektion göras så att de överliggande sex lagren i den generella lagerföljden läggs ovan på berget. Detta görs genom att lägga till de övriga lagren med en minimitjocklek (0,5 m, se nedan) och sänka berglagrets nivå lika mycket.

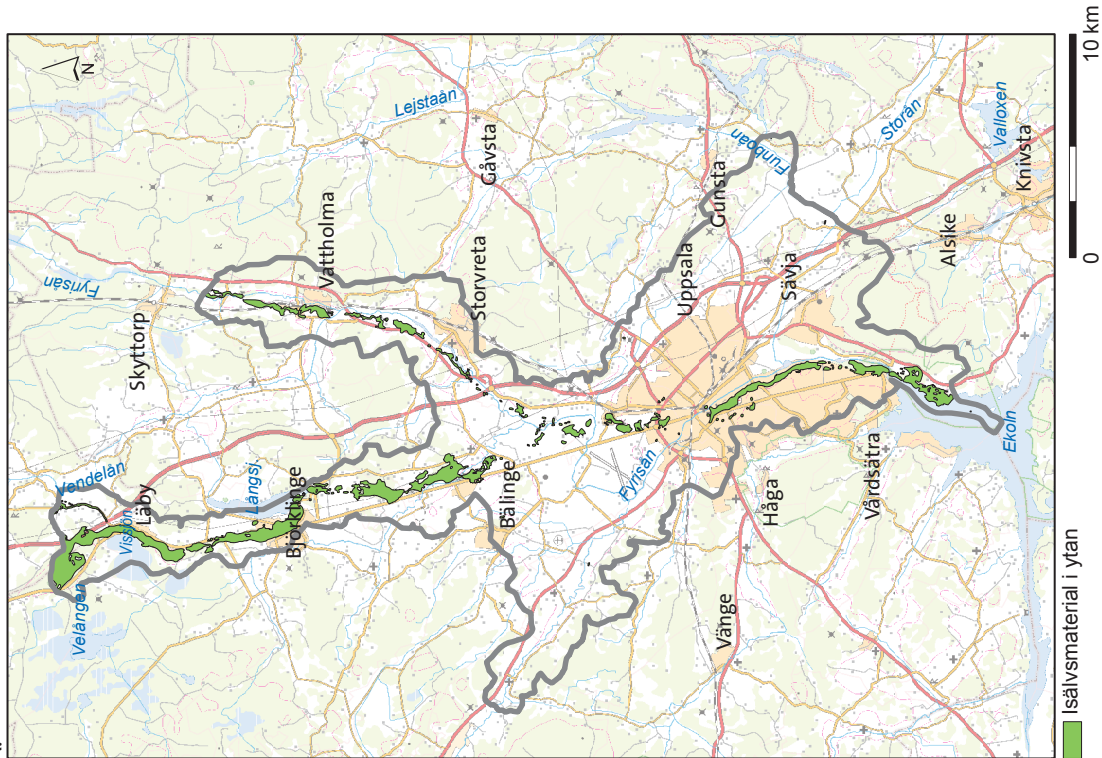
Tabell 1. Volym av jordarter och berg inom modellområdet.

Lager	Volym (× 106 m ³)
Ospecificerat (fyllning)	1,71
Organiskt material	4,28
Svallmaterial	11,88
Silt, lera	1376,78
Isälvsmaterial	1035,07
Morän	433,85
Totalt	2863,57

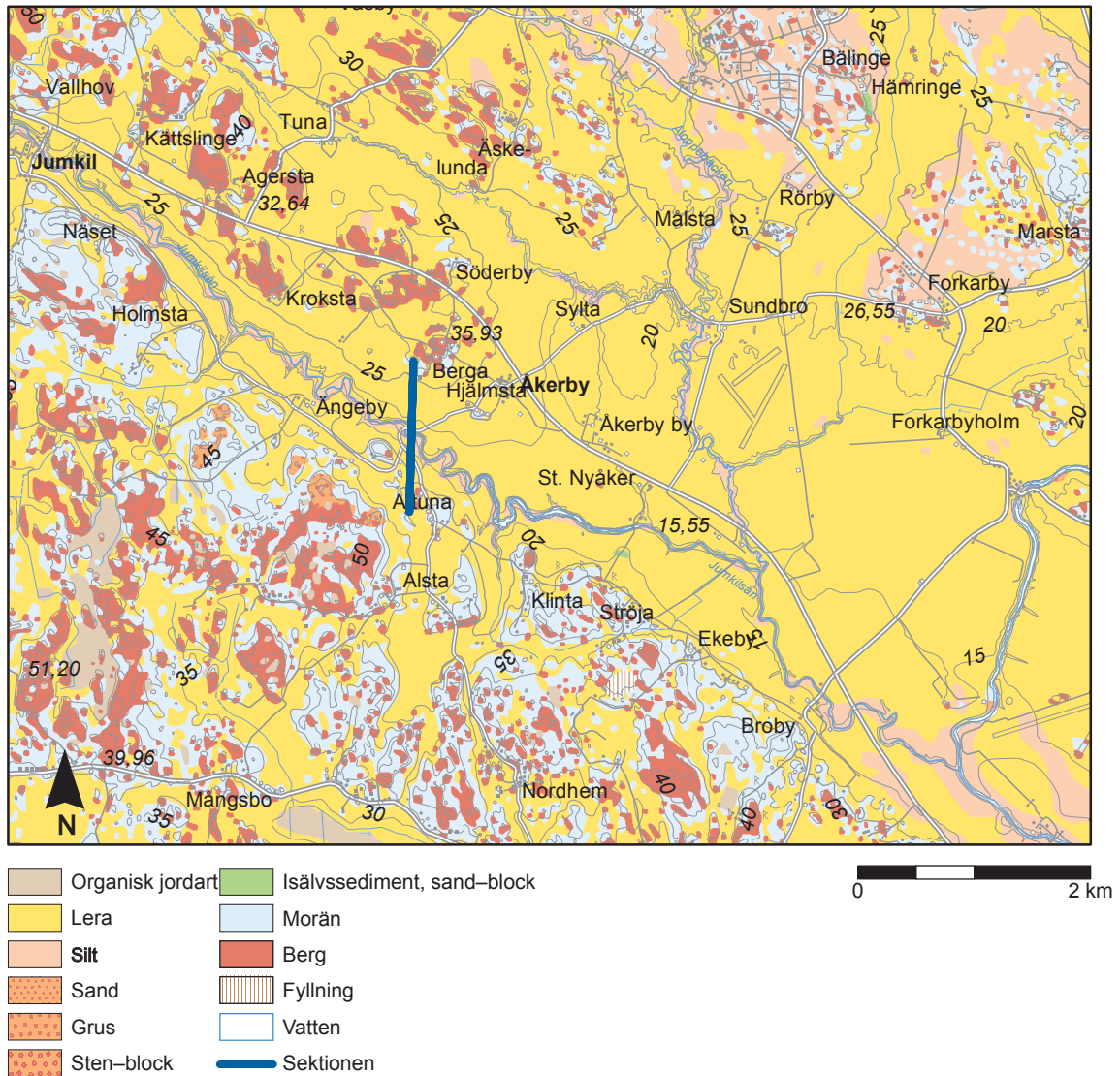
B.



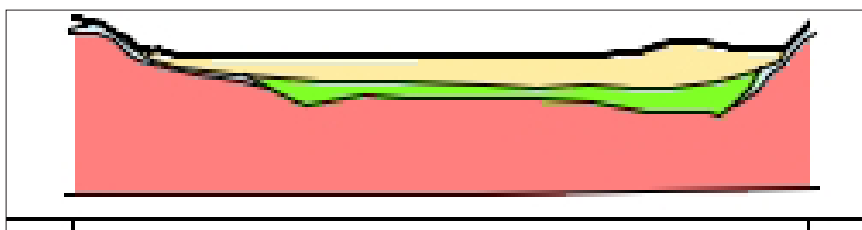
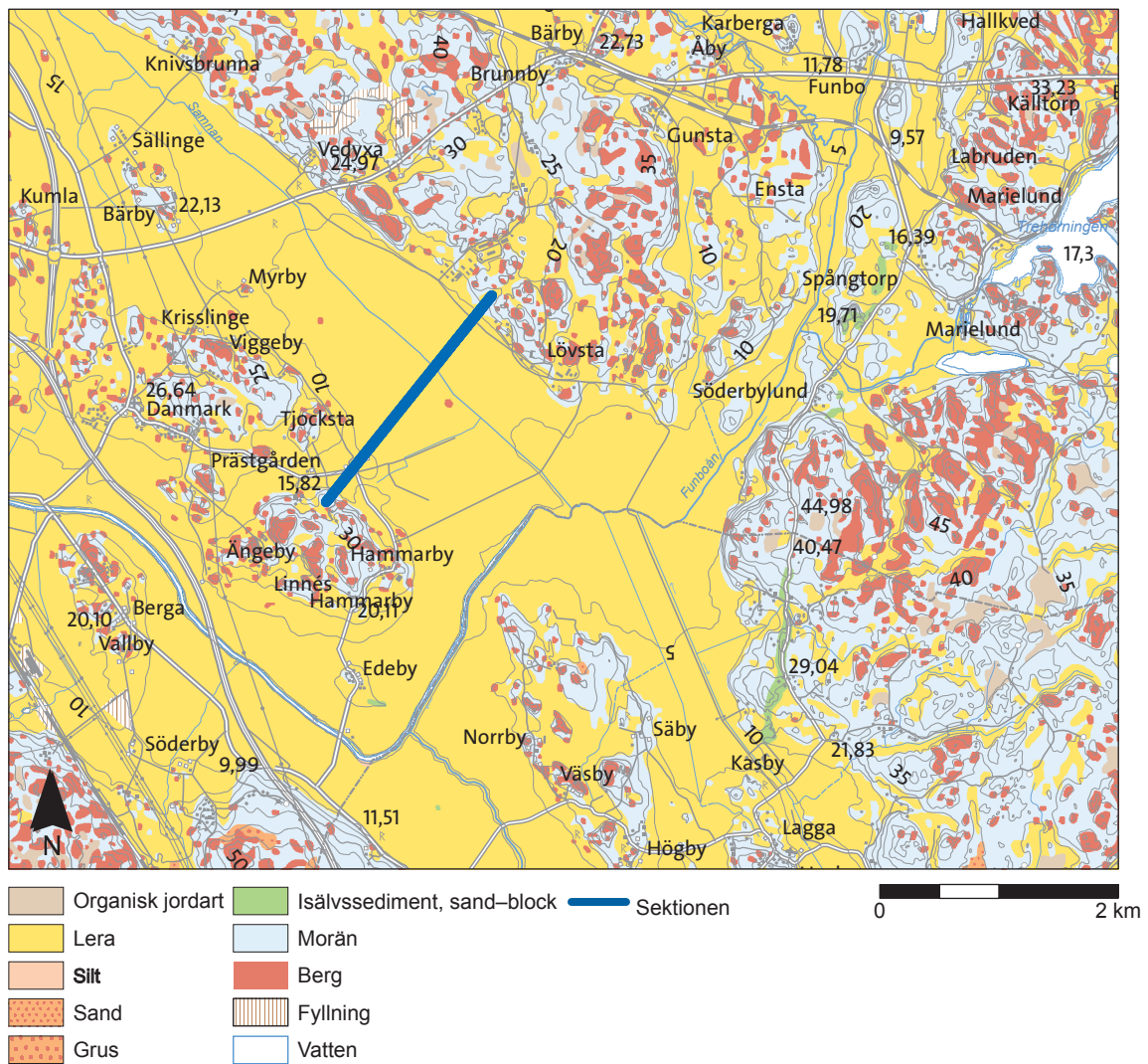
A.



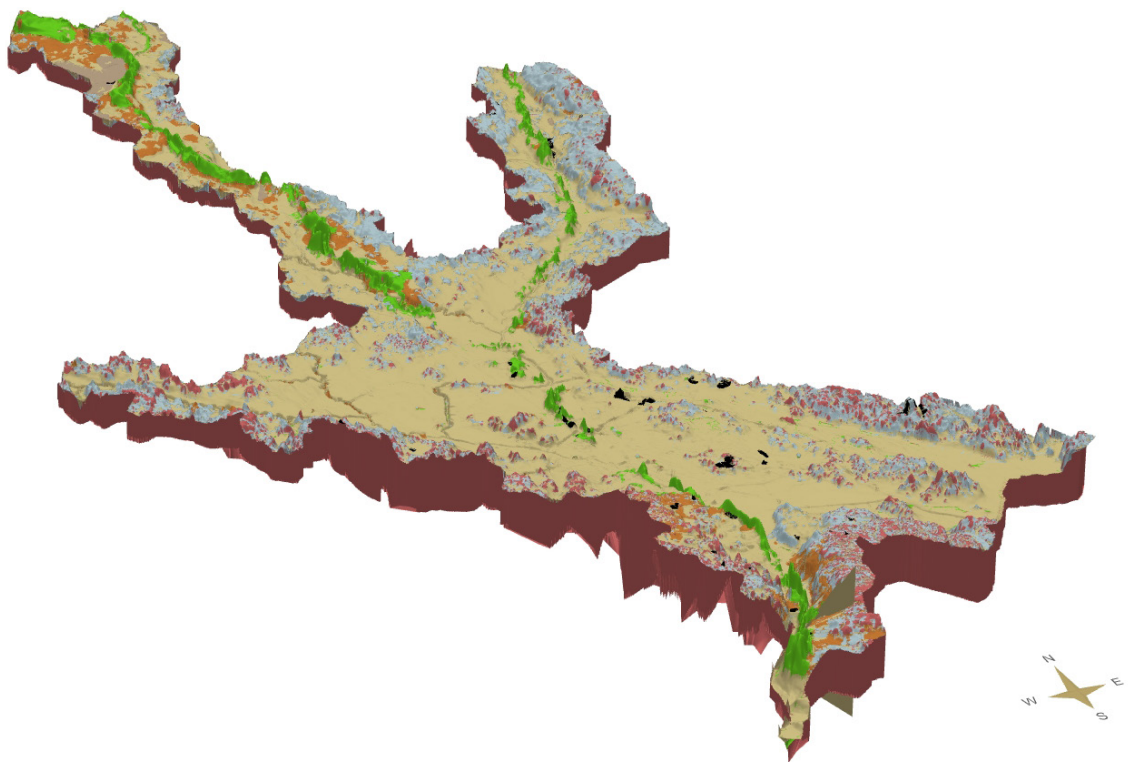
Figur 9. Isälvsmaterialets utbredning i markytan (A) och dess totala utbredning (B).



Figur 10A. Sektioner tvärs Jumkilsåns dalgång där inget isälvsmaterial finns i markytan men har en betydande utbredning djupare ner i marken. Kartan visar sektionens läge från söder till norr.

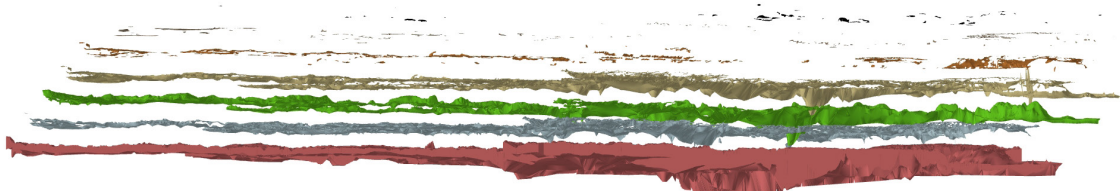


Figur 10B. Sektioner tvärs Sävjaåns dalgång där inget isälvs material finns i markytan men har en betydande utbredning djupare ner i marken. Kartan visar sektionens läge från sydväst till nordost.

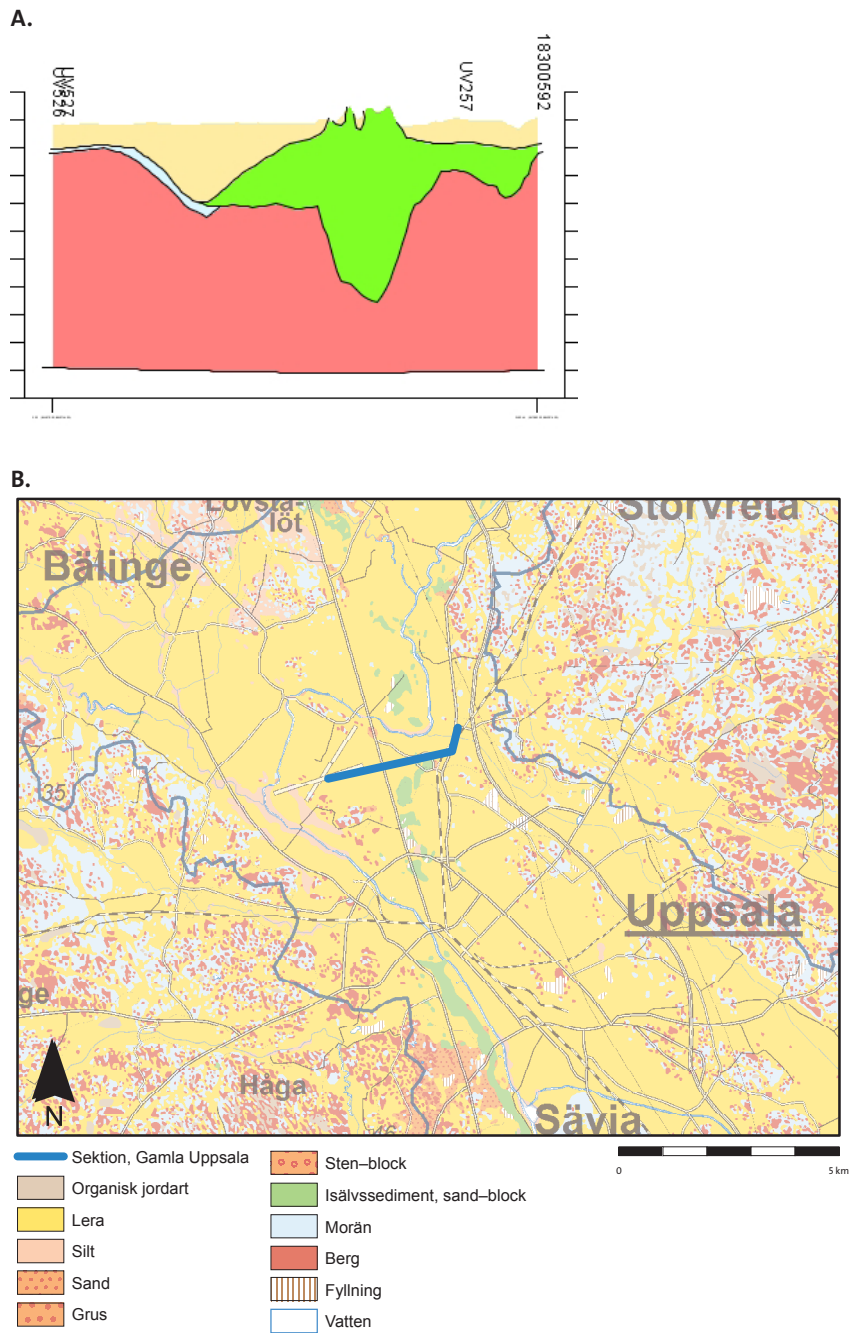


Figur 12. 3D-modellen över jordlagren i projektområdet.

A.



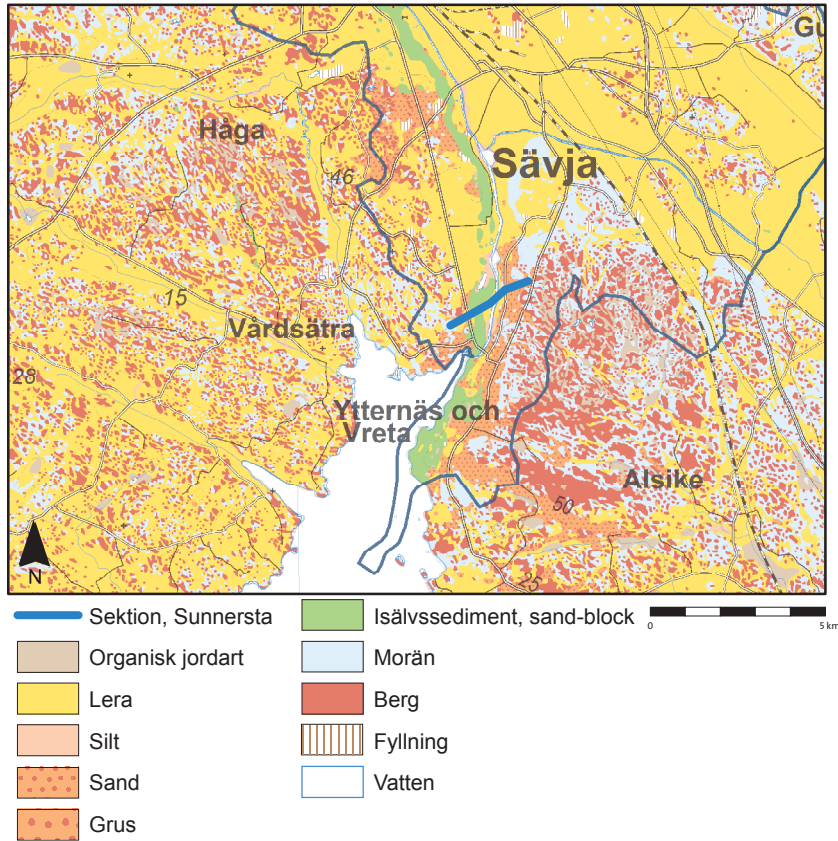
Figur 13A. Jordlagermodellen där de olika lagren separerats från varandra för att deras totala utbredning ska kunna ses bättre.



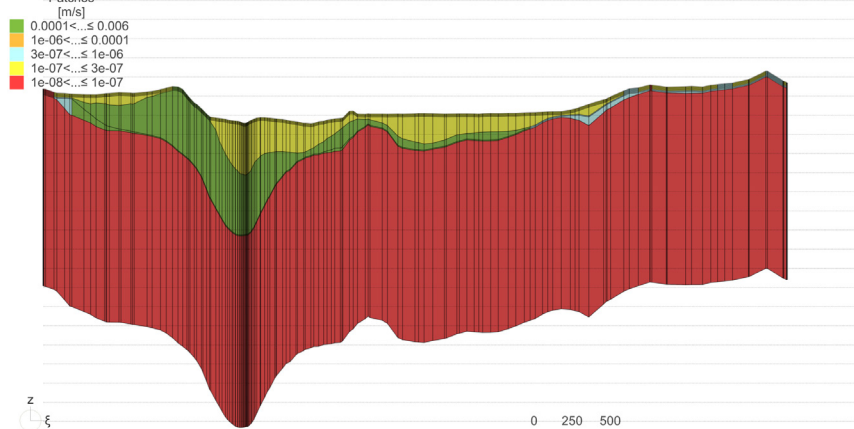
Figur 14. Sektionen från väster till öster på kartan ligger i gamla Uppsala, på jordarts-kartan ser man att bara lite av åsen syns i lera men när man tittat på tvärsektionen ser man att åsen är mäktig under lera.

Fotot är taget från söder mot högarna.

A.



B.



Figur 15. Sektion från centrala Uppsala och samma sektion efter import till Feflow.

I den metodik som användes för att skapa kontinuerliga lager med en minimitjocklek där den aktuella jordarten saknades genomfördes detta uppifrån och ner. De kontinuerliga lagren skapades genom att kombinera ArcGIS-verktygen Mosaic To New Raster med valet Maximum som Mosaic Method och med valet Conditional i Spatial Analysts Raster Calculator, samt Mosaic To New Raster med valet First som Mosaic Method.

När de kontinuerliga lagren hade skapats tilldelades de fiktiva lagren korrekt jordart. Detta gjordes också i ArcGIS, uppifrån och ner. För varje lager identifierades områden där lagret var fiktivt och tilldelades den jordart som fanns i det närmast underliggande verkliga lagret.

De shape-filer som skapades för lagertopografin och lagrens jordart importerades sedan till Feflow för att konstruera den tredimensionella geometrin och som hjälp för att ange parametrar

som hydraulisk konduktivitet och magasinskoefficient. I figurerna 14 och 15 visas en jämförelse mellan den sektion i SubsurfaceViewer från centrala Uppsala som presenterades i figur 8 och sektionen med samma sträckning efter importen till Feflow.

I Feflow är minimitjockleken på ett lager 0,1 m. Mycket tunna lager i kombination med stora kontraster i hydraulisk konduktivitet leder dock ofta till numeriska problem. Den minimitjocklek som användes i projektet var 0,5 m (i december 2015 lanserades Feflow 7.0 där det är möjligt att hantera diskontinuerliga lager).

DISKUSSION, ERFARENHETER OCH SLUTSATSER

Den mest arbetskrävande delen i det inledande arbetet med insamling och bearbetning av dataunderlaget för modelleringen var att överföra jordlagerbeskrivningarna i alla borrhälspunkter till modellens förenklade generella lagerföljd. Borrhälspunkterna var hämtade från en rad olika källor och lägesbeskrivningar och jordartbeteckningar varierade.

Den detaljerade digitala höjdmodellen, baserad på laserskanning och som fanns tillgänglig via Lantmäteriverket, medförde att jordlagermodellens övre begränsningsyta är topografiskt väldefinierad. För de delar av modellområdet som ligger under Långsjön och Mälaren är överytans topografi osäkrare då den baseras på digitaliserade vattendjupskartor. Den undre begränsningsytan, bergets överyta, är mer osäker. Den äldre bergnivåkarta, som fanns tillgänglig för områdets centrala delar (Ahlgren 1971), är baserad på borrhälsningar och seismiska mätningar i kombination med en geologisk tolkning där särskilt den nord-sydliga sprickzonen längs åsen genom Uppsala beaktats och resulterat i långsträckta områden med stora jorddjup. SGUs jorddjupsmodell, som fanns tillgänglig över hela modellområdet, grundas på analys av jorddjupsinformation från brunnsborrhälsningar, undersökningsborrhälsningar, karteringsobservationer, schakter och seismiska undersökningar. Jorddjupet beräknas genom interpolering av kända jorddjupsdata. Eftersom vissa jordarter uppvisar betydligt större jorddjup än andra används jordartskartan som stöd vid denna interpolering. Information om sprickzoner i berggrunden används för att ta fram områden med speciellt stora jorddjup. Trots hänsynstagandet till sprickzoner också i SGUs jorddjupskarta var det relativt stora skillnader mellan den äldre bergnivåkartan och SGUs jorddjupskarta längs åsen. I SGUs karta är inflytandet av sprickzonen på utsträckningen av områden med stora jorddjup väsentligt mindre än i den äldre kartan. Som nämnts ovan förefaller det också som att inflytandet av markytans topografi på många ställen varit för stor där isälvmaterialet har en typisk åsform. Den gängse geologiska tolkningen är att isälvmaterialet oftast avsatts i anslutning till svaghetszoner i berget med lägre bergnivåer. Jorddjupsmodellen gav i många åsavsnitt i stället en förhöjd bergnivå under åsens centrala delar. I moränområden verkade däremot kopplingen mellan markytans och bergets topografi ställvis vara för svag vilket gav upphov till orimliga moränmäktigheter i högt belägna områden.

Efter import av markytans och bergytans topografi, den förenklade jordartskartan och all information om lagerföljer och jorddjup bestämdes sträckningen för de sektioner som utgör grunden för modellen. Antalet sektioner och valet av läge för dessa är av avgörande betydelse för jordlagermodellens kvalitet. Det gäller att i första skedet utnyttja alla tillgängliga data, men också att i nästa skede lägga ut sektioner i områden där informationen är bristfällig för att kontrollera och vid behov korrigera resultatet av modellinterpolationen. För detta krävs god kunskap om områdets geologi. Eftersom jordlagermodellen skulle utgöra underlag för en matematisk grundvattenmodell var det särskilt viktigt att kontrollera att modellinterpolationerna inte gav upphov till fiktivt höga berggrundslägen som skar av grundvattenflödet i åsen. Arbetet med sektionerna var tidskrävande. Tolkningen kvalitetskontrollerades genom granskning av alla sektioner av flera personer med goda kunskaper om områdets geologi och justeringar gjordes till konsensus nåddes.

En generell erfarenhet från arbetet är att det förutom en gedigen kunskap om modellområdets geologi är viktigt med en väldefinierad arbetsgång och kvalitetskontroll i varje steg.

Den framtagna modellen kan användas i den fysiska planeringen, till exempel vid bedömning av grundvattnets sårbarhet och skyddsbehov vid olika typer av exploatering. Kunskaper och förståelse gällande jordlagerförhållandena på djupet är viktiga för att kunna bedöma påverkan på grundvattennivåer, grundvattenflöden och grundvattenkvaliteten, till exempel vid inläckage till undermarkskonstruktioner, borttagning eller punktering av tätande jordlager och vid olika typer av utsläpp av förorenande ämnen. Sektioner, kartor och 3D-illustrationer kan enkelt visas och exporteras från modellen för att användas vid presentationer och som discussionsunderlag och beslutsstöd.

Ett av huvudsyftena i den här presenterade studien var att få fram en jordlagermodell som kunde användas vid matematisk grundvattenmodellering där kontinuerliga lager krävdes. En procedur som utvecklades i ArcGIS möjliggjorde en effektiv överföring av de GRID-filer för jordlagren som exporterades från SubsurfaceViewer till ett format som direkt kunde importeras till grundvattenmodellen (Feflow 6.2).

En slutsats är att det tillämpade arbetssättet, inkluderande modelleringsverktyget SubsurfaceViewer, erbjuder en framkomlig väg för att skapa 3D-modeller för användning som underlag för grundvattenmodellering med Feflow samt för att visualisera Uppsalaåsens geologiska uppbyggnad.

REFERENSER

- Ahlgren, S., 1971: *Uppsala vattenförsörjning. Ungefärliga bergnivåer i Uppsalaområdet*. Uppsala kommun, Gatukontoret.
- Daniels, J. & Thunholm, B., 2014: Rikstäckande jorddjupsmodell, *SGU-rapport 2014:14*. Sveriges geologiska undersökning.
- INSIGHT Geologische Softwaresysteme GmbH, 2014: *Manual Subsurface XL and Subsurface MX 6.0*. INSIGHT Geologische Softwaresysteme GmbH
- Lundin, S.-E., 1988: *Ingenjörsgelogisk karta över Uppsala*. Bjerking's ingenjörbyrå AB och Kvartergeologiska avdelningen, Uppsala Universitet.
- Möller, H., 1993: Beskrivning till jordartskartan Uppsala NV, *Ae II3*. Sveriges geologiska undersökning.
- Pasanen, A. H. & Okkonen, J. S., 2016: *3D geological models to groundwater flow models: data integration between GSI3D and groundwater flow modelling software GMS and FeFlow*. The Geological Society of London.
- Peterson, G., Jirner, E., Karlsson, C. & Engdahl, M., 2014: Tredimensionella jordartsmodeller – programvara och metoder. *SGU-rapport 2014:33*. Sveriges geologiska undersökning.
- SGU, 1993: Jordarter – databas 1:25000–1:100000, Uppsala. sgudb-jorddb-jogi
- SGU, 2015: Grundvattenmagasin – databas 1:50000–1:250000, Uppsala. sgudb-hmag.