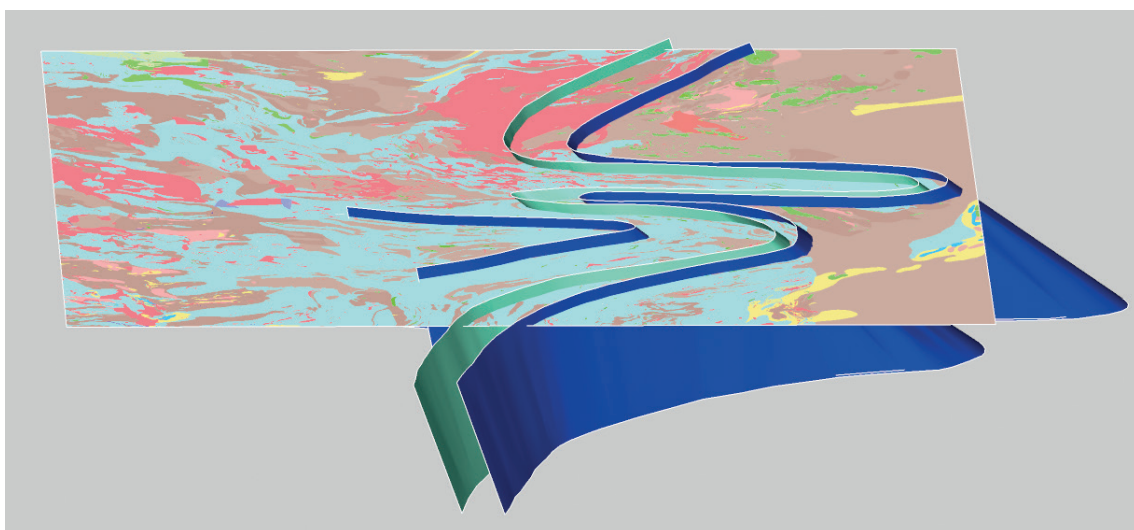


Stockholmsområdets berggrund, jordarter, geologiska utveckling och erfarenheter från infrastrukturprojekt

Carl-Henric Wahlgren, Kristian Schoning,
Mats Tenne & Lars M Hansen

maj 2018

SGU-rapport 2018:o8



SGU

Sveriges geologiska undersökning

Omslagsbild: Schematisk 3D-modell av den regionala veckningen i Stockholmsområdet. Modellen är framtagen på SGU.

Författare: Carl-Henric Wahlgren
och Kristian Schoning, Sveriges
geologiska undersökning.
Mats Tenne, Geokonsult Tenne AB.
Lars M Hansen, LarsMærsk Bergråd.

Granskad av: Philip Curtis, Claes Mellqvist och Gustav Sohlenius.

Ansvarig enhetschef: Lars Rodhe.

Projektnamn: Byggnadsgeologisk karta Stockholm.

Projekt-id: 873327.

Layout: Johan Sporrang, SGU.

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

Denna rapport utgör ett komplement till den uppdaterade byggnadsgeologiska kartan över Stockholmsområdet som finns på Sveriges geologiska undersöknings webbplats (www.sgu.se). Innehållet är baserat på tillgänglig intern (SGU) och extern geologisk information. Syftet med rapporten är att ge en kortfattad beskrivning av de berggrundsgeologiska och jordartsgeologiska förhållandena, samt den geologiska utvecklingen i Stockholmsområdet. Rapporten är uppdelad i två huvudkapitel där det första behandlar berggrundsgeologin och det andra jordartsgeologin. Därefter följer två bilagor som redogör för erfarenheter från infrastrukturprojekt i Stockholmsområdet. I rapporten har ansvarsfördelningen i huvudsak varit följande:

Carl-Henric Wahlgren – berggrundsgeologi

Kristian Schoning – jordartsgeologi

Mats Tenne och Lars M Hansen – erfarenheter från infrastrukturprojekt

Behovet av kunskap rörande de jordartsgeologiska förhållandena och förståelsen av interaktionen med grundvattnet är väletablerad. En tidigare brist på förståelse av betydelsen av denna interaktion resulterade i betydande sättningar i marken och förstörd infrastruktur vilket fick dyrbara konsekvenser i Stockholm. På samma sätt är kunskapen om de geologiska förhållandena och berggrundens plastiska och framförallt spröde-tektoniska utveckling en hjälp för att förstå och förutsäga bergstabilitet och grundvattenrörelser vilket framgår av nedanstående citat från boken "Hydrogeologi för bergbyggare" (Gustafson 2009):

"Den geologiska historien

För att förstå spricksystemets inverkan på hydrogeologin kan det vara bra att tänka på att:

- *Ju äldre berget är desto fler perioder med sprickbildning har det varit med om.*
- *Vid varje tillfälle reaktiveras gamla sprickor och ett fåtal nya bildas.*
- *Ju längre sprickzonerna och sprickorna är desto större rörelser har de som regel tagit upp. Deras uppbyggnad är som regel också mer komplex.*
- *Förståelse för varför spricksystemet ser ut som det gör får man bäst genom att analysera den geologiska historien"*

Ett av SGUs pågående uppdrag är att förbättra kunskapen om och förståelsen av de geologiska förhållandena i Stockholm. Syftet är att bättre kunna förse samhället med bästa möjliga information, där inte minst bergbyggnadsbranschen utgör en viktig del. Med detta i åtanke välkomnar vi synpunkter på rapporten, samt även geologisk information från infrastrukturprojekt som kan bidra till våra egna geologiska tolkningar och modeller.

Tack riktas till Philip Curtis och Claes Mellqvist för granskning av den berggrundsgeologiska och Gustav Sohlenius för granskning av den jordartsgeologiska delen av rapporten. Claes Mellqvist och Susanne Grigull har även varit behjälpliga med att ta fram figurer. Björn Lund (Uppsala universitet) har varit behjälplig med informationen om recent seismicitet.

Innehåll

Förord	3
Berggrundsgeologi	7
Berggrundskartor över Stockholm.....	7
Regionalgeologisk bakgrund.....	7
Bergarter i Stockholmsområdet.....	9
Ytbergarter.....	9
Intrusivbergarter.....	9
Amfibolit (metadiabas).....	11
Diabaser.....	12
Berggrundens homogenitet.....	13
Naturlig gammastrålning.....	13
Deformation.....	14
Inledning.....	14
Plastisk deformation.....	15
Plastiska deformationszoner.....	20
Spröd deformation.....	22
Sprickzoner–förkastningar.....	24
Sprickor.....	28
Sen- till postglacial deformation.....	34
Bergspänningar.....	34
Regionalt spänningsfält.....	34
Lokalt spänningsfält.....	36
Recent seismicitet.....	37
Framtida berggrundsgeologiska arbeten av vikt i Stockholmsområdet.....	39
Jordartsgeologi	40
Regionalgeologisk bakgrund.....	40
Isavsmältningen.....	41
Östersjöns utveckling och nivåförändringar.....	42
Jordtäcket och dess landformer.....	42
Morän.....	44
Isälvsavlagringar.....	45
Finkorniga glaciala sediment.....	46
Postglaciala finsediment.....	47
Skred och raviner.....	48
Svallsediment.....	48
Torv.....	49
Referenser	49
Bilaga 1. Ingenjörsgelogiska erfarenheter från 50 år med geologi och bergarbeten i Stockholmstrakten	
Bilaga 2. Erfarenheter av byggnadsgeologiska arbeten i Stockholmsområdet	

BERGGRUNDSGEOLOGI

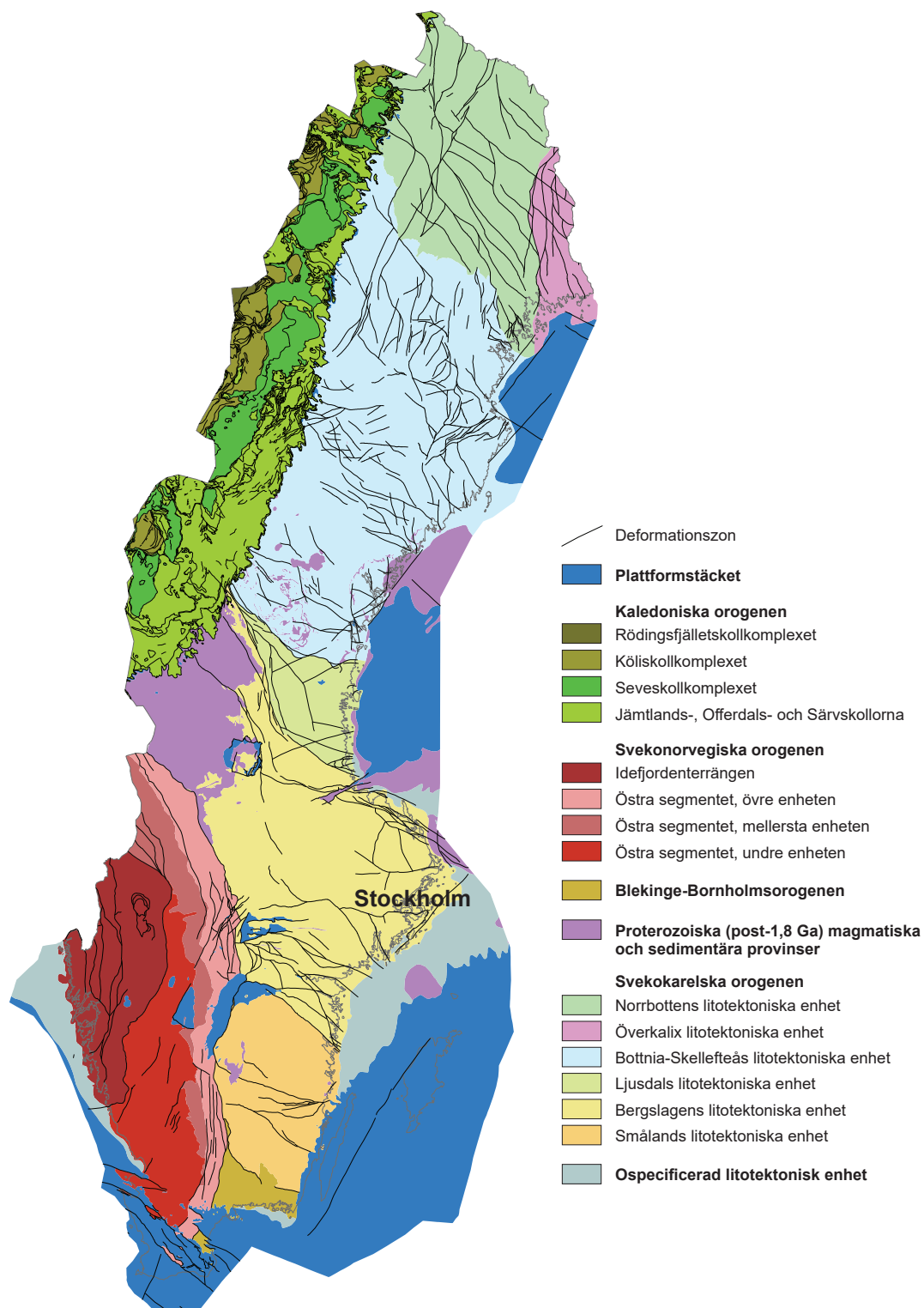
Berggrundskartor över Stockholm

Den äldsta geologiska kartan över Stockholmsområdet är en kombinerad jordarts- och berggrundsgeologisk karta från andra hälften av 1800-talet (Fries m.fl. 1863). En berggrundskarta i skala 1:60 000 över sydöstra delen av Stockholms skärgård med tillhörande beskrivning presenterades av Sundius (1939), och senare publicerades även en berggrundskarta i skala 1:50 000 med tillhörande beskrivning över Stockholmstrakten (Sundius 1948). Kombinerade jord- och berggrundskartor i skala 1:50 000 över Stockholm NO, NV, SO, SV är beskrivna av Möller & Stålhös (1964, 1965, 1969a, b). Berggrunden inom de fyra kartbladen Stockholm är sammanställd i skala 1:100 000 (Stålhös 1968) och beskriven av Stålhös (1969). I samband med att en bergkvalitetskarta över kartbladen Stockholm NO, NV, SO, SV (Persson m.fl. 2002) togs fram, gjordes även en uppdatering av berggrundskartan över Stockholm i skala 1:100 000 (Persson m.fl. 2001). Uppdateringen är grundad på nya fältarbeten och tillgång till ett modernt flygeofysiskt underlag. Bägge berggrundskartorna över Stockholm (Stålhös 1968, Persson m.fl. 2001) finns som tryckta produkter. Den nyare kartan (Persson m.fl. 2001) finns även i vektoriserat digitalt format, medan den äldre kartan (Stålhös 1968) endast finns att tillgå som digitala rasterfiler (till exempel PDF eller TIFF).

Förutom de ovan nämnda berggrundskartorna över Stockholmsområdet finns även en sammanställning i skala 1:250 000 att tillgå som PDF-fil (Wik m.fl. 2004), samt översiktlig information som kan fås via kartgeneratoren och kartvisaren på SGUs webbplats (www.sgu.se).

Regionalgeologisk bakgrund

Berggrunden i Stockholmsområdet tillhör den så kallade svekokarelska orogenen (fig. 1) vilken är ett resultat av en 2,0–1,8 miljarder år gammal orogenes (bergskedjebildning), under vilken den dominerande delen av berggrunden i östra Sverige bildades och i varierande grad omvandlades och deformerades. Den svekokarelska orogenen kan delas in i olika litotektoniska enheter, vilka är åtskiljda sinsemellan beroende på olikheter i berggrundens ursprung, och strukturell, metamorf och kronologisk utveckling inom det orogena bältet (fig. 1). De litotektoniska enheterna är i de flesta fall avgränsade av regionala deformationszoner (bälten). Som framgår av figur 1 tillhör Stockholmsområdets berggrund Bergslagens litotektoniska enhet.



Figur 1. Indelning av Sveriges berggrund i orogener, litotektoniska enheter samt proterozoiska (post-1,8 Ga) och neo- till fanerozoiska bergarter (SGUs berggrundsgeologiska kartdatabas 1:1 miljon). En 3D-modell som är baserad på figuren ovan presenteras i kartvisarna "Bergets ålder" och "Berggrund 1:1 miljon" på SGUs webbplats (www.sgu.se). Den tredimensionella modellen är även publicerad på SGUs webbplats i 3D-kartverktyget City Planner.

Bergarter i Stockholmsområdet

Ytbergarter

Berggrunden i Stockholmsområdet, framför allt den centrala och södra delen, domineras av 1,9 miljarder år gamla metasedimentära bergarter (ljusblå i fig. 2), vars ursprungsmaterial utgjorts av leriga till sandiga sediment. Proportionerna mellan glimmer och kvarts-fältspat varierar och bergarterna är vanligtvis kraftigt omvandlade och har genomgått mer eller mindre kraftig partiell uppsmältning, varför migmatitiska varianter dominerar (fig. 3A). Ådringen definieras av ljusa kvarts- och fältspatdominerade band till ådror omväxlande med mörkare glimmerrika band. De kvarts-fältspatdominerade metasedimentära bergarterna (metagråvacka) är som regel mer välbevarade och inte lika kraftigt migmatitomvandlade som de glimmerrika bergartsleden (metargillit).

Metavulkaniska bergarter (gult i fig. 2) som är 1,9 miljarder år gamla utgör underordnade inslag i Stockholmsområdets berggrund. De består i första hand av kvarts-fältspatrika och skiktade avlagringar, och förekomsterna är koncentrerade till Stockholms skärgård i ett nordöstligt orienterat stråk från Utö i sydväst, över Ornö, och vidare mot nordöst över Nämndö och Runmarö (fig. 2). Metavulkaniterna är vanligtvis associerade med kristallin kalksten (mörkblå i fig. 2), till exempel på Utö, Nämndö och Runmarö, och är ställvis även malmförande. Den kristallina kalkstenen bildar sällan några större mäktigheter utan utgör i allmänhet endast några tiotals meter tjocka inlagringar. På den äldre berggrundskartan över Stockholm (Stålhös 1968) finns ett antal områden som är markerade som metavulkanit, till exempel norr och nordväst om Vaxholm, på Lovön och söder om Tullinge. På berggrundskartan av Persson m.fl. (2001) har dessa och övriga metavulkaniska bergarter, förutom de i Stockholms skärgård, omtolkats till att utgöra fin- till fint medelkorniga granitoider, det vill säga att inte vara av vulkaniskt ursprung.

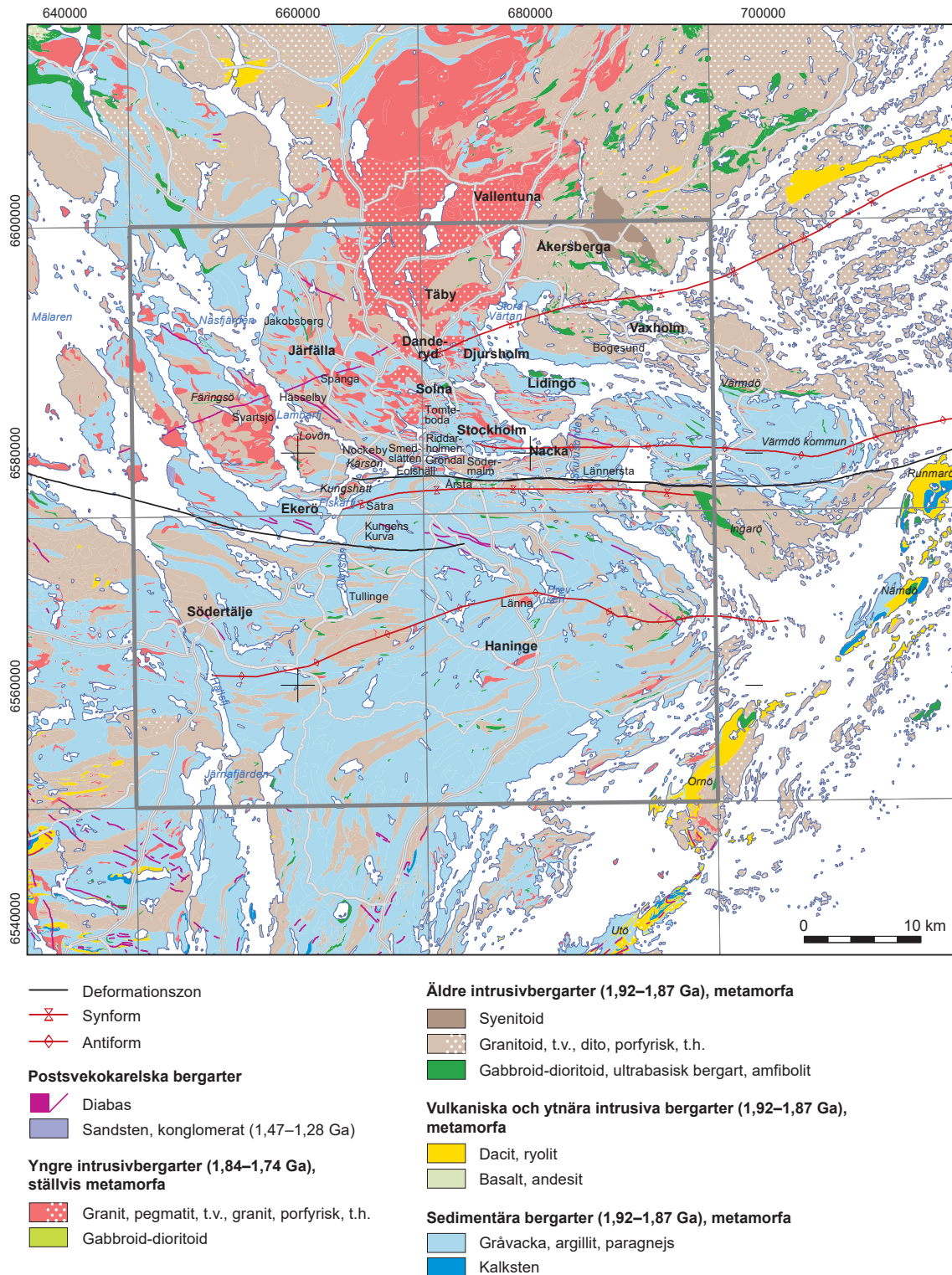
Den yngsta ytbergarten i Stockholmsområdet utgörs av 1,5–1,3 miljarder år gammal sandsten (mellanblå i fig. 2), så kallad mälarsandsten. Den återfinns på nordvästra Ekerön, där även konglomerat förekommer, samt på några små öar västerut i Mälaren.

Intrusivbergarter

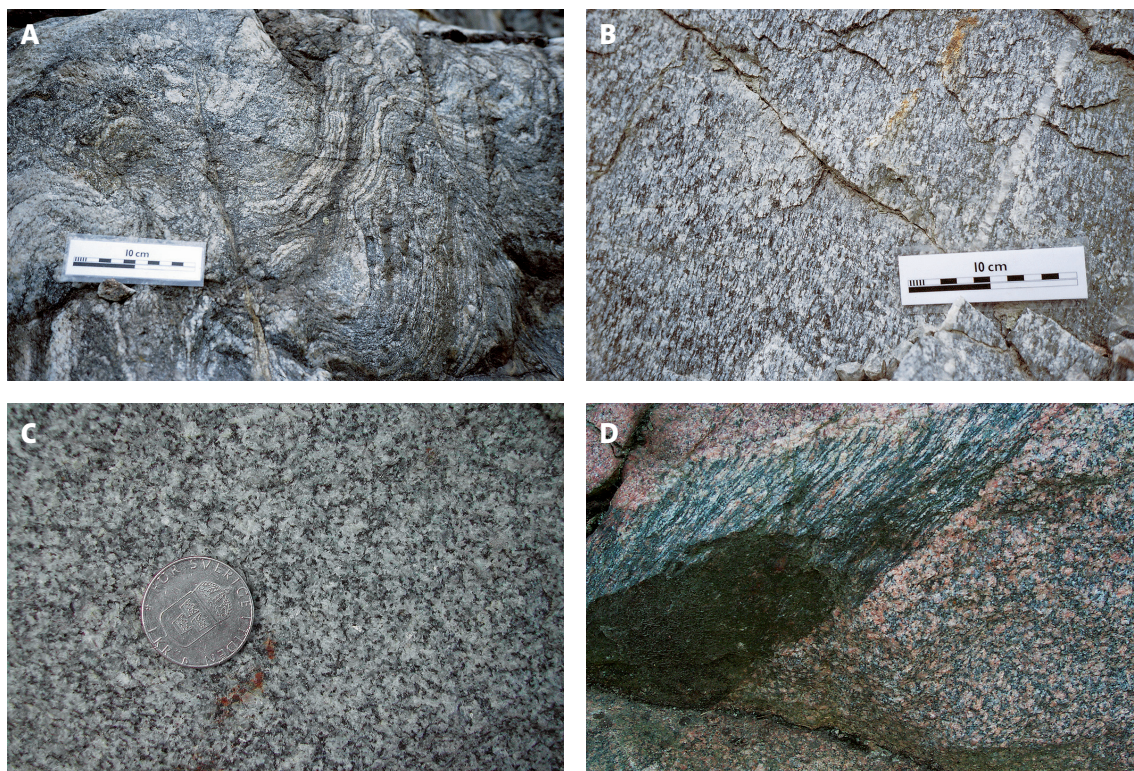
Vid sidan av de metasedimentära bergarterna utgör 1,9 miljarder år gamla omvandlade och deformerade granitoider, så kallade metagranitoider (fig. 3B), en dominerande bergartsgrupp i Stockholmsområdet (ljusbrunt i fig. 2). Metagranitoiderna har intruderat ytbergarterna och granitiska till granodioritiska sammansättningar är vanligast förekommande, men granodioritiska till tonalitiska förekommer också, till exempel på norra Lidingö och i området norr och väster om Danderyd. Metagranitoiderna är liksom de metasedimentära bergarterna mer eller mindre kraftigt omvandlade och deformerade, är gnejsiga till karaktären och ställvis ådergnejsomvandlade. Som framgår av figur 2 har de ofta formen av mer eller mindre långa, utdragna kroppar, förutom i den norra delen där de utgör större sammanhängande massiv. Inneslutningar av de metasedimentära bergarterna är frekvent förekommande i metagranitoiderna, framförallt i den södra till sydöstra delen av Stockholmsområdet. Kvarts utgör ett väsentligt mineral i metagranitoiderna, men i trakten av Åkersberga, strax norr om Stockholm, förekommer en kvartsfattig variant, en så kallad syenitoid (mörkbrun i fig. 2).

Associerade med metagranitoiderna är spridda förekomster av vanligtvis relativt små kroppar av mafiska bergartsled som varierar i sammansättning från ultrabasit till kvartsdiorit (mörkgrönt i fig. 2). I trakten av Vaxholm i nordöstra delen av kartområdet Stockholm NO utgör dock mer eller mindre stora kroppar av mafiska bergarter ett viktigt inslag i den för övrigt metagranitoiddominerade berggrunden.

I norra delen av Stockholmsområdet utgör yngre 1,8 miljarder år gammal granit (röd i fig. 2) ett väsentligt inslag i berggrunden, medan yngre granit är helt underordnade i södra delen. De yngre



Figur 2. Översiktlig berggrundskarta över Stockholmsområdet. Det ljusgrå rutnätet enligt koordinatsystemet RT90, med de fyra kartområdena Stockholm NV, SV, NO och SO inom den kraftigare grå ramen. Koordinaterna i den yttre ramen enligt SWEREF 99 TM.

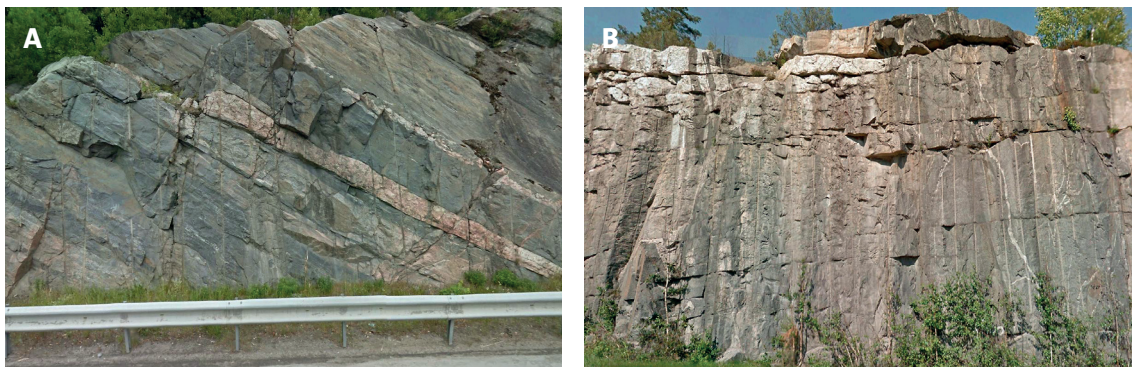


Figur 3. Exempel på bergarter från Stockholmsområdet (Wik m. fl. 2004). **A.** Metasedimentär ådergnejs. Foto: Malin Sträng. **B.** Metagranitoid. Foto: Malin Sträng. **C.** Yngre granit ("Stockholmsgranit"). Foto: Benno Kathol. **D.** Småporfyrisk yngre granit från Täby–Vallentunaområdet i kontakt med kraftigt deformerad metagranitoid. Foto: Lars Persson.

graniterna är övervägande grå, men röda varianter förekommer också. De är vanligtvis mer eller mindre massformiga men är ställvis folierade. Två varianter av yngre granit förekommer: den ena är jämnkornig, fin- till medelkornig, så kallad Stockholmsgranit (fig. 3C), medan den andra är medelkornig och småporfyrisk. Den jämnkorniga förekommer som mer eller mindre långsträckta eller irreguljära kroppar i de kraftigt omvandlade metasedimentära bergarterna i till exempel Djurholm–Solna–Järfällaområdet och i metagranitoiderna på till exempel Lovön och södra delen av Svartsjölandet. De yngre graniterna har intruderat efter huvudfasen av deformationen, men de långsträckta formerna och att de ställvis är folierade samt indragna i deformationsmönstret antyder att graniterna intruderat i slutfasen av deformationsutvecklingen. Den porfyriska varianten utgör huvudsakligen större massiv i Täby–Vallentunaområdet (fig. 2 och 3D). Associerade med de yngre graniterna är gångar av aplit och pegmatit (fig. 4A) vilka lokalt utgör frekventa inslag i de äldre bergarterna. Pegmatiterna förekommer även som oregelbundna mindre kroppar.

Amfibolit (metadiabas)

Mafiska bergarter i form av amfibolitiska linser, band och gångar utgör ett frekvent inslag i de metasedimentära och metagranitoida bergarterna i Stockholmsområdet (fig. 4B). Amfiboliterna förekommer i första hand inom kartområdet Stockholm NO och har en dominerande öst–västlig orientering (Stålhös 1969). Åldersbestämningar av amfiboliter (metadiabas) i nordöstra Uppland har givit åldrar på 1,89 och 1,87–1,86 miljarder år (Hermansson m.fl. 2008, Stephens m.fl. 2009).



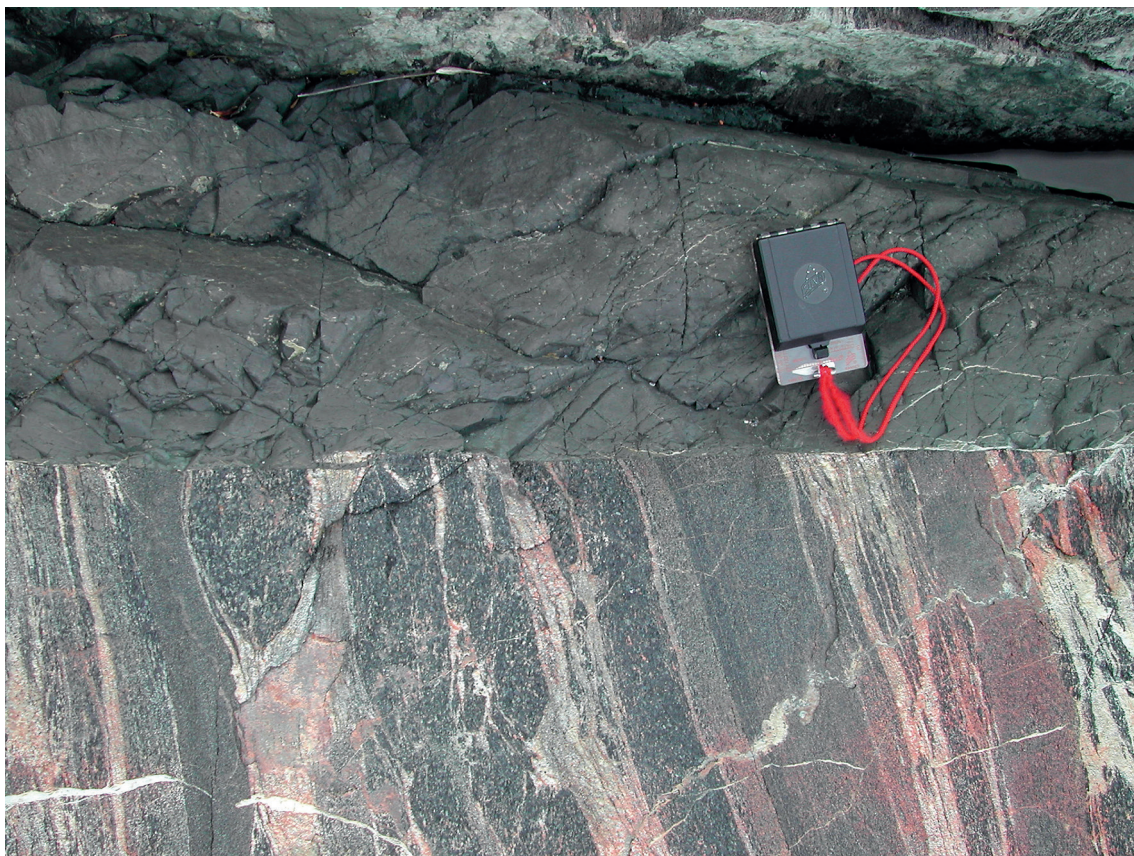
Figur 4. A. Pegmatit som är svagt diskordant mot foliationen i sidoberget. Foto: Google Maps. B. Amfibolit (mörkare inslag i den vänstra delen av bilden) i den gnejsiga berggrunden utmed Saltsjöbadsleden. Foto: Google Maps.

Diabaser

Gångar till mindre svärmar av diabas förekommer spritt inom Stockholmsområdet (lila i fig. 2 och fig. 5). De är vanligtvis några decimeter till ett par meter breda, men maximalt kan de vara upp till 50 m breda, och flertalet är i det närmaste vertikala. Den dominerande strykningens riktning är nordvästlig till västnordvästlig, men även nordnordvästliga diabaser är relativt vanligt förekommande (Stålhös 1969). Nordöstligt orienterade diabaser förekommer också men är helt underordnade. Eventuellt utgör de olika strykningstrenderna olika generationer. Huvuddelen av diabaserna är orienterade mer eller mindre parallellt med de dominerande sprickzonerna i berggrunden, framförallt de nordvästliga diabaserna (Stålhös 1969). Åldern på diabaserna är oklar men de har intruderat efter det att berggrunden stabiliserats efter den svekokarelska orogenesen. Eventuellt kan de jämföras tidsmässigt med den så kallade Mackmyradiabasen som slår igenom den jotniska sandstenen i Gävleområdet och som har daterats till 1,26 miljarder år (Söderlund m.fl. 2006).

En ihållande, lång diabasgång förekommer från Spångaområdet i västsydvästlig riktning genom Färingsö (fig. 2). Diabasgången är aldrig observerad i håll inom Stockholmsområdet, men är tydligt indikerad som en distinkt linjär positiv magnetisk anomali i den vänstra centrala delen av figur 6 och 7. Diabasen är inte markerad på den äldre berggrundskartan (Stålhös 1968), men däremot på den uppdaterade berggrundskartan (Persson m.fl. 2001). Markmagnetiska mätningar sydväst om Färjestaden på Färingsö indikerar att diabasen där är 40 m bred och stupar brant mot söder (Persson m.fl. 2001). Den magnetiska anomalibilden indikerar att diabasgången är uthållig, åtminstone diskontinuerligt, och kan följas i tiotals kilometer i västsydvästlig riktning.

De äldsta bergarterna som bildades och fick sin karaktär i samband med den svekokarelska orogenesen har sinsemellan mestadels läkta kontakter. De mycket yngre diabaserna, som förenklat kan sägas utgöra en typ av sprickfyllnad, har däremot ofta mer eller mindre uppspruckna kontakter mot sidoberget (fig. 5). På motsvarande sätt uppvisar även metadiabaser som har kvar mycket av sin ursprungliga karaktär och även posttektoniska (klippande) gångar av granit och pegmatit liknande kontaktförhållanden mot sidoberget. Förekomst av gångbergarter, framförallt diabaser, är därmed viktigt att beakta vid byggnationer i berggrunden, då de kan utgöra en instabilitet, vara vattenförande i kontaktzonerna mot sidoberget, men också utgöra hydrauliska barriärer tvärs diabasens utsträckning.



Figur 5. Diabas som klipper bandad gnejs vid Sjöstugan, NV Sorunda, Nynäshamns kommun. Notera den övre uppspruckna kontakten. Foto: Claes Mellqvist.

Berggrundens homogenitet

Berggrundens litologiska homogenitet är beroende av i vilken skala den betraktas. Berggrundsområden som lokalt är kraftigt inhomogena, det vill säga uppvisar stora bergartsvariationer, sammansättningsvariationer, grad av åderbildning, förekomst av diabaser, hög frekvens av inneslutningar etcetera, kan i översiktlig skala bedömas som "homogent inhomogena". Metagranitoiderna och de yngre graniterna i den nordligaste delen av Stockholmsområdet utgör en mer homogen berggrund var för sig än berggrunden i den centrala och södra delen (fig. 2). Generellt sätt är de metasedimentära bergarterna mer inhomogena än metagranitoiderna på grund av mer eller mindre kraftig åderbildning, förekomst av mafiska band-linser, samt aplit-, pegmatit- och granitgångar. I den södra delen av området innehåller även metagranitoiderna frekventa inneslutningar av mafiska och metasedimentära bergarter, aplit-, pegmatit- och granitgångar, samt är lokalt även ådergnejsiga till migmatitiska. Betydelsen av berggrundens inhomogenitet måste dock bedömas från fall till fall.

Naturlig gammastrålning

Den naturliga gammastrålningen baseras på flygburna radiometrisk mätningar och uppföljningar på hållar med gammaspektrometer. Mätningarna ger den totala gammastrålningen, samt halterna av kalium, uran och torium. Radiumindex är ett mått på radiumhalten i ett material och beräknas genom bestämningen av urankoncentrationen. 1 ppm uran motsvarar en aktivitets-

koncentration av 12,35 Bq/kg uran-238 och 12,35 Bq/kg radium-226. En äldre rekommendation från de nordiska strålskyddsmyndigheterna (Strålskyddsmyndigheterna i Danmark, Finland, Island, Norge och Sverige 2000) anger att radiumindex för ett byggnadsmaterial bör vara mindre än 1,0, vilket motsvarar 16,2 ppm uran eller 200 Bq/kg ^{226}Ra . I dag används ett aktivitetsindex för att uppskatta den totala gammastrålningen från ett material (bergart). Aktivitetsindex (AI) beräknas ur aktivitetskoncentrationerna av ^{40}K , ^{226}Ra (^{238}U) och ^{232}Th enligt:

$$C_K/3000 + C_{Ra}/300 + C_{Th}/200$$

där C_K = aktiviteten av kalium i Bq/kg. 1 % K = 313 Bq/kg K-40,

C_{Ra} = aktiviteten av radium i Bq/kg. 1 ppm U = 12,35 Bq/kg Ra-226, och

C_{Th} = aktiviteten av torium i Bq/kg. 1 ppm Th = 4,06 Bq/kg Th-232.

Formeln för aktivitetsindex är beräknad så att stråldosen från en byggnad med golv, väggar och tak, konstruerade av ett material med AI=1, till en person som bor där säkert ska understiga 1 mSv/år. Detta är referensdosen för gammastrålning från byggnadsmaterial enligt den nya strålskyddslagstiftningen. Det bör noteras att ett högt aktivitetsindex inte nödvändigtvis motsvaras av ett högt radiumindex, då orsaken till högt aktivitetsindex kan vara till exempel hög toriumhalt i bergarten. För vidare information om strålning från bergmaterial, se Jelinek & Eliasson (2015).

Den varierande berggrunden inom Stockholmsområdet återspeglas i variationen i den naturliga radioaktiva gammastrålningen. De ådergnejsiga till migmatitiska metasedimentära bergarterna uppvisar en mycket varierande gammastrålning. I första hand är det de granitiska ådrorna som har en högre strålning men variationen är stor. De bergarter som framför allt ger upphov till högre radium- och aktivitetsindex är de yngre graniterna, till exempel den stora granitkroppen i Täby–Rotebro–Vallentunaområdet, samt pegmatiter, apliter och granitiska ådror i de ådergnejsomvandlade bergarterna, i första hand i de metasedimentära bergarterna, men även mindre områden som domineras av metagranitoider. På berggrundskartan (Persson m.fl. 2001) och bergkvalitetskartan över Stockholm (Persson m.fl. 2002) redovisas radiumindex som medelvärde och standardavvikelse för de olika bergartsgrupperna baserat på spridda mätningar. Vidare redovisas mätpunkter, samt ett litet område i nordvästligaste delen av Färingsö, där radiumindex är större än 1,0. Beroende på den ojämna frekvensen av underordnade bergarter, såsom ådror, pegmatit-, aplit- och granitgångar, i de dominerande bergarterna måste frekvensen av underordnade bergarter beaktas när radonriskbedömning görs för en specifik bergvolym, till exempel vid undermarksprojekt eller bedömning av användning av berggrunden som ballast för husbyggnadsbetong.

Deformation

Inledning

Deformationen av berggrunden kan delas in i tre huvudtyper: plastisk, spröd-plastisk och spröd. Den plastiska deformationen kan vara av regional och genomgripande karaktär, till exempel gnejsighet, men kan också vara koncentrerad till zoner, så kallade plastiska deformationszoner (skjuvzoner). Ju högre den metamorfa graden (temperaturen) är, vilket vanligtvis är kopplat till ett större djup i jordskorpan, desto mer genomgripande är i regel deformationen.

Plastiska deformationszoner kan bildas på olika djup i jordskorpan. De kan variera i mäktighet från millimeter till flera kilometer, och då deformationen lättare ”breder ut sig” med ökad temperatur,

är zonerna oftast bredare ju högre den metamorfa graden är under deformationen. Om zonerna bildats under lägre temperatur högre upp i jordskorpan blir deformationen mer koncentrerad och zonerna är oftast smalare och mer distinkta. Förutom att utgöra distinkta individuella zoner, kan plastiska zoner också vara relaterade till veckning genom kraftig sträckning i veckbenen.

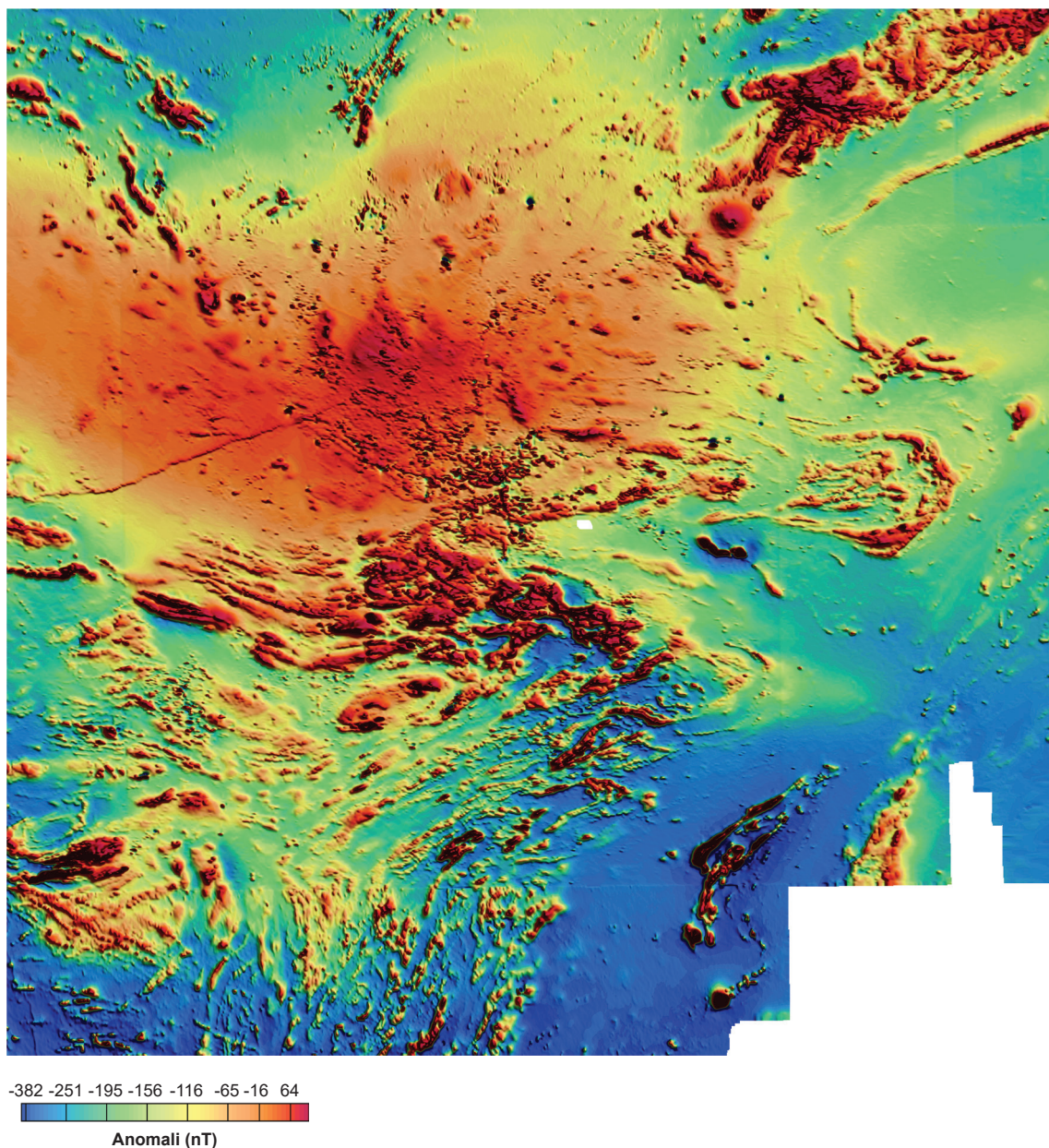
Spröd-plastiska zoner bildas på ett djup i jordskorpan där temperaturen motsvarar övergången från plastisk till spröd deformation (eng. *brittle-ductile transition*). Notera att en plastisk deformationszon som blivit reaktiverad under spröda förhållanden högre upp i jordskorpan under den efterföljande geologiska utvecklingen inte utgör en spröd-plastisk zon utan en sprött reaktiverad plastisk zon.

Spröda deformationszoner (sprickzoner, förkastningar) bildas på ett djup i jordskorpan där temperaturen är för låg för att bergarterna ska kunna deformeras plastiskt. Zonerna är oftast smalare och mer distinkta. Zoner som karaktäriseras av spröd deformation, framförallt mer ihålliga zoner av regional karaktär, utgör dock i många fall ursprungliga plastiska zoner som reaktiverats mer eller mindre kraftigt under spröda förhållanden. Spröda deformationszoner är vanligtvis mycket inhomogena och karaktären kan variera kraftigt utefter både den laterala och vertikala utsträckningen. Exempelvis är zonkärnan inte kontinuerligt bildad, övergångszonerna till det intakta berget är i regel inte symmetriskt bildade, tjockleken varierar och zonen kan dela upp sig i grenar som omsluter bättre bevarat berg inom zonen etcetera. Liksom diabaser kan spröda zoner, beroende på dess karaktär, utgöra hydrauliska barriärer tvärs zonen.

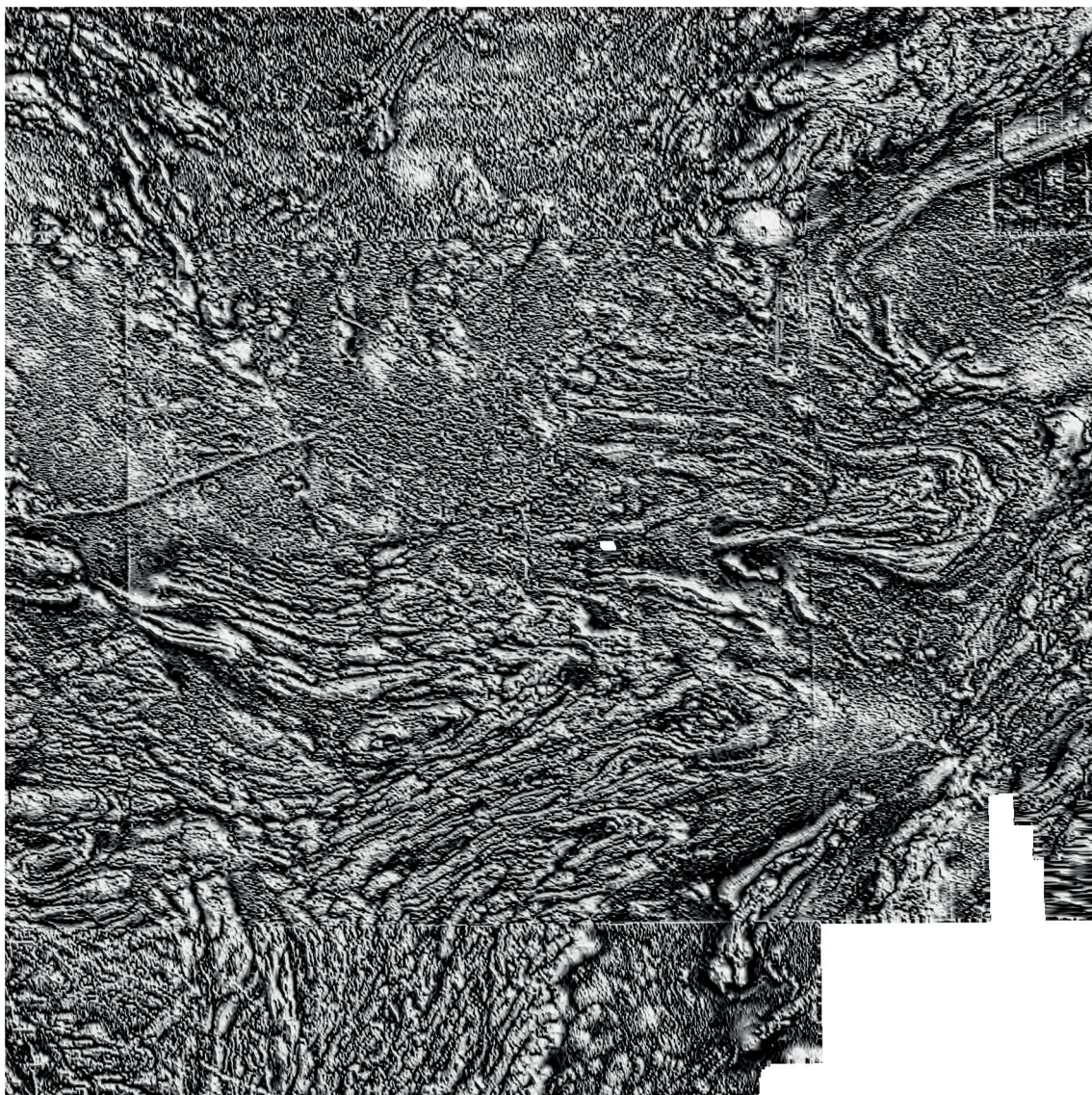
Plastisk deformation

Förutom de yngre diabaserna och den jotniska så kallade mälarsandstenen, samt till viss del även de yngre 1,8 miljarder år gamla graniterna, är alla bergarterna inom Stockholmsområdet mer eller mindre kraftigt omvandlade och deformerade. De plastiska deformationsstrukturerna i berggrunden bildades för 1,9–1,8 miljarder år sedan i samband med den svekokarelska orogenesen. Pionjärarbeten rörande synteser och modeller för den plastiska strukturella utvecklingen, baserad på detaljerad geologisk kartläggning i östra Mälardalen och angränsande områden i Uppland och Södermanland, har presenterats av Stålhös (till exempel 1969, 1976, 1991). Den plastiska strukturella utvecklingen i Stockholmsområdet och resterande delar av Bergslagens litotektoniska enhet (jämför fig. 1), omfattar i huvudsak två deformationsfaser (Stålhös 1969, 1976, 1991, Stephens m. fl. 2009). I de tektoniska modellerna i Stålhös (1969, 1976) tolkades den första veckfasen (F_1) att vara tidsmässigt associerad till bildningen av de cirka 1,9 miljarder år gamla metagranitoiderna, medan den andra veckfasen (F_2) tolkades vara bildad under högmetamorfa förhållanden i samband med den regionalmetamorfa kulminationen. I senare arbeten (Stålhös 1991) omtolkades detta och F_1 -veckningen tolkades ha ägt rum mycket senare och nära i tiden till F_2 -veckningen under den regionalmetamorfa kulminationen. Nyligen presenterade resultat från U-Pb-zirkondateringar av prover från Stockholmsområdet visar på två högmetamorfa händelser, en vid cirka 1,86 miljarder år och en vid cirka 1,84–1,81 miljarder år, där F_2 -veckningen tolkades vara relaterad till den yngre metamorfa händelsen (Stephens & Andersson 2015). Medan Stålhös (1991) tolkade det regionala strukturella mönstret som ett resultat av öst–västlig kompression, har senare arbeten i Stockholmsområdet och inom övriga delar av Bergslagens litotektoniska enhet, samt även norr och söder därom inom den svekokarelska orogenen, förklarat den komplexa strukturella utvecklingen som ett resultat av en långvarig i huvudsak nord–sydlig förkortning (kompression) av jordskorpan under den svekokarelska orogenesen (Persson & Sjöström 2002, Stephens & Wahlgren 2008, Stephens m.fl. 2009). För en mer ingående beskrivning av den plastiska strukturella utvecklingen i den strukturella domän som Stockholmsområdet tillhör hänvisas till Stephens m.fl. (2009 och tillhörande referenser).

Orienteringen av planstrukturerna i Stockholmsområdet, det vill säga gnejsighet, ådring, bandning etcetera, samt även kontakterna mellan de olika bergartsleden varierar beroende på storregional veckning, och relaterad lokal veckning, samt lokalt också genom inböjning mot plastiska deformationszoner. Linjära strukturer, det vill säga veckaxlar och lineationer, stupar däremot generellt medelbrant till flackt mot öster, förutom inom kartområdet Stockholm NV där spridningen är något större (jämför fig. 34 och 35 i Stålhös 1969). Som framgår av berggrundskartan (fig. 2) beror den regionala variationen i planstrukturernas orientering på att de utgör olika delar av en storregional mot öster stupande s-formad veckstruktur. De regionala strukturella trenderna i berggrunden framträder också tydligt i det magnetiska anomalimönstret (fig. 6, 7), och återspeglas även i topografiska data (fig. 8). Inom kartområdet Stockholm NO är huvudtrenden av planstruk-



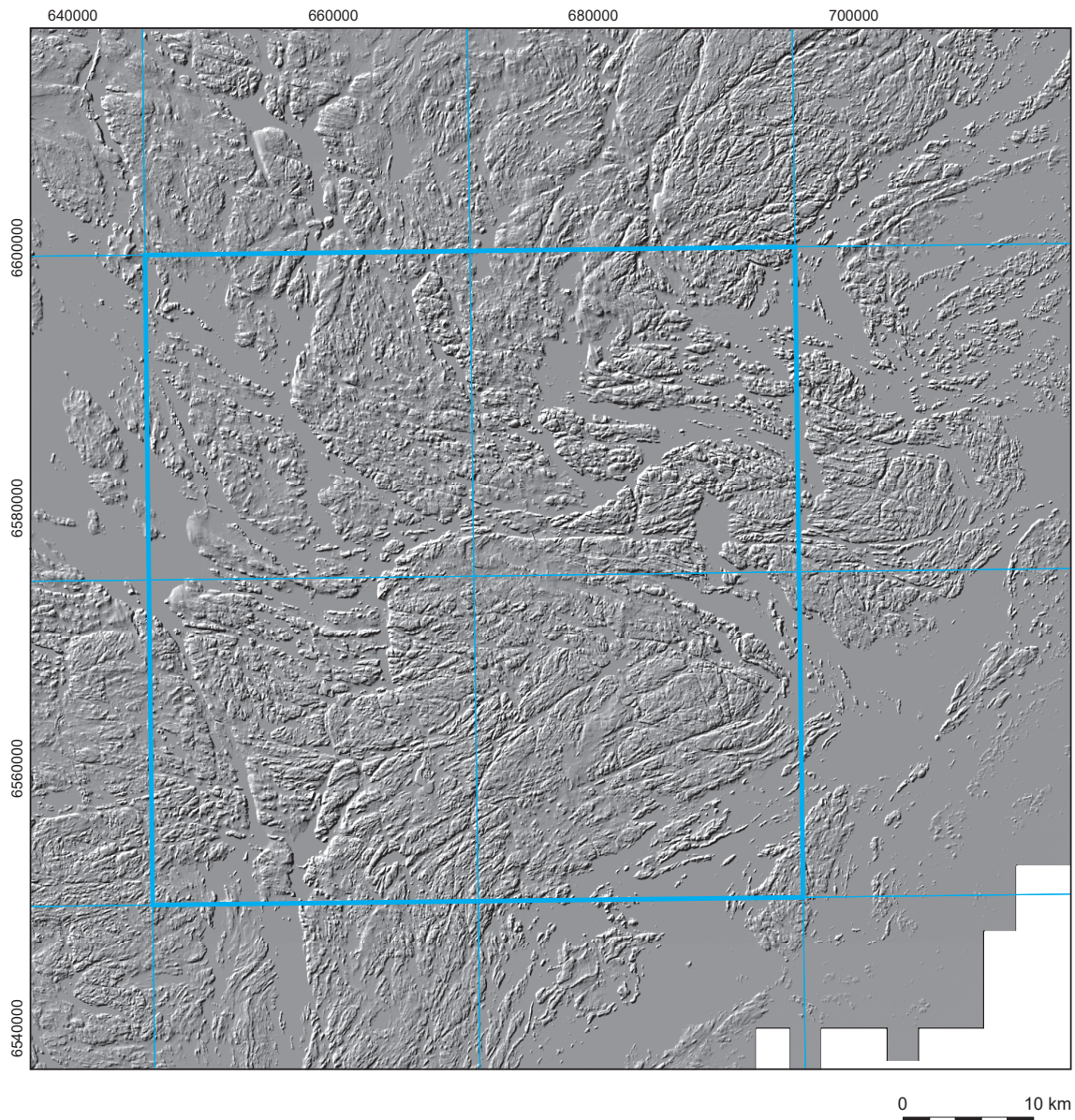
Figur 6. Magnetiskt totalfält över Stockholmsområdet. Samma kartutsnitt som berggrundskartan i figur 2.



Figur 7. Tilt derivative (TDR) av det magnetiska totalfältet. TDR framhäver svagare ytnära anomalier. Samma kartutsnitt som berggrundskartan i figur 2.

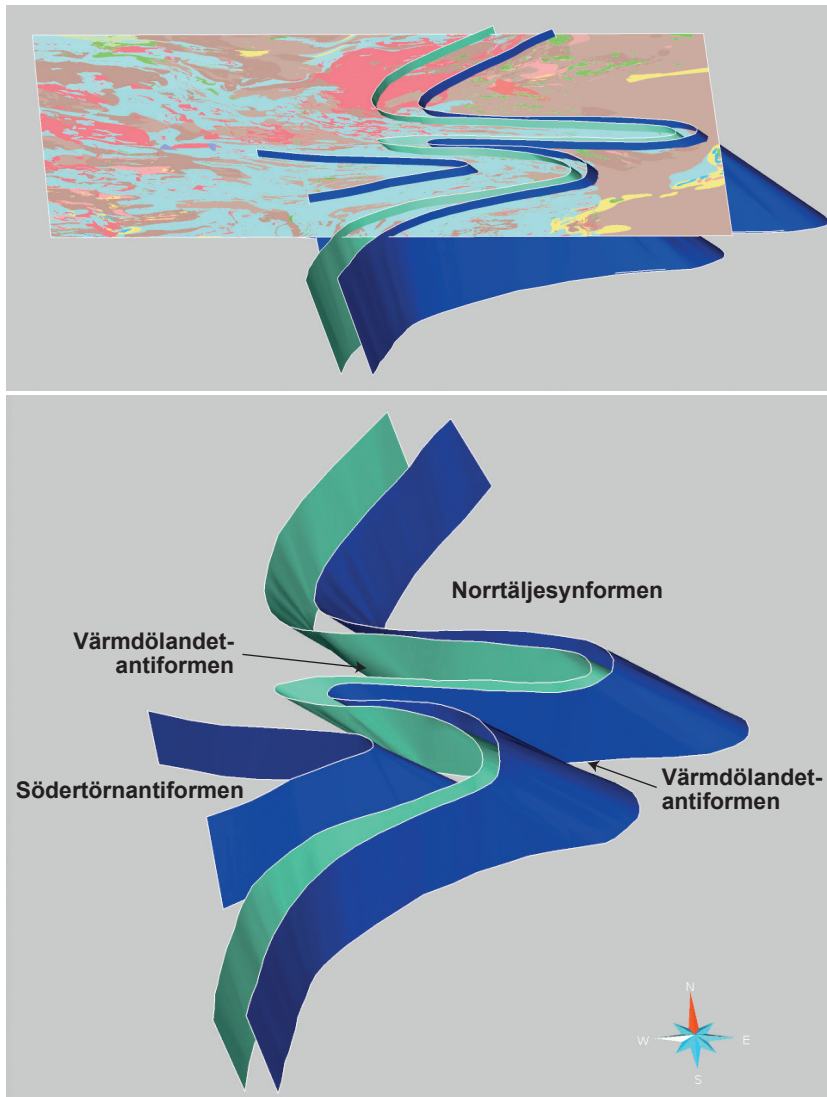
turerna västnordvästlig, men i trakten av Djurholm–Stora Värtan svänger strukturerna av mot nordöst (fig. 2, 6, 7). Notera att den yngre graniten i Täby–Rotebro–Vallentunaområdet direkt norr om omböjningen (fig. 2) delvis ”släcker ut” det bandade magnetiska anomalimönstret (fig. 6, 7). Den nordöstliga orienteringen dominerar sedan mot nordöst i Uppland och utgör den norra skänkeln i det storregionala s-vecket. Inom kartområdet Stockholm NV är planstrukturernas huvudtrend nordvästlig. Orienteringen av planstrukturerna varierar kraftigt i själva kärnan av det storregionala s-vecket i den centrala delen av Stockholm för att söderut åter ha en nordöstlig orientering, det vill säga utgör den södra skänkeln i det storregionala s-vecket.

I kärnan till det storregionala s-vecket kan ett antal öst- till östnordöstligt, medelbrant stupande antiformaler och synformer i kilometerskala urskiljas i det centrala Stockholmsområdet (fig. 2, 9), vilka är relaterade till det öst–västliga till östnordöstliga korta veckbenet i det regionala s-vecket. Från norr till söder är de individuella syn- och antiformalerna inom det storregionala s-vecket benämnda Norrtäljesynformen, Värmdölandetantiformen, Ingarölandetsynformen och Södertörn-



Figur 8. Terrängmodell över Stockholmsområdet. Lantmäteriets nationella höjdmodell med 2 m upplösning. Det blå rutnätet enligt koordinatsystemet RT90, med de fyra kartområdena Stockholm NV, SV, NO och SO inom den kraftigare blå ramen. Koordinaterna i den yttre ramen enligt SWEREF 99 TM. Samma kartutsnitt som berggrunds-kartan i figur 2.

antiformen (fig. 9, Persson & Sjöström 2002). Värmdölandetantiformen och Ingarölandetsynformen utgör mer eller mindre isoklinala (täta) veckstrukturer. Värmdölandetantiformen omfattar Solna–Nacka–Lidingö och vidare ut på Värmdölandet. Antiformens östliga omböjning följer i princip östligaste delen av Värmdölandet. Ingarölandetsynformen omfattar Enskede–Johanneshov–Saltsjöbadenområdet och vidare österut till Ingarö. Synformens västliga omböjning sker i trakten av Gröndal. Övergången mellan synformen och antiformen löper i öst–västlig riktning utefter Årstaviken–Järlasjön–Lännerstasundet och vidare österut. Det förekommer även relaterade mindre synformer och antiformer i meter–100 meterskala, vilket innebär att lokalt kan såväl planstrukturernas som bergartsledens orientering avvika mer eller mindre kraftigt från den regionala strukturella huvudtrenden (jämför fig. 3A, 10).



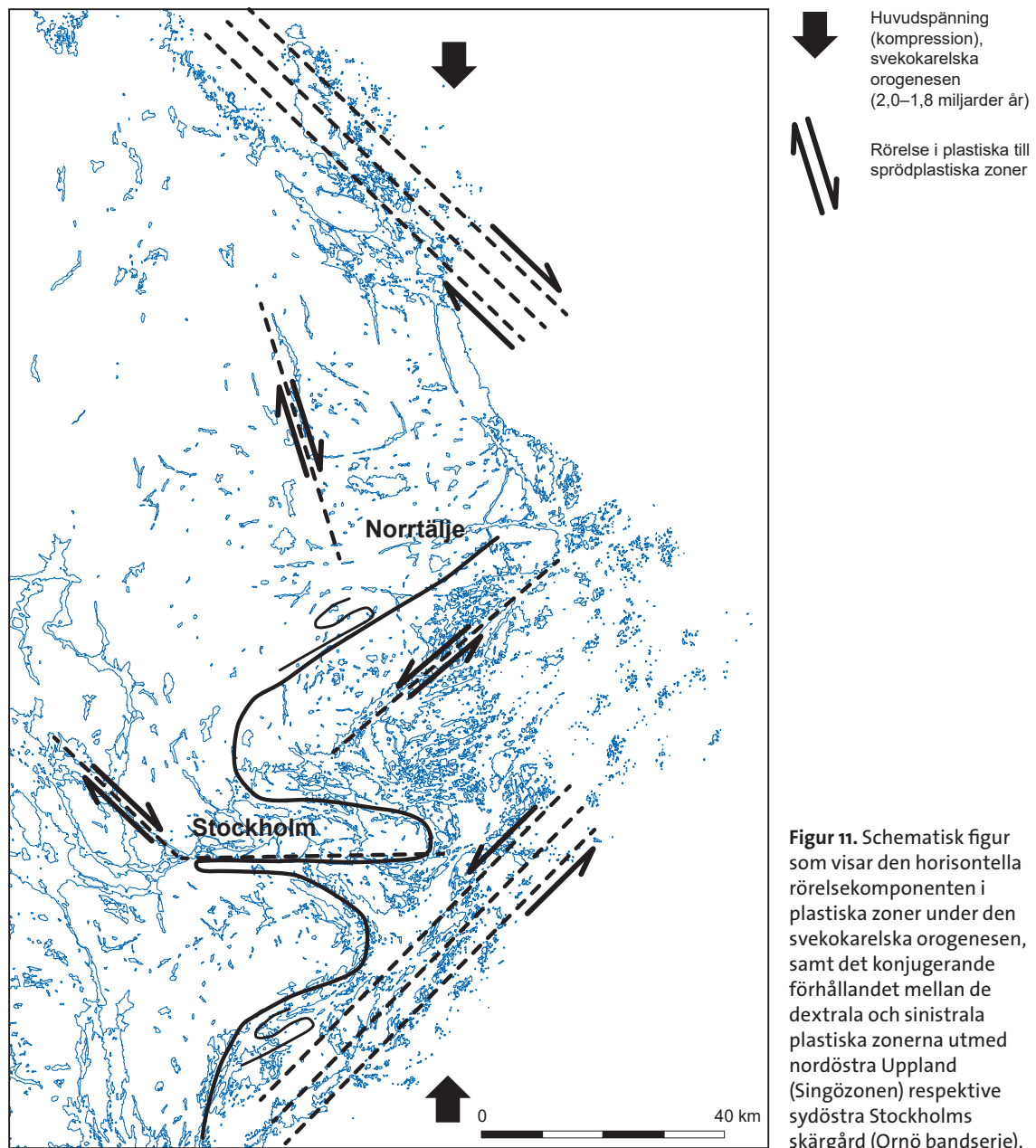
Figur 9. Schematisk tredimensionell modell av de östligt, medelbrant stupande antiformerna och synformerna i den centrala delen av Stockholmsområdet. Den tredimensionella visualiseringen är framtagen på SGU.



Figur 10. Veckning i meterskala i metasedimentär ådergnejs. Nynäsvägen i höjd med Haninge, södra Stockholm. Foto: Google Maps.

Plastiska deformationszoner

De plastiska deformationszonerna är bildade i samband med den svekokarelska orogenesisen och har sålunda en minimiålder på cirka 1,8 miljarder år. Den mest framträdande plastiska deformationszonen i Stockholmsområdet utgörs av det cirka 80 km långa, nordöst–sydvästliga, kraftigt deformerade bältet utmed Utö, Ornö, Nämndö och Runmarö i skärgården sydöst om Stockholm, benämnt Ornö bandserie av Sundius (1939). Ornö bandserie bildades under högmetamorfa förhållanden, men har också påverkats av retrograd plastisk deformation (Persson & Sjöström 2002, Stephens m.fl. 2009). Ornö bandserie är karakteriserad av sinistrala rörelser (Persson & Sjöström 2002), och kan sålunda i ett regionalt perspektiv bedömas utgöra en konjugerande deformationszon till den dextrala, nordvästliga Singözonen utefter kusten nära Forsmark i nordöstra Uppland (fig. 11, Persson & Sjöström 2002). Oberoende av varandra indikerar kinematiken i bägge zonerna



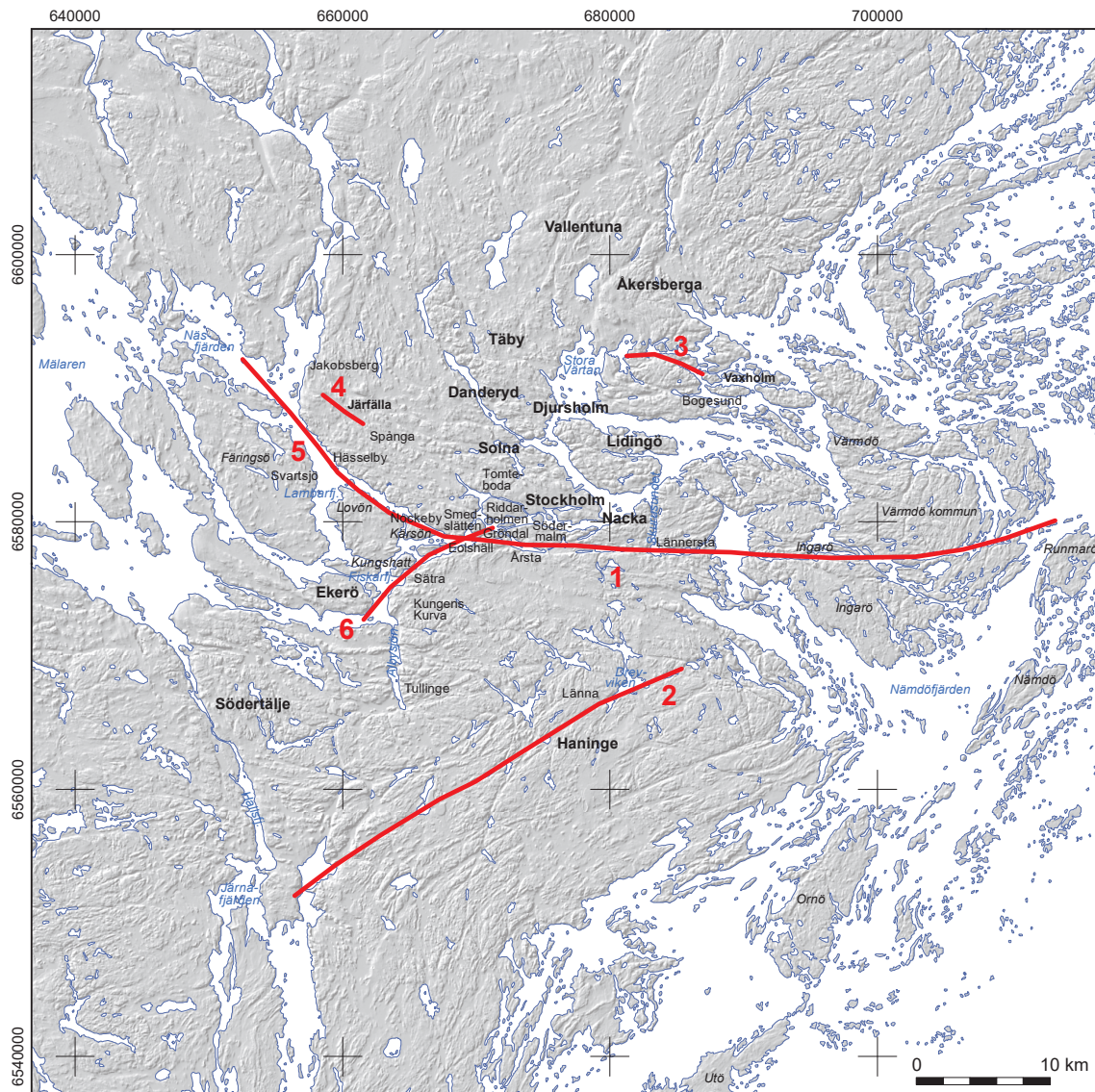
att de är resultatet av cirka nord–sydlig kompression. Vidare framgår i figur 11 den konceptuella horisontella rörelsekomponenten i plastiska zoner beroende på dess orientering i förhållande till den indikerade cirka nord–sydliga kompressionen under den svekokarelska orogenesisen.

På berggrundskartorna över Stockholm (Stålhös 1968, Persson m.fl. 2001) är förekomst av mylonit markerad på ett flertal ställen, vilket indikerar att zonrelaterad kraftig plastisk deformation förekommer på fler ställen i området. Nedan följer ett antal exempel på förmodade ursprungliga plastiska deformationszoner, vilka dock senare har blivit sprött reaktiverade:

- Utefter övergången mellan Värmdölandetantiformen och Ingarölandetsynformen utefter Årstaviken–Järlasjön–Lännerstasundet (1 i fig. 12), vilket indikerar att en plastisk skjuvzon bildats genom kraftig sträckning och skjuvning utefter veckbenen.
- En nordöstlig zon söder om Länna genom Drevviken där mylonit dokumenterats (2 i fig. 12). Zonen är parallell med och ingår i det södra veckbenet i Södertörnsantiformen. Ingen kinematisk information finns, men dess lokalisering i det nordöstra veckbenet och parallella uppträdande till Ornö bandserie indikerar att en sinistral rörelsekomponent är sannolik.
- På Bogesundslandet väster om Vaxholm (3 i fig. 12) och mellan Hässelby strand och Jakobsberg (4 i fig. 12) har mylonit markerats på berggrundskartorna, vilket indikerar förekomst av kraftig plastisk zonrelaterad deformation av mer lokal karaktär.
- Mylonit har markerats nära stranden på norra Lovön, vilket indikerar att en nordvästlig deformationszon som ursprungligen bildats under plastiska förhållanden löper i vattnet mellan Kärösön–Lovön och Nockeby–Hässelby strand och vidare mot nordväst genom Lambarfjärden och Näsfjärden (5 i fig. 12). Dokumentation av mylonit i ett borrhål som borrats i nordlig riktning från norra Lovön i samband med förundersökningar för projektet Förbifart Stockholm (Vass 2012) stödjer förekomsten av en zon som bildats under plastiska förhållanden, men som senare reaktiverats under spröda förhållanden.
- Låggradiga plastiska deformationszoner med nordöstlig strykning har dessutom dokumenterats i borrhål som borrats inom projektet Förbifart Stockholm under Fiskarfjärden mellan Sättra och Kungshatt (Ignea 2015), vilket indikerar att även här förekommer en ursprunglig plastisk zon som sedan reaktiverats under spröda förhållanden (6 i fig. 12).
- De nämnda förmodade zonerna i Lambar- och Fiskarfjärden kan utgöra en nordvästlig respektive sydvästlig förgrening av den öst–västliga zonen utmed Årstaviken–Järlasjön–Lännerstasundet.

De myloniter som markerats på berggrundskartorna (Stålhös 1968, Persson m.fl. 2001) förefaller i de flesta fall vara konforma med foliationen och veckmönstret i sidoberget (jämför Möller & Stålhös 1964). Då myloniter vanligen är fin- till mycket finkorniga, indikerar detta att de bildats under lägre temperatur än under den metamorfa kulminationen som gett berggrunden dess gnejsiga karaktär. Detta indikerar en zonvis koncentration av plastisk deformation, sannolikt relaterad till sträckning i veckbenen, under kallare temperaturförhållanden i ett sent skede av den orogena utvecklingen. I vissa av zonerna är även den yngre graniten ("Stockholmsgraniten") kraftigt förskiffrad, till exempel väster om Järnafjärden och Hallsfjärden, söder om Södertälje, vilket också indikerar att deformationen skett i ett sent stadium av den orogena utvecklingen.

Dokumentation och karaktärisering, inklusive kinematiska studier, av plastiska deformationszoner är bristfällig i Stockholmsområdet, förutom i Ornö bandserie och utmed det norra och södra veckbenet i östligaste delen av Värmdölandetantiformen (Persson & Sjöström 2002). Kinematiska data från veckbenen och den östliga veckkomböjningen i Värmdölandetantiformen indikerar att "veckkomböjningen har skjutits österut" (eng. *eastward hinge escape*, Persson & Sjöström 2002). Det senare indikeras också av den utdragna formen (stora amplituden) på vecket (fig. 9).



Figur 12. Exempel på förmodade plastiska deformationszoner i Stockholmsområdet, baserad på markerad mylonit på berggrundskartorna (Stålhös 1968, Persson m.fl. 2001).

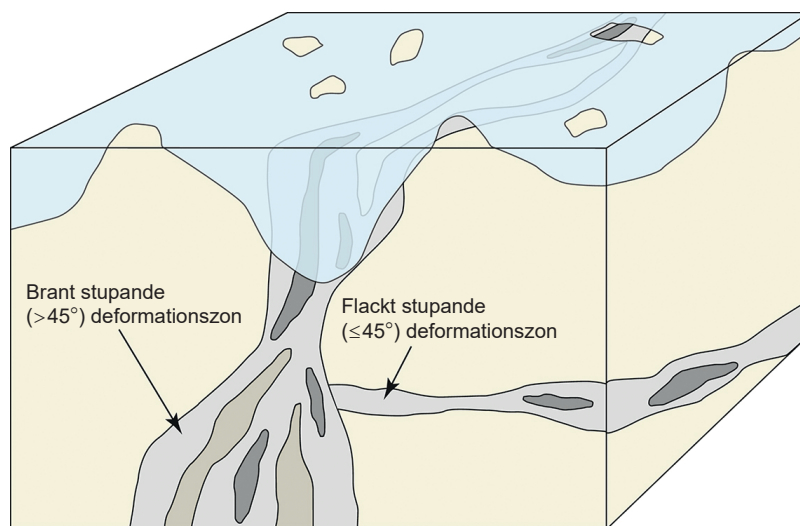
Spröd deformation

Dateringar av biotit med ^{40}Ar - ^{39}Ar -metoden i Forsmark i nordöstra Uppland indikerar att berggrunden i dagens erosionssnitt i Forsmark avsvanat under cirka 300 °C för 1,8–1,7 miljarder år sedan, och att berggrunden därefter enbart deformerats under spröda förhållanden (Stephens & Wahlgren 2008, Söderlund m.fl. 2009). De äldsta spröda strukturerna, speciellt epidotförande sprickor bedöms ha bildats redan i slutskedet av den svekokarelska orogenesen för cirka 1,8 miljarder år sedan (Saintot m.fl. 2011). Vidare har åldersbestämningar och analys av paleostress indikerat spröda reaktiveringar för cirka 1,7–1,6 och 1,1–0,9 miljarder år sedan, samt att rörelser även skett under fanerozoisk tid (Stephens & Wahlgren 2008, Sandström m. fl. 2009, Saintot m.fl. 2011). Reaktiveringarna är en förmodad distal effekt av yngre orogena händelser i dagens väster efter att den dåtida jordskorpan stabiliserats efter den svekokarelska orogenesen, till exempel den 1,1–0,9 miljarder år gamla svekonorvegiska orogenesen som kraftigt påverkat och omvandlat berggrunden i

sydvästra Sverige (fig. 1). Till skillnad från den rådande nord-sydliga kompressionen (förkortningen av jordskorpan) under den svekokarelska orogenesen, var kompressionen orienterad väst-nordväst-östsydöst till nordväst-sydöst under den svekonorvegiska orogenesen (Saintot m.fl. 2011). Detta ledde till att plastiska zoner som var till exempel dextrala under den svekokarelska orogenesen, blev sprött reaktiverade sinistralt under den svekonorvegiska orogenesen (jämför Saintot m.fl. 2011).

Då den spröttektoniska utvecklingen har visat sig vara mycket likartad i både Forsmark och Oskarshamnsområdet (Viola m.fl. 2009, Saintot m.fl. 2011), samt även i Olkiluoto i sydvästra Finland (Mattila & Viola 2014), är det rimligt att anta att resultaten från åldersbestämningar och paleostressanalyser rörande den spröttektoniska utvecklingen i det närliggande Forsmarksområdet är applicerbara även på Stockholmsområdet. De nu nämnda studierna i Forsmark, Oskarshamn och Olkiluoto (jämför Munier & Talbot 1993) indikerar också att berggrunden i denna del av den Fennoskandiska skölden nådde en spröttektonisk "mognad" redan tidigt i den geologiska utvecklingen, det vill säga från 1,6 miljarder år tillbaka i tiden och framåt har spänningar i berggrunden i första hand utlösts genom reaktivering av redan befintliga sprickor, förkastningar eller zoner och få nya strukturer har bildats.

Det är viktigt att notera, inte minst ur byggnadsgeologisk synpunkt, att spröttektoniska deformationszoner vanligtvis är inhomogena till karaktären, både utefter sin laterala och vertikala utbredning. Exempelvis är zonkärnan vanligtvis inte kontinuerligt bildad, övergångszonerna till det intakta berget är i regel inte symmetriskt fördelade kring zonkärnan, tjockleken varierar och zonen kan dela upp sig i olika grenar som omsluter bättre bevarat berg inom zonen (fig. 13, jämför Caine m.fl. 1996). I figur 13 framgår det att vid borrhning genom en zon kan zonen uppvisa helt olika karaktär beroende på var borrhålet penetrerar zonen. Ur hydrogeologisk synvinkel visar också erfarenheterna att de sprickrikare övergångszonerna ofta är mer vattenförande än själva zonkärnan (till exempel Gustafson 2009), vilken kan vara leromvandlad och fungera som en hydraulisk barriär.



- Glaciala och postglaciala sediment, okonsoliderade
- Intakt kristallint berg utanför deformationszonen
- Deformationszon
 - 1 = kärna
 - 2 = övergångszon
 - 3 = bergart med egenskaper liknande det omgivande berget

Figur 13. Princip för den vanligtvis inhomogena karaktären av spröda deformationszoner. Figuren är modifierad efter Caine m.fl. (1996). Bild från SKB (2008), översatt.

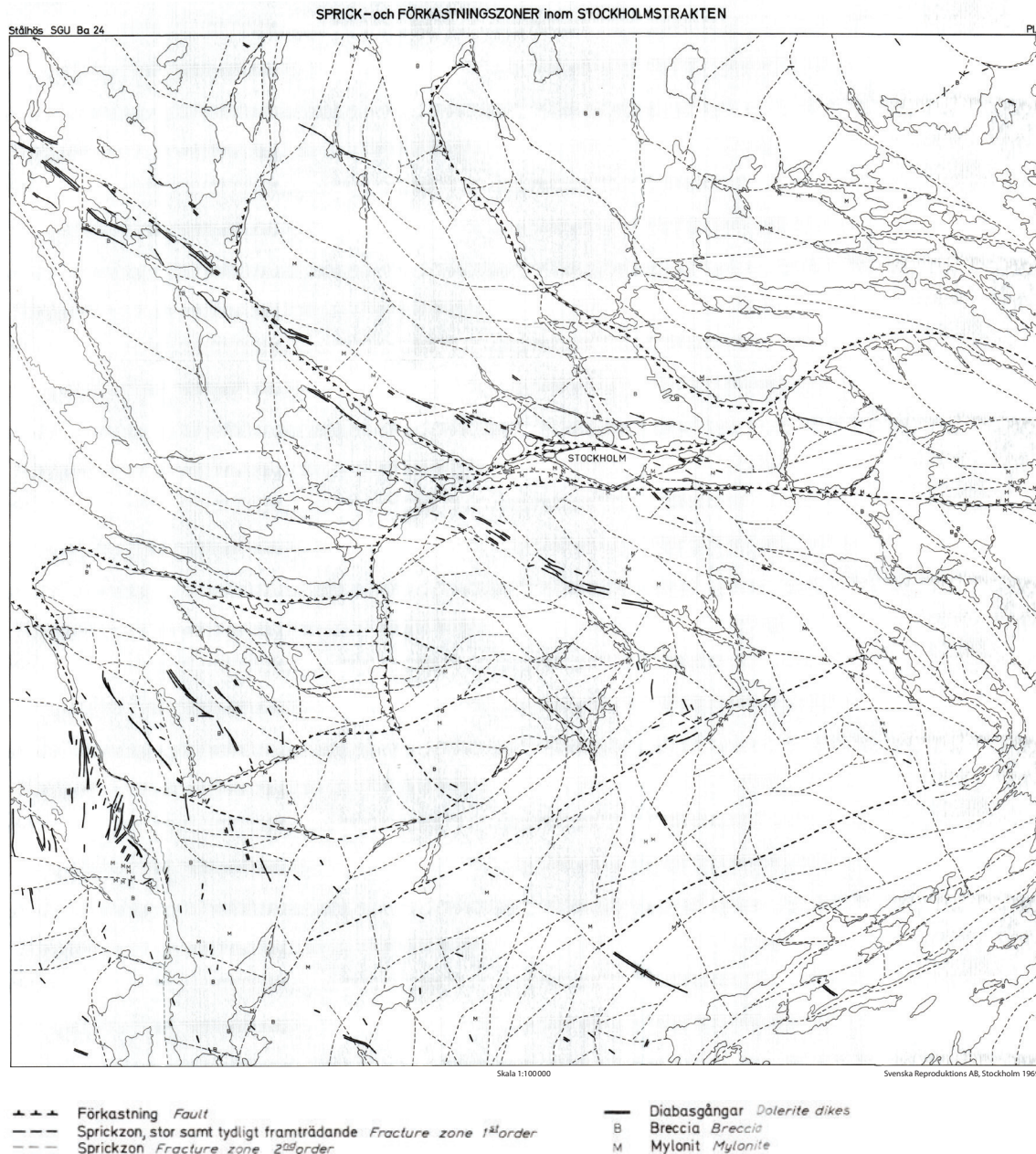
Sprickzoner–förekastningar

Vid jämförelse av höjddata över Stockholmsområdet (fig. 8), som i första hand återspeglar mer ihållande spröda strukturer i berggrunden, med bergarternas orientering på berggrundskartan (fig. 2) och det magnetiska anomalimönstret (fig. 6, 7), framgår en generell överensstämmelse, det vill säga det regionala topografiska mönstret sammanfaller väl med orienteringen av de plastiskt deformerade bergarterna och de plastiska planstrukturerna i berggrunden. Detta antyder att uppbyggda spänningar i berggrunden under den spröde tektoniska geologiska utvecklingen i första hand har utlöst utefter den befintliga plastiska anisotropin (jämför Andersson & Swindell 2008). Det skall dock noteras att spröda zoner som övertvårar de plastiska strukturerna också förekommer, till exempel de nord–sydliga zonerna genom Skurusundet öster om Nacka och genom Tullinge–Albysjön (jämför Stålhös 1968, 1969, Persson m.fl. 2001). Ett bra exempel på en spröd reaktivering (förekastning) av en äldre, plastisk deformationszon (mylonit markerat på berggrundskartan) är utefter Årstaviken–Järlasjön–Lännerstasundet (jämför Stålhös 1968, 1969), zonen i vattnet mellan Kärnsön–Lovön och Nockeby–Hässelby strand och vidare mot nordväst genom Lambarfjärden och Näsfjärden, samt den nordöstliga zonen söder om Länna genom Drevviken där breccia noteras (Persson m.fl. 2001). Den öst–västliga zonen utefter Årstaviken–Järlasjön–Lännerstasundet bedöms utgöra en östlig del av ett regionalt öst–västligt system (diskontinuerligt) söder om Mälaren genom Södermanland och vidare västerut till Närke (Stålhös 1969, Lidmar-Bergström 1994, Stephens m.fl. 2009). Detta förekastningssystem påverkar det subkambriska peneplanet och karaktäriseras av att det norra blocket sjunkit ner i förhållande till det södra. Vidare begränsar förekastningssystemet utbredningen av de kambriska-ordoviciska sedimentära bergarterna i Närke. Sålunda är detta en indikation på att rörelser kan ha skett även i zonen utefter Årstaviken–Järlasjön–Lännerstasundet i post-ordovicisk tid.

Då kontakten mellan den jotniska så kallade mälarsandstenen på västra Ekerön och den äldre kristallina berggrunden är förekastningsbetingad visar detta på att rörelser skett efter avsättningen av de sandiga sedimenten och dess litifiering. Ytterligare exempel på relativ åldersbestämning av rörelser i förekastningar utgör en nordvästlig förekastning på norra Svartsjölandet utmed vilken diabasfragment förekommer i en kvartsläkt breccia (Möller & Stålhös 1965). Åldern på diabasen är inte klarlagd, men den tillhör förmodligen en generation i intervallet 1,5–1,3 miljarder år. Den kan eventuellt tillhöra samma generation som den så kallade Mackmyradiabasen (Söderlund m.fl. 2006) i Gävletrakten och rörelser i förekastningen kan sålunda ha skett efter 1,3 miljarder år. Stålhös (1969) påpekar också att på ett flertal ställen inom Stockholmsområdet är diabaserna uppspruckna och krossade vilket indikerar en mer allmän spröd reaktivering i berggrunden efter diabasernas intrusion. Vidare innebär även förekomsten av diabaser att tektoniska rörelser sannolikt förekommit i samband med diabasmagmans inträngande i svaghetszoner i berggrunden.

Huvuddelen av diabaserna är orienterade mer eller mindre parallellt med de dominerande sprickzonerna i berggrunden, framförallt de nordvästliga diabaserna, men även de underordnade nordöstliga (Stålhös 1969). Detta kan tyda på att diabasmagmorna utnyttjat och intruderat utefter redan existerande svaghetszoner i berggrunden, och att de senare etablerats tidigt i den geologiska utvecklingen. Diabasernas huvudsakligen nordvästliga strykning och branta till vertikala stupning antyder att svaghetszonerna i så fall reaktiverats i ett spänningsfält med huvudspänningen orienterad i nordväst–sydöst och den minsta spänningen nordöst–sydväst. Hypotetiskt skulle detta kunna innebära att diabaserna tidsmässigt är relaterade till den svekonorvegiska orogenesen under vilken huvudkompressionen var cirka nordväst–sydöstlig. En datering av diabaserna är nödvändig för att bekräfta eller förkasta denna hypotes.

Enligt Stålhös (1969) dominerar Stockholmsområdet av spröda deformationszoner med huvudsakligen nordöstlig, nordvästlig och öst–västlig orientering (fig. 14). Som framgår av figur 14 (se också Persson m.fl. 2001), vilken bygger på Sundius (1948), har vissa av förekastningarna och

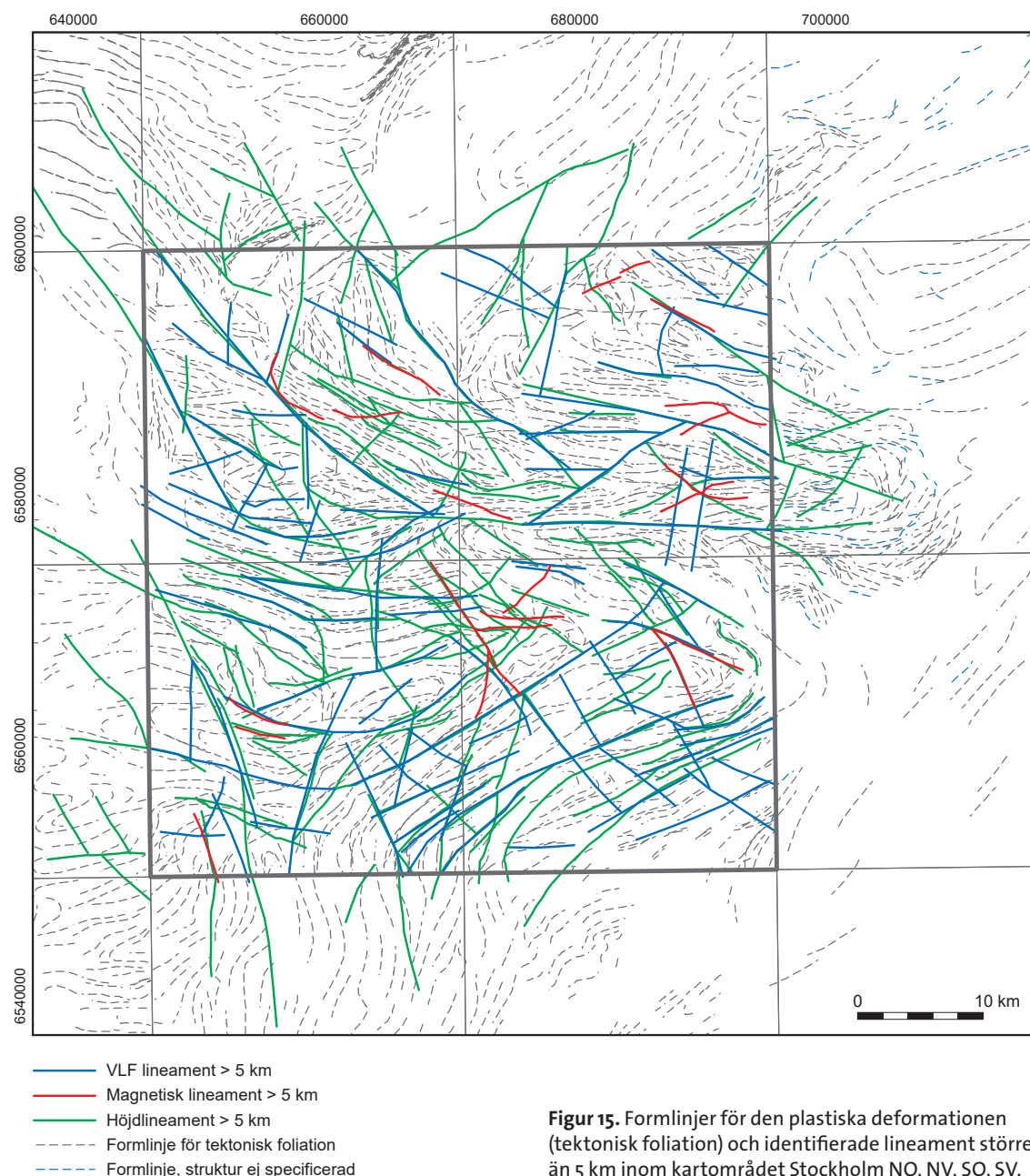


Figur 14. Sprick- och förkastningszoner i Stockholmsområdet efter Stålhös (1969).

sprickzonerna en mer eller mindre bågformad utsträckning och följer till exempel strandlinjer. Dessa bågformiga zoner representerar i många fall snarare morfologiska drag i terrängen än att återspegla en sprödttektonisk geometri. Stålhös (1969) påpekar också att dessa bågformiga zoner är att betrakta som länkade separata zoner med olika riktning vilka markerats som en kontinuerlig zon. Ett tydligt exempel på en bågformad zon (förförkastning) löper från Tullinge norrut för att sedan i trakten av Fiskarfjärden böja av mot nordöst och österut utmed norra stranden av Södermalm ("Söderströmsförförkastningen") och vidare mot öster utmed norra stranden av Värmdölandet. Förförkastningen har verifierats i ett mot nordnordöst gradat kärnborrhål (13GA01) som borrar från norra Södermalm (gamla SJ-tunneln) mot Gamla stan inom Slussenprojektet, samt i två gradade kärnborrhål (KB01 och 13VEC06K) som borrar från Stadsgårdskajen mot norr ut i Strömmen

inom CityLinkprojektet (Golder Associates 2014). Grundat på de utförda kärnborrningarna är cirka 100 m av berggrunden söder om det som kan bedömas som förkastningens kärna mycket uppsprucken och utgör övergångszonen (eng. *damage zone*) till det intakta, av förkastningen opåverkade berget. Enligt Golder Associates (2014) karaktäriseras Söderströmsförkastningen av dextral horisontalrörelse och södra-sidan-upp-rörelse. Som nämnts ovan har spröd reaktivering dokumenterats utefter den bågformade "förkastningen" även i Fiskarfjärden mellan Sättra och Kungshatt (Ignea 2015), samt också i ett gradat kärnborrhål borrar i nordvästlig riktning från Eolshäll mot Smedslätten (Alfvén 2015). Dessa bekräftade zoner bedöms dock utgöra olika segment i den på figur 14 och på berggrundskartorna markerade bågformade förkastningen.

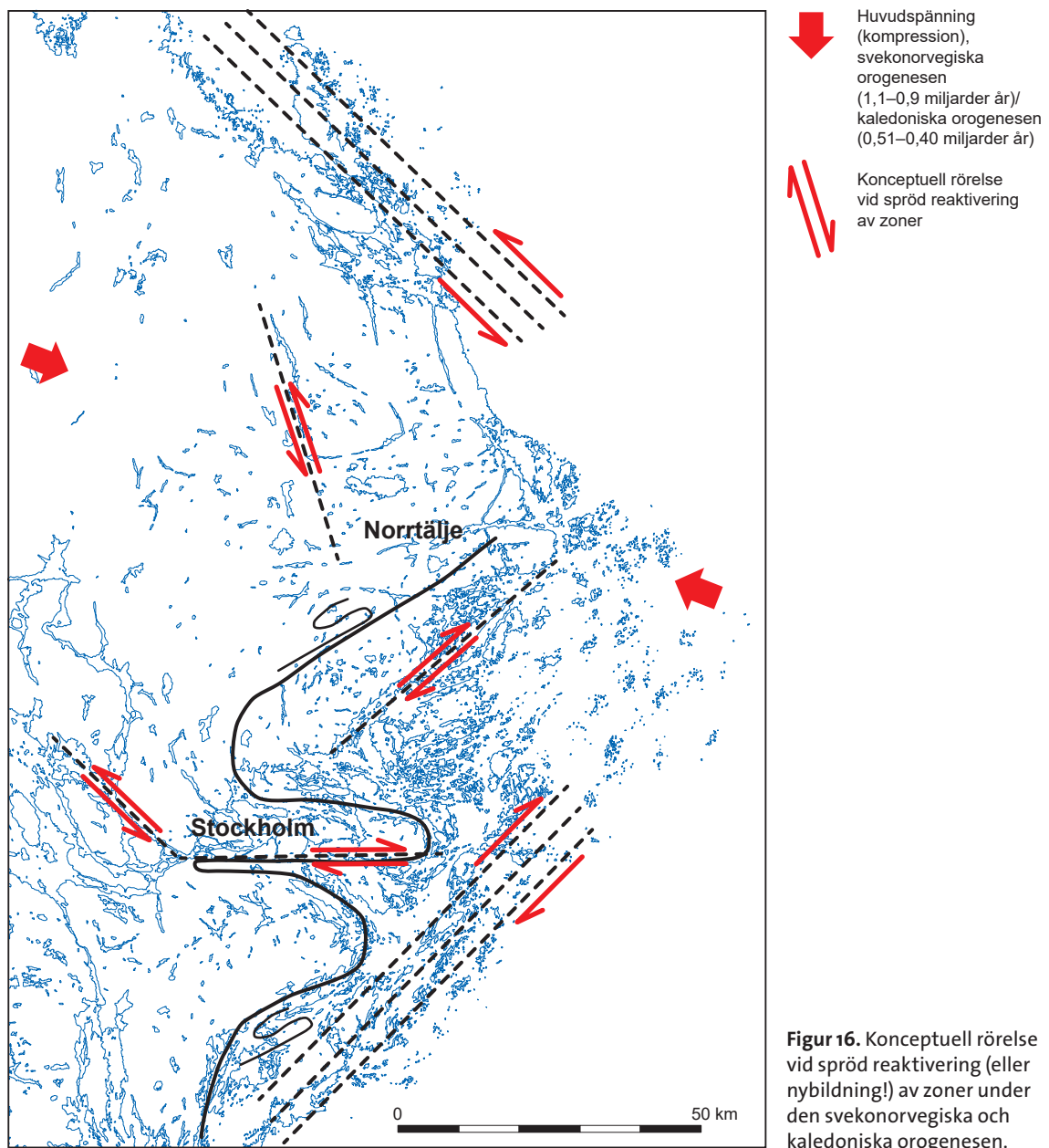
I figur 15 visas det plastiska deformationsmönstret i berggrunden i form av så kallade formlinjer vilka återspeglar foliationens (gnejsighetens) mer regionala variation i orientering. Vidare visas



Figur 15. Formlinjer för den plastiska deformationen (tektonisk foliation) och identifierade lineament större än 5 km inom kartområdet Stockholm NO, NV, SO, SV.

metodspecifika lineament större än 5 km som identifierats i magnetiska data, VLF-data och i den högupplösta nationella höjdmodellen med 2 m upplösning. Som framgår i figur 15 avspeglar orienteringen av lineamenten, vilka förmodas att till stor del reflektera spröda eller sprött reaktiverade plastiska zoner, till stor del orienteringen av det plastiska deformationszonsmönstret i berggrunden. Detta antyder att den äldre, etablerade plastiska anisotropin i berggrunden har haft betydelse för lokaliseringen av yngre spröda strukturer. Det bör noteras att identifieringen av lineament är skalberoende vilket påverkar bland annat positionering och längd, men oberoende av denna osäkerhet framgår tydligt korrelationen mellan orienteringen av lineamenten och den plastiska deformationen. I SGUs kartvisare Byggnadsgeologi som presenteras på SGUs webbplats visas alla identifierade lineament oberoende av längd.

I figur 16 visas den konceptuella rörelsen i sprött reaktiverade plastiska eller nybildade spröda zoner som en distal effekt av det spänningsfält som tolkas ha rått under de svekonorvegiska och



Figur 16. Konceptuell rörelse vid spröd reaktivering (eller nybildning!) av zoner under den svekonorvegiska och kaledoniska orogenesisen.

kaledoniska orogeneserna. Notera att den nordväst–sydöstligt orienterade huvudspänningen leder till en invertering av rörelsen i zonerna i förhållande till rörelsen under den svekokarelska orogenesen (jämför fig. 11), det vill säga plastiska zoner med dextral rörelsekomponent under den svekokarelska orogenesen, reaktiveras sprött under sinistrala rörelser och vice versa.

Sprickor

Någon övergripande analys av sprickor i det intakta berget mellan väldefinierade zoner finns inte över Stockholmsområdet. Lokalt finns dock sprickinformation som dokumenterats i samband med fokuserade studier inom spridda områden, ofta kopplade till avslutade eller pågående infrastrukturprojekt. Nedan sammanfattas sprickorienteringar från ett antal studier och sammanställningar i spridda delar av Stockholmsområdet.

Kartområde Stockholm NO

Kartering av sprickor (större än 2 m) inom kartområdet Stockholm NO visar på dominerande nordväst–västnordvästliga och nordöstliga sprickriktningar och dominerande medelbranta till branta stupningar. Sprickfrekvensen är likartad oberoende av bergartstyp, men frekvensen av horisontella sprickor är högre i homogena graniter än i de ådergnejsomvandlade metasedimentära bergarterna (Hildebrand 1994). För vidare information från undersökningarna inom kartområdet Stockholm NO, se Hildebrand (1994).

Södermalmsområdet

Sprickmätningar på hållar i Södermalmsområdet inom projekt Citybanan visade på förekomst av fyra sprickgrupper: nordvästliga, nordöstliga, nord–sydliga och öst–västliga, med stupningar varierande från branta till flacka (Armengol 2012). Sprickorienteringar i en borrkärna från Dykärret inom samma område visade också på fyra sprickgrupper: öst–västliga och västnordvästliga med brant stupning, öst–västliga med flack stupning och östnordöstliga med medelbrant stupning (Armengol 2012). De nordvästliga, nordöstliga och öst–västliga sprickgrupperna är parallella med foliationens orientering inom området. För vidare information från undersökningarna i Södermalmsområdet, se Armengol (2012).

Citybanan

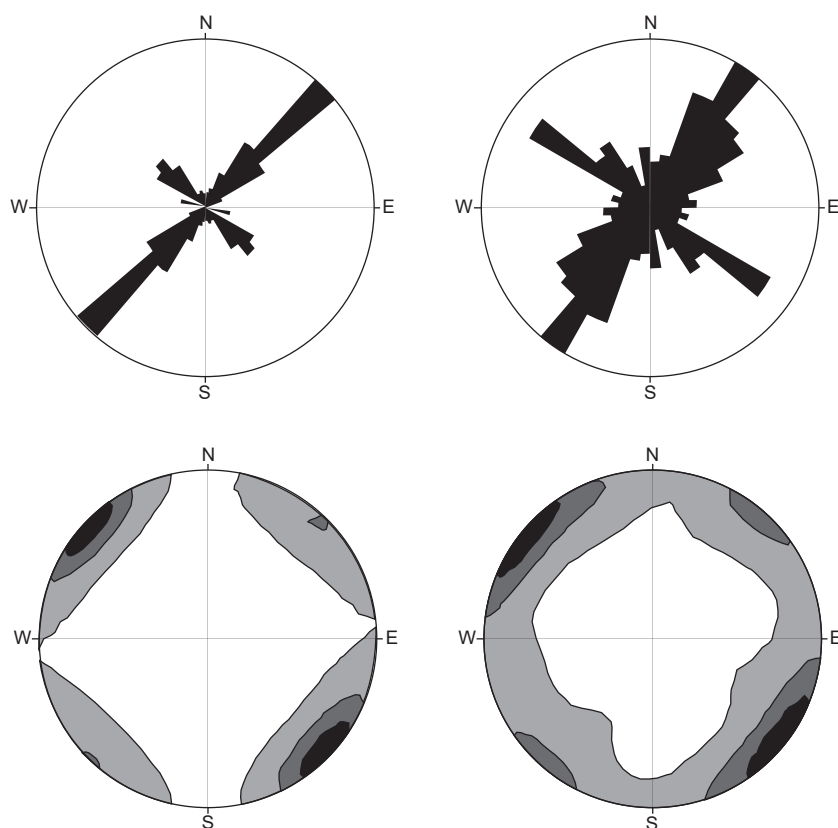
Inför byggnationen av Citybanan gjordes en detaljerad geologisk kartering, inklusive kartering av 7 842 sprickor, utefter den planerade tunnelsträckningen (Andersson & Swindell 2008). Sprickorna karterades och karaktäriserades enligt rekommendationer från ISRM (International Society for Rock Mechanics). Karteringen utfördes utefter en cirka 5 km lång sträcka mellan Tomtebodan i norr och Riddarholmen i söder, och omfattade både borrkärnor, existerande tunnlar och hållar. Efter analys av sprickorienteringarna delades den undersökta sträckningen in i 17 preliminära spröda strukturella domäner, karaktäriserade av distinkta kombinationer av sprickgrupper. Tre huvudsakliga sprickorienteringar dominerar den planerade tunnelsträckningen: subhorisontella, branta nordöstliga och västnordväst–nordvästliga med varierande stupning. De subhorisontella och nordöstliga sprickorna dominerar i den norra och södra av granit och metagranitoid dominerade delen, medan de västnordväst–nordvästliga sprickorna dominerar i den mellersta gnejsdominerade delen. I båda fallen tenderar orienteringen av sprickorna att till stor del kontrolleras av den plastiska anisotropin (foliationen) i omgivande berg. Enligt Andersson & Swindell (2008) förmodas de subhorisontella sprickorna att till största delen utgöra avlastningssprickor. För en sammanställning av sprickinformation utmed Citybanan, se Andersson & Swindell (2008).

Resultaten av karteringar efter färdigställandet av Citybanan ingår i den nya byggnadsgeologiska kartan.

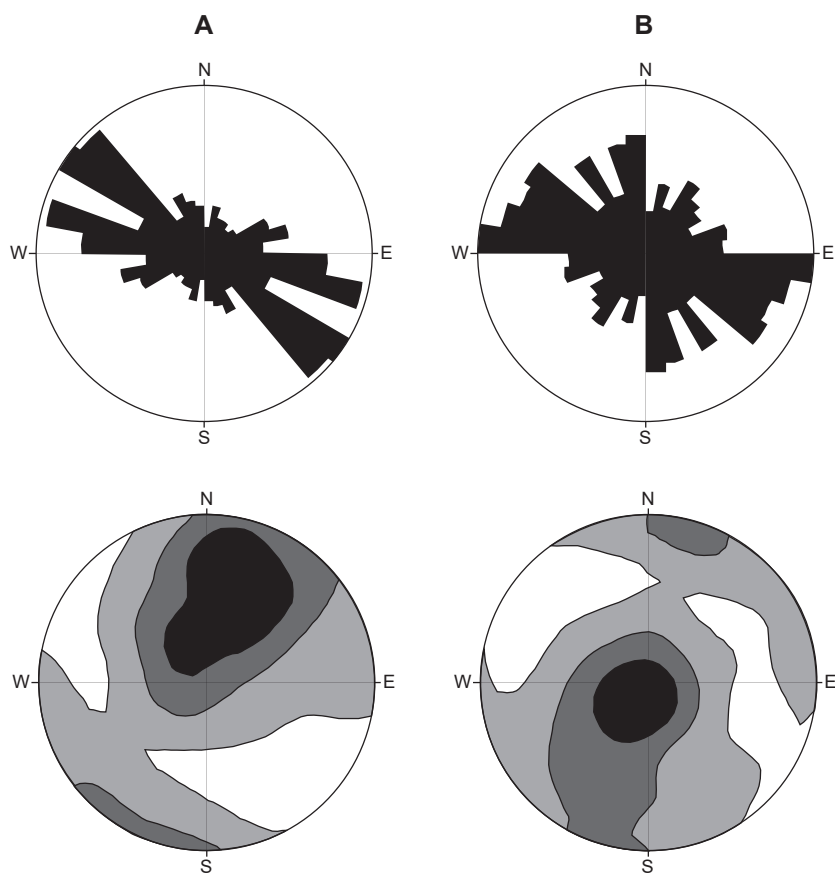
Lambarfjärdsområdet

Studien är del av en undersökning av en förmodad nordvästlig deformationszon och dess närmaste omgivning inom projektet Förbifart Stockholm (Vass 2012). Sprickmätningar på hållar på bägge sidor om Lambarfjärden, det vill säga på Lovön och Hässelby, visar på en dominans för branta nordöstliga sprickor, men underordnade nordvästliga branta sprickor förekommer också (fig. 17). Den dominerande sprickorienteringen på land återspeglar således inte orienteringen av den nordvästliga deformationszonen i Lambarfjärden.

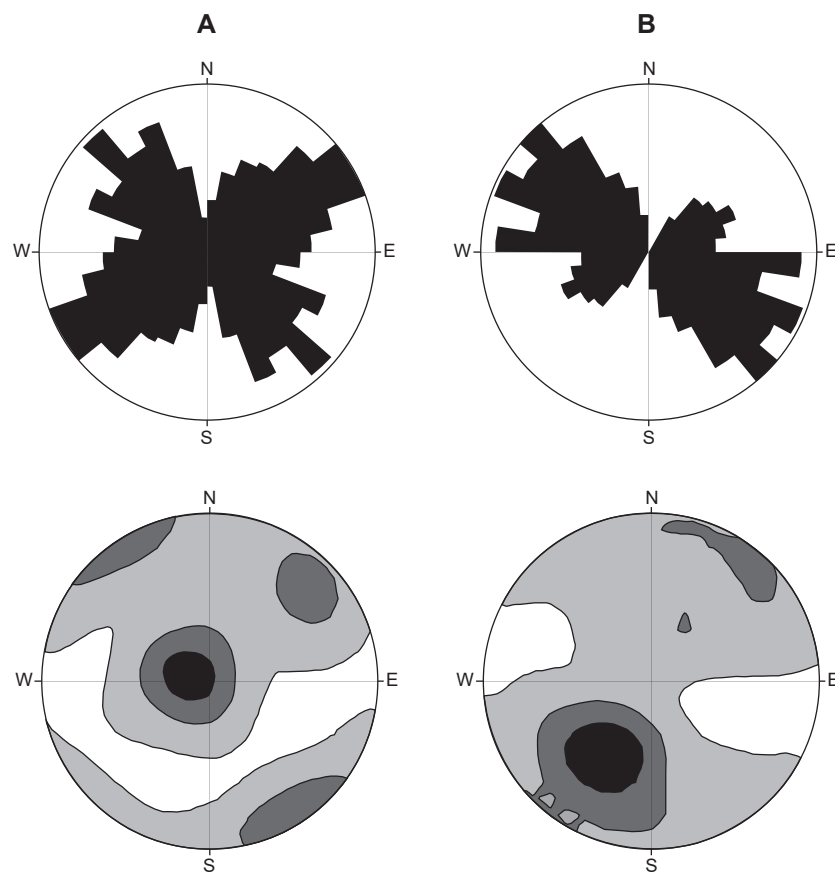
Sprickorienteringar har också dokumenterats i tre borrhål: ett 421 m långt gradat borrhål (10F353K) mot norr från Lovön ut i Lambarfjärden i riktning mot Hässelby strand, och två 99 m långa medelbranta mot varandra riktade borrhål, ett mot nordnordöst (08F351K) och ett mot sydsydväst (08F352K) i Lambarfjärden. De två medelbranta borrhålen domineras av västnordväst-till nordvästliga sprickor, samt även mer nord-sydligt orienterade sprickor i borrhålet 08F352K (fig. 18). Medelbranta till branta stupningar mot sydväst och branta stupningar mot nordöst dominerar i borrhålet som borrhåts mot nordnordöst (08F351K), medan flacka till subhorisontella stupningar dominerar i borrhålet borrhåts mot sydsydväst, men det förekommer även branta väst-nordvästliga sprickor (08F352K). I det långa borrhålet som borrhåts från Lovön (10F353K) dominerar flacka till subhorisontella sprickor i den övre delen mellan 3 och 207 m borrhålslängd, men branta nordvästliga och nordöstliga förekommer också (fig. 19). Därefter dominerar västnordväst- till nordvästliga sprickor med medelbrant stupning åt nordöst mellan 208 och 358 m (fig. 18). Förändringen med dominans av västnordväst- till nordvästliga sprickor i den nedre delen av borrhålet kan vara relaterad till, och en påverkan av, den nordvästliga förkastningen i Lambarfjärden. För vidare information från undersökningarna i Lambarfjärden, se Vass (2012).



Figur 17. Orientering av sprickor i hållar i Lambarfjärdsområdet. Vänster Hässelby (n=264), höger Lovön (n=168). Figur omritad och förenklad efter Vass (2012).



Figur 18. A. Orientering av sprickor i borrhålet o8F351K (n = 247). B. Orientering av sprickor i borrhålet o8F352K (n = 235). Figurer omritade och förenklade efter Vass (2012).

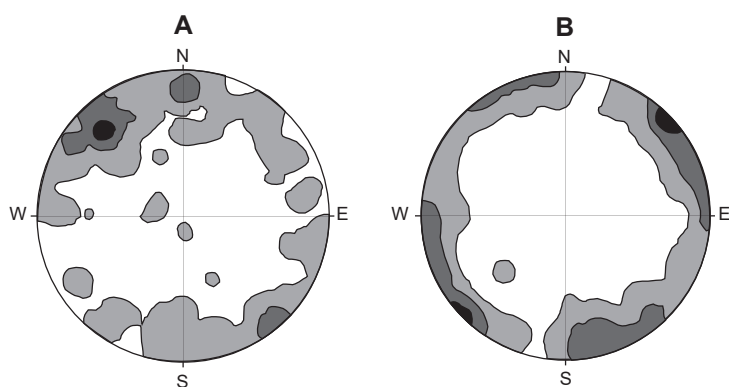


Figur 19. Orientering av sprickor i borrhålet o8F353K i Lambarfjärden. A. 3–207 m (n = 343). B. 208–358 m (n = 405). Figurer omritade och förenklade efter Vass (2012).

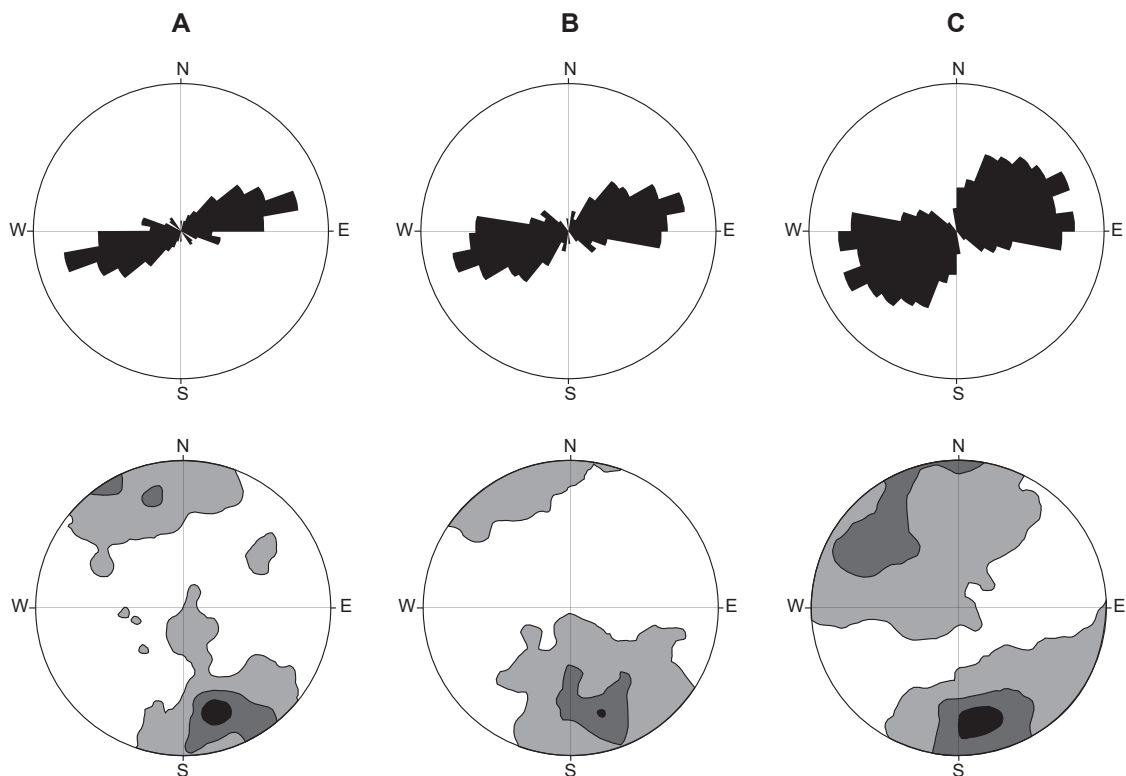
Fiskarfjärden

I Sättra och på Kungshatt har sprickor dokumenterats på hållar inom projektet Förbifart Stockholm (Ignea 2015). Sprickor har även dokumenterats i ett borrhål som borrar i nordnordvästlig riktning tvärs Fiskarfjärden från Sättra mot Kungshatt med en inklinering på 45° i början av borrhningen för att gradvis blir flackare och vara i det närmaste horisontellt i slutet av borrhningen. Vidare har sprickor dokumenterats i två mot varandra riktade medelbranta (inklinering 50°) borrhål som borrar ute i Fiskarfjärden i nordnordvästlig respektive sydsydöstlig riktning (Ignea 2015).

I hållar i Sättraområdet dominerar nordöstliga sprickor med brant sydöstlig stupning, men underordnade branta öst–västliga sprickor förekommer också (fig. 20A). På Kungshatt på andra sidan Fiskarfjärden dominerar däremot subvertikala sprickor med östnordöstlig respektive nordvästlig strykning (fig. 20B). I de medelbranta mot varandra riktade borrhålen dominerar östnordöstligt orienterade sprickor med dominerande medelbrant till brant stupning mot nordnordväst till nordväst, men också brant mot sydsydöst (fig. 21A och B). Även i det långa borrhålet som korsar Fiskarfjärden dominerar östnordöstligt orienterade sprickor, med en viss spridning mellan öst–väst och nordöst, med i huvudsak medelbranta till branta stupningar åt både nordnordväst och öst (fig. 21C).



◀ **Figur 20.** A. Orientering av sprickor i hållar i Sättraområdet (n=146). B. Orientering av sprickor i hållar på Kungshatt (n=379). Figurer omritade och förenklade efter Ignea (2015).



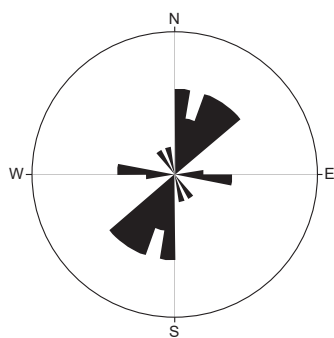
▼ **Figur 21.** Orientering av sprickor i borrhålen i Fiskarfjärden. A. 08F152K (n=228). B. 08F153K (n=492). C. 08F156K (n=1784). Figurer omritade och förenklade efter Ignea (2015).

Sammanfattningsvis dominerar relativt branta östnordöstliga sprickor inom Fiskarfjärdsområdet (Ignea 2015), vilket indikerar en relation till den östnordöstliga zonen i Fiskarfjärden. För vidare information från undersökningarna i Sätra, på Kungshatt och i Fiskarfjärden, se Ignea (2015).

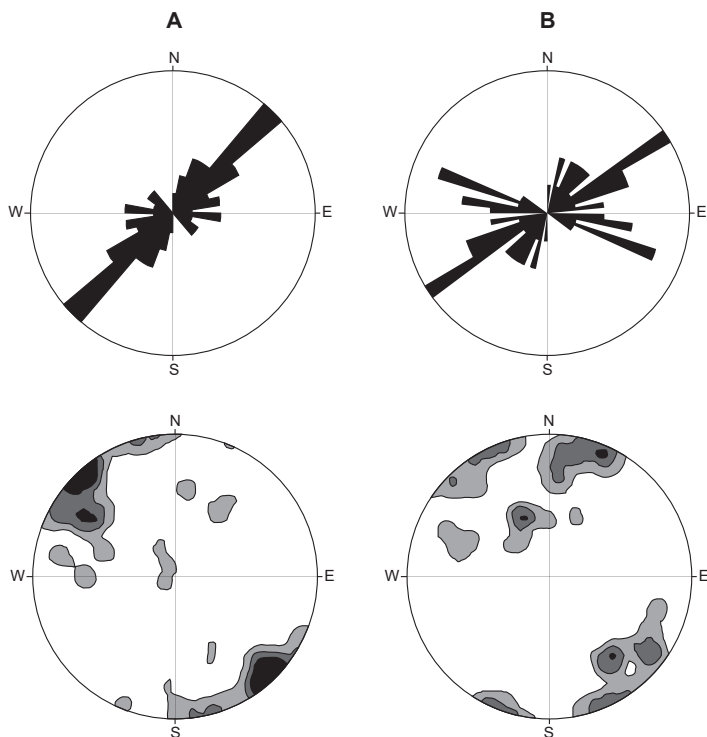
Eolshäll–Smedslätten

Dokumentation av sprickor har utförts både på hällar inom området samt i ett kärnborrhål (14RKB06) borrar från Eolshäll mot Smedslätten i nordvästlig riktning och med en inklinations på cirka 23° (Alfvén 2015). Dokumentationen av sprickor i borrhålet omfattar bara de första 271 m av det planerade 400 m långa borrhålet.

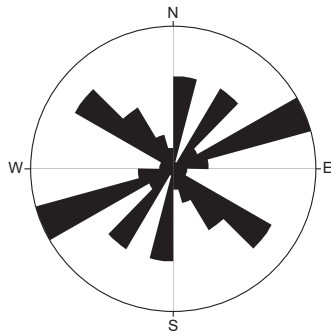
Sprickorna i hällar har en dominerande nordlig till nordöstlig strykning. Underordnat förekommer även öst–västliga sprickor (fig. 22). I borrhålet utgör intervallet cirka 130–185 m en bedömd zon. Sprickorna i den övre delen av borrhålet sydöst om zonen (0–130 m) har en dominerande nordöstlig strykning och mestadels brant stupning varierande mellan nordväst och sydöst (fig. 23A). Nedanför och nordväst om zonen i intervallet 185–271 m är sprickornas strykning mer varierande med viss spridning från östnordöst till nordöst och västnordväst (fig. 23B). Stupningarna är mestadels branta. För vidare information från undersökningarna i Eolshäll och Smedslätten, se Alfvén (2015).



Figur 22. Orientering av sprickor i hällar i Eolshäll–Smedslätten (n=19). Figur omritad och förenklad efter Alfvén (2015).



Figur 23. Orientering av sprickor i borrhålet 14RKB06 i Eolshäll–Smedslätten. A. 0–130 m (n=63 i rosdiagrammet, n=79 i stereogrammet). B. 185–271 m (n=39 i rosdiagrammet, n=46 i stereogrammet). Figurer omritade och förenklade efter Alfvén (2015).



Figur 24. Orientering av sprickor i hållar i Kungens Kurva (n = 94). Figur omritad och förenklad efter Guldstrand (2013).

Kungens Kurva

Intill Heron City i Kungens Kurva har sprickkartering utförts på hållar inom ett cirka 300×200 m stort område (Guldstrand 2013). Inom det begränsade området har fyra sprickorienteringar dokumenterats: nordvästliga med dominerande nordöstlig medelbrant stupning, östnordöstliga med medelbrant till brant sydlig stupning, nord-sydliga med medelbrant stupning åt både öster och väster, och nordöstliga med medelbrant stupning åt sydöst (fig. 24). En uppsprickning längs foliationen förekommer i hela det undersökta området. För vidare information från undersökningarna i Kungens Kurva, se Guldstrand (2013).

Sammanfattning

Vid en jämförelse av orienteringen av sprickor i de olika undersökningarna så framkommer generellt att sprickorienteringarna är likartade i de flesta av områdena, men frekvensen (intensiteten) varierar. Som jämförelse kan nämnas att de sprickdomäner som definierades i Laxemar och Forsmark inom SKBs platsundersökning i Oskarshamns respektive Östhammars kommun baserades på skillnader i sprickgruppers orientering, men också på relativa skillnader i sprickgruppernas intensitet mellan domänerna (Stephens m.fl. 2007, Fox m.fl. 2007, Wahlgren m.fl. 2008, La Pointe m.fl. 2008). På motsvarande sätt kan en utvärdering och analys göras baserad på befintlig information för att undersöka om Stockholmsområdets berggrund kan delas in i sprickdomäner. Vid brist på mer detaljerad och jämnt fördelad information inom området kan man i ett första steg göra en översiktlig analys baserad på orientering och intensitet av identifierade lineament. I ett andra steg kan denna analys sedan kompletteras med mer detaljerade tillgängliga sprickdata från hållar, tunnlar, borrhål etcetera.

I Stockholmsområdet dominerar nordöstliga (östnordöst–nordnordöst) och nordvästliga (västnordväst–nordnordväst) sprickor, medan öst–västliga och nord–sydliga sprickor är underordnade, det vill säga de dominerande sprickgrupperna har samma strykningstrend som de dominerande spröda deformationszonerna (jämför Stålhös 1969 och fig. 14, 15). Detta skulle ur ett geologiskt utvecklingsperspektiv kunna antyda att de flesta zonerna och sprickorna initialt bildades redan i slutet av den svekokarelska orogensen som i östra Mellansverige och söderut karaktäriserades av nord–sydlig kompression (Stephens & Wahlgren 2008, Viola m.fl. 2009, Saintot m.fl. 2011).

En viktig sak att beakta när det gäller sprickorienteringar är att sprickor som är parallella med ett borrhål blir underrepresenterade i dokumentationen. I de stereogram och sprickrosor som presenteras för borrhål i ovanstående studier har ingen korrektion gjorts (jämför Terzhagi 1965) vilket leder till en skevhet (bias) i dataunderlaget. Det framgår tydligt i stereogrammen och sprickrosorna ifrån ovanstående undersökningar att sprickor i vinkel mot borrhålsriktningen dominerar, medan sprickor som är parallella med borrhålet är underrepresenterade. Ett exempel som kan bero på detta är skillnaden i strykning mellan hållkarterade sprickor på Lovön och Hässelby och de karterade sprickorna i borrhållarna från Lambarfjärden. I hållar dominerar nordöstliga sprickor

både på Lovön och i Hässelby, även om underordnade nordvästliga sprickor också förekommer. I de nordnordöstligt och sydsydvästligt orienterade borrhålen i Lambarfjärden dominerar däremot västnordvästligt till nordvästligt strykande sprickor, förutom i den övre delen av det nordnordöstligt orienterade borrhålet (Vass 2012). På motsvarande sätt dominerar öst–nordöstliga sprickor i borrhålen i Fiskarfjärden, medan det i hållar på Kungshatt förekommer, förutom östnordöstliga sprickor, även en nordvästlig sprickgrupp, det vill säga den senare är parallell med borrhålens riktning (Ignea 2012). Vid ytkartering av hållar blir på motsvarande sätt förekomsten av flacka till horisontella sprickor underrepresenterade. Kombinationen av ytkartering och kartering av borrhållar innebär dock att samtliga sprickgrupper fångas upp.

En tydlig koppling mellan orienteringen av sprickor och foliationen (plastiska anisotropin) finns på ett flertal ställen inom de undersökta områdena. I Fiskarfjärden har foliationen i de tre borrhålen en dominerande östnordöstlig strykning, det vill säga parallellt med orienteringen av sprickorna (Ignea 2012). I Södermalmsområdet är foliationen inom området parallell med de nordvästliga, nordöstliga och öst–västliga sprickgrupperna (Armengol 2012). Även utefter den planerade sträckningen av Citybanan tenderar orienteringen av sprickorna att till stor del kontrolleras av foliationen i omgivande berg (Andersson & Swindell 2008). Detta indikerar att den plastiska anisotropin i berggrunden delvis styr den spröda deformationen, det vill säga den senare har utnyttjat befintliga svaghetsplan i berggrunden.

De vanligast förekommande sprickfyllnaderna utgörs av klorit, kalcit och lera, men bland annat grafit, laumontit, prehnit, kvarts, pyrit förekommer också. Någon korrelation mellan sprickfyllnadsmineral och orientering av sprickor har inte kunnat påvisas (till exempel Vass 2012, Ignea 2015). För vidare information om sprickfyllnader, se Vass (2012) och Ignea (2015). För detaljerad information om sprickfyllnader i Forsmarksområdet i nordöstra Uppland, se Stephens m.fl. (2007) och referenser i denna samt Sandström m.fl. (2008).

Sen- till postglacial deformation

Mörner (2004, 2005) presenterade en stor mängd platser i Sverige där tecken på sen- till postglacial paleoseismicitet observerats, inklusive Stockholmsområdet (se även Tröften 1997). Förekomsterna i Stockholmsområdet är i första hand baserade på observerade störningar i varvig lera och vattenmättade jordlager (eng. *liquefaction*), vilka enligt Mörner orsakats av jordskalv i nära anslutning till den senaste deglaciationen. Då inga avgörande bevis har presenterats, förutom för de allmänt accepterade sen- till postglaciala förkastningarna i norra Sverige, till exempel Pärvie, Lansjärv, Rönjoret och Burträsk, och den nyligen i LiDAR-data identifierade och beskrivna förkastningen i trakten av Bollnäs (Smith m.fl. 2014, Mikko m.fl. 2015), råder ingen allmän acceptans för förekomsten av sen- till postglaciala förkastningsrörelser i södra Sverige, inklusive Stockholmsområdet (jämför Lagerbäck & Sundh 2008).

Bergspänningar

Regionalt spänningsfält

Bergspänningsfältet (paleostress) som rått i den svenska berggrunden och som orsakat bildningen och reaktiveringar av plastiska och spröda strukturer har varierat under den geologiska utvecklingen. De spänningsrelaterade processer som i första hand är aktuella är de stora orogena händelser som skapat och deformerat berggrunden, det vill säga den svekokarelska, svekonorvegiska och kaledoniska orogeneserna (bergskedjebildningarna). Berggrunden inom Stockholmsområdet bildades och deformerades i första hand plastiskt under den svekokarelska orogenesen under vilken den horisontella huvudspänningen var cirka nord–sydlig (till exempel Stephens & Wahlgren 2008).

Förutom spänningsförändringar orsakade av distala orogena processer kan spänningsfältet förändras vid belastning och avlastning av berggrunden, till exempel vid sedimentation och erosion samt glaciation och deglaciation.

Det nuvarande regionala bergspänningsfältet (in situ stress) i Fennoskandiska skölden orsakas i första hand av ett horisontellt tektoniskt tryck från spridningen i den Mittatlantiska ryggen. Förutom trycket från den Mittatlantiska ryggen utgör den postglaciala tryckavlastningen (jordskorpans återhämtning efter den senaste nedisningen) en andra ordningens spänningskälla (jämför Uski m.fl. 2003). Om man bortser från lokala variationer är den största horisontella huvudspänningen (σ_1) generellt orienterad i nordväst–sydöstlig riktning i berggrunden i södra halvan av Sverige (fig. 25). Den vertikala spänningen är i första hand orsakad av trycket från ovanliggande bergmassor (till exempel Perman & Sjöberg 2007).

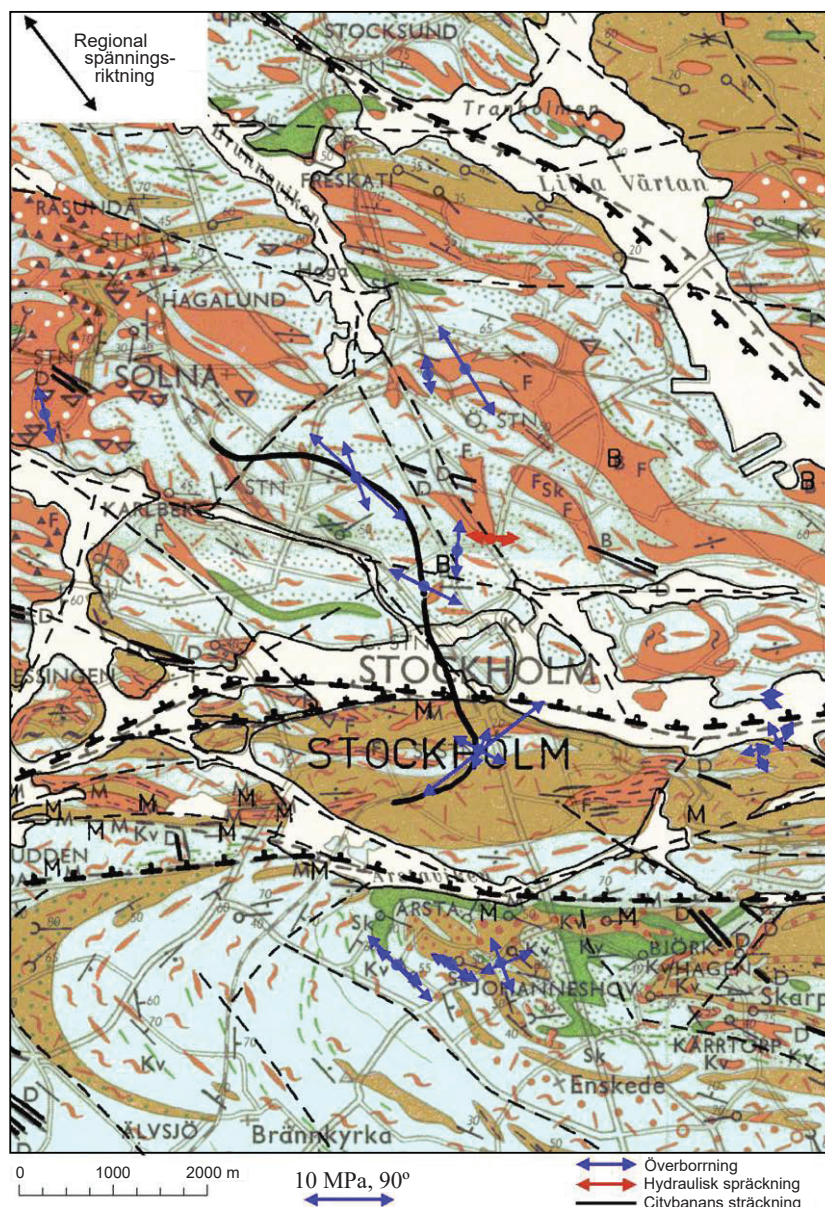


Figur 25. Bergspänningar i Skandinavien enligt World Stress Map (Heidbach m.fl. 2008).

Lokalt spänningsfält

Lokalt kan bergspänningarna avvika från det regionala mönstret och beror vanligtvis på heterogeniteter i bergmassan, till exempel orienteringen av större deformationszoner, topografiska och litologiska variationer etcetera. Lokalt kan även spänningen avvika avsevärt från medelspänningen inom ett visst område. Den översta delen av berggrunden (mindre än 50 m) visar ofta tecken på tryckavlastning vilket påverkar bergspänningen. Är berggrunden kraftigt uppsprucken är bergspänningarna att betrakta som noll eller nära noll, medan enskilda banknings- eller sprickplan har mindre påverkan på spänningsfältet (Berg 2005). Bergspänningar mätta i djupa borrhål (100–1000 m) eller spänningar från fokalplansanalyser av recenta jordskalv på stora djup är således inte alltid representativa för den översta mer eller mindre tryckavlastade delen av berggrunden (jämför Berg 2005, Perman & Sjöberg 2007) inom vilken de flesta infrastrukturprojekt drivs.

I ett underlag för projektering av Citybanan har Perman & Sjöberg (2007) sammanställt och tolkat yttlig bergspänningsinformation från olika projekt inom Stockholmsområdet (fig. 26). All

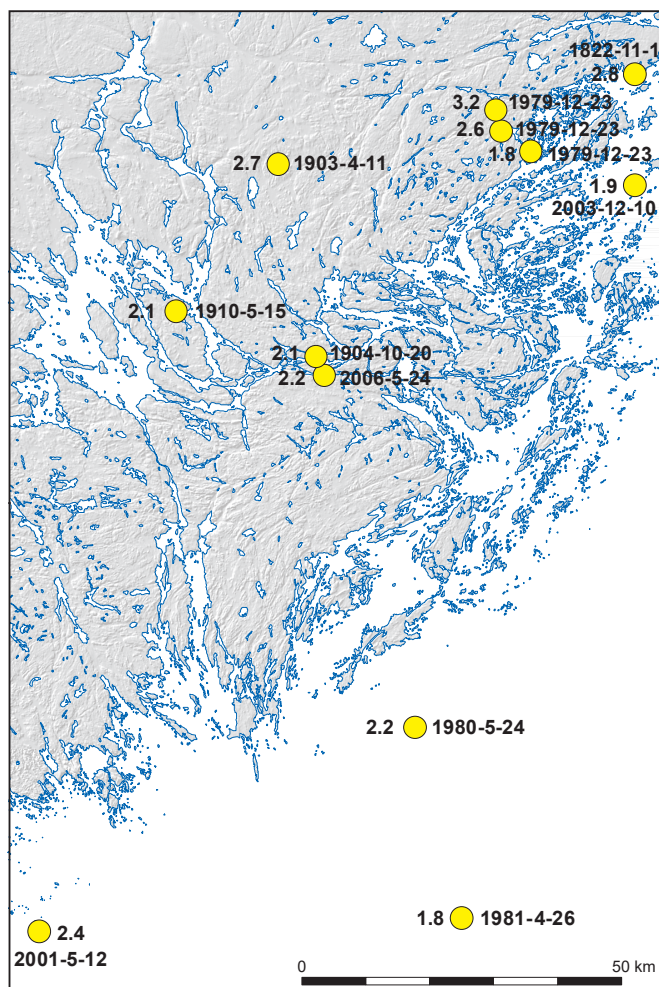


Figur 26. Riktning och storlek på största horisontal-spänningen i Stockholmsområdet (efter Perman & Sjöberg 2007).

information kommer från mätningar som utförts på ett vertikalt djup mellan 10 och 65 m. Riktningen på den största horisontalspänningen från alla mätningar i Stockholmsområdet varierar huvudsakligen mellan västnordväst–östsydöstlig och nordnordväst–sydsydöstlig. Även om en viss spridning föreligger är riktningen på de uppmätta största horisontalspänningarna likartad riktningen på den regionala horisontella huvudspänningen. Utifrån geologisk information, med Söder Mälarstrandsförkastningen ("Söderströmsförkastningen") som viktig gräns, samt resultat från spänningsmätningar delades Citybanans sträckning in i tre spänningsdomäner: Norrmalm, Riddarholmen och Södermalm (Perman & Sjöberg 2007). Inom Norrmalm varierade orienteringen av den största horisontalspänningen mellan 100° och 176°, medan spridningen på Södermalm var mycket stor. Mätningarna på Södermalm pekade mot en mer öst–västlig orientering vilket skulle kunna innebära att orienteringen är påverkad av de öst–västliga förkastningszonerna söder och norr om Södermalm. Osäkerheten bedömdes dock som mycket stor (Perman & Sjöberg 2007). På Riddarholmen bedömdes spänningsprofilerna vara likartade de på Norrmalm.

Recent seismicitet

Stockholmsområdet och resten av östligaste Svealand karaktäriseras av endast ett fåtal historiskt (1375–1970) och instrumentellt (1971–2012) registrerade jordskalv. I figur 27 visas magnitud och datum för de registrerade jordskalven i Stockholmsområdet. Notera de två jordskalven som är



Figur 27. Magnitud och årtal för historiskt (1375–1970) och instrumentellt (1971–2012) registrerade jordskalv i Stockholmsområdet. Data från Fencat (2016) och SNSN (1904). Notera att osäkerheten i precisionen kan vara upp till 2 km för de instrumentellt registrerade skalven och ännu större för de historiska.

lokaliserade utefter förkastningarna norr och söder om Södermalm. Detta kan indikera att jordskalven är relaterade till förkastningarna. Det är dock viktigt att notera att osäkerheten i precisionen kan vara upp till 2 km för de instrumentellt registrerade skalven och ännu större för de historiska.

Sammanfattning av Stockholmsområdets berggrundsgeologiska utveckling

Tabell 1 sammanfattar översiktligt den geologiska utvecklingen i Stockholmsområdet, från de äldsta processerna när berggrunden bildades och de geologiska processer och händelser som där efter har eller kan ha påverkat berggrunden i området fram till nutid. Efter det att berggrunden bildats, omvandlats och deformerats under den svekokarelska orogenesen och sedan stabiliserats för 1,8–1,7 miljarder år sedan, är effekten av den efterföljande geologiska utvecklingen i första hand fokuserad på reaktiveringar och eventuell nybildning av strukturer eller svaghetszoner orsakade av uppbyggda spänningar i berggrunden. Spänningsförändringar i den stabiliserade berggrunden kan vara en distal effekt av yngre orogena förlopp, men även orsakas av belastningar och avlastningar som en följd av till exempel sedimentation och erosion samt glaciation och deglaciation.

När det gäller förståelsen av den geologiska utvecklingen är tillgången till mer eller mindre exakta åldersbestämningar av bergarter, metamorfa omvandlingar och deformationer relativt god när det gäller den äldre geologiska utvecklingen, det vill säga när berggrunden bildades, fortfarande var plastisk och fram till dess stabilisering. För händelser och processer som påverkat berggrunden i den efterföljande geologiska utvecklingen är tillgången till åldersbestämningar däremot sparsam. Framförallt gäller detta åldern på reaktiveringen och eventuell nybildningen av spröda

Tabell 1. Översiktlig sammanfattning av den geologiska utvecklingen i Stockholmsområdet

Ålder (miljoner år)	Geologisk händelse	
Nutid	Recent seismicitet?	
0,115–0	Glaciation-deglaciation; syn- till post-glaciala förkastningsrörelser?	
510–400	Spröd reaktivering av deformationszoner eller sprickor som en distal effekt av den kaledoniska orogenesen?	
540–420	Sedimentation; kambrisk sandsten i sprickor	
700–600	Erosion, bildning av det subkambriska peneplanet	
1100–900	Spröd reaktivering av deformationszoner eller sprickor som en distal effekt av den svekonorvegiska orogenesen?	
1260?	Intrusion av diabas	
1500–1250	Sedimentation ("Mälarsandsten")	
1660–1520	Spröd reaktivering av deformationszoner/sprickor som en distal effekt av den gotiska orogenesen?	
1800–1700	Övergång från plastisk till spröd deformation (berggrunden avsvannat under cirka 300 °C)	
1840–1800	Svekokarelska orogenesen	Intrusion av granit ("Stockholmsgranit") och underordnad pegmatit och aplit
1840–1810		Höggradig metamorfos (M2) och deformation (D2), bildning av plastiska deformationszoner
1870–1860		Intrusion av diabas
1880–1860		Höggradig metamorfos (M1) och deformation (D1)
1900–1870		Intrusion av gabbroid-granitoid och underordnad syenitoid och diabas
1910–1900		Sedimentation och vulkanisk aktivitet
2000–1800		Svekokarelska orogenesen

deformationszoner (förkastningar). Detta innebär vanligtvis att endast en relativ åldersbestämning kan göras eller att åldern bara kan begränsas till ett mer eller mindre stort tidsintervall. Möjligheten att relativt åldersbestämma rörelser i spröda deformationszoner begränsas dessutom av avsaknaden av tidsmarkörer i form av bergarter som är yngre än 1 miljard år i Stockholmsområdet. Enda möjligheten att relativt åldersbestämma yngre rörelser i spröda deformationszoner är dokumenterad förskjutning av det subkambriska peneplanet eller påverkan på sprickor som är fyllda med kambrisk sandsten, vilket i bägge fallen skulle tyda på att rörelser skett i kambrisk till postkambrisk tid. Sålunda är kunskapen om eventuella rörelser i berggrunden under de senaste 1 miljard åren fram till nutid mycket begränsad (jämför dock erfarenheterna och kunskapen som nämnts ovan från Forsmark).

Framtida berggrundsgeologiska arbeten av vikt i Stockholmsområdet

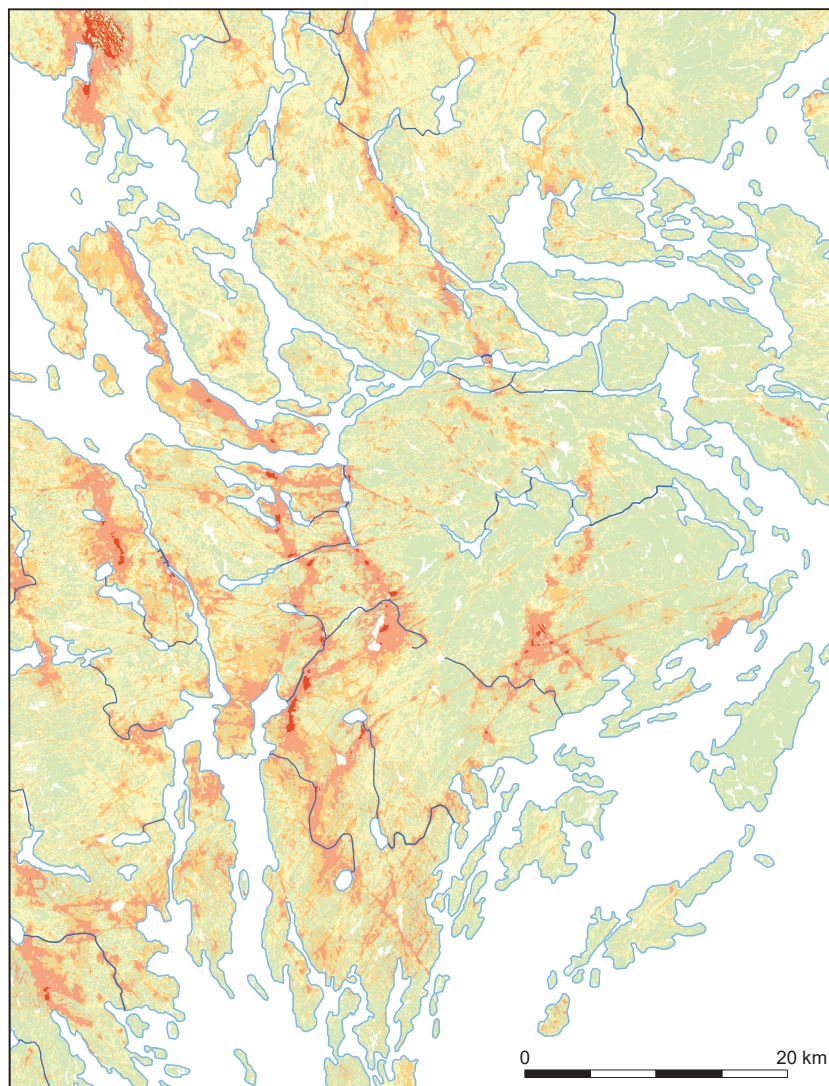
Bristen på berggrundsgeologisk information i Stockholmsområdet ur ett geologiskt utvecklingsperspektiv rör i första hand dokumentation och karaktärisering av såväl plastiska som spröda deformationszoner, samt även en förståelse av de spröda strukturerna i blocken mellan de större deformationszonerna. Nedan följer ett antal studier som bedöms som viktiga för att förbättra kunskapen om Stockholmsområdets berggrund, inte minst ur ett byggnadsgeologiskt och infrastrukturellt perspektiv, samt även för förståelsen av den geologiska utvecklingen:

- På berggrundskartorna över Stockholmsområdet finns mylonit markerad på ett flertal ställen vilket indikerar zonrelaterad kraftig plastisk deformation. Som ett komplement till resultaten av studier i Ornö bandserie och östligaste delen av Värmdölandet (Persson & Sjöström 2002), behöver en fokuserad studie utföras av indikerade plastiska deformationszoner i resterande delen av Stockholmsområdet, som innefattar bekräftelse av dess förekomst, dokumentation och kinematisk karaktärisering.
- Dokumentation och karaktärisering av spröda deformationszoner (förkastningar) genom fältkontroll av strategiska hållar, samt studier av borrhälsar och tunnlar. Detta innefattar utvärdering och sammanställning av befintlig information från ytkartering, borrhälsar och tunnlar, eventuell uppdatering av befintlig information, samt ny dokumentation där sådan är möjlig.
- Regional sammanställning av befintlig och tillgänglig sprickinformation. Där information saknas behöver kompletterande sprickartering utföras i strategiskt utvalda delar av Stockholmsområdet.
- En utvärdering av sprick-, sprickzons- och lineamentsinformation bör göras för att se om underlaget medger en indelning av Stockholmsområdet i olika sprödtektoniska domäner.

JORDARTSGEOLOGI

Regionalgeologisk bakgrund

Stockholmsområdet hör till jordartsregionerna ostkustens berg- och lerområde och Östra Svealands berg-, morän- och lerområde (Persson 1995). Dessa regioner karaktäriseras av att jordtäckte till stor del saknas och att lägre liggande områden och sprickdalar är fyllda med finkorniga sediment. De största jorddjupen finns i större lerområden och i områdets isälvavlagringar (fig. 28). De kvartärgeologiska avlagringarnas förekomst, landformer och egenskaper återspeglar inlandsisens dynamik i området, jordarternas bildningsmiljö och utvecklingen i området efter det att de glaciala processerna avklingat. I Stockholmsområdet framgår det tydligt hur isavsmältningens dynamik påverkat förekomst och egenskaper hos de glaciala jordarterna, och att landformerna och isavsmältningen representerar slutet av den senaste istiden och övergången till ett varmare klimat



Figur 28. Översiktlig bild som visar jorddjupsförhållandena i Stockholmsområdet med omnejd.

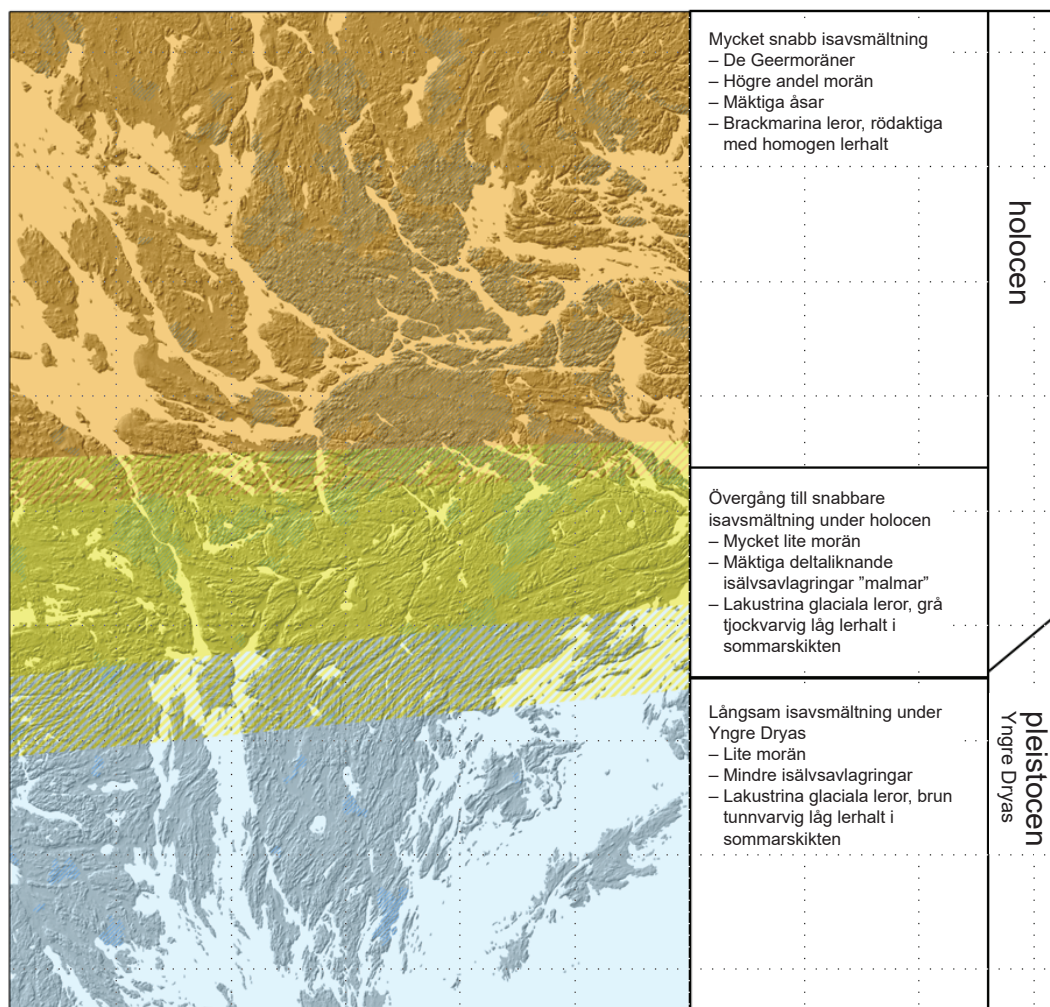
Jorddjup (m)

0–1 2–5 6–10 11–30 31–195

under holocen (fig. 29). Eftersom hela området ligger under högsta kustlinjen är området starkt präglat av jordarter avsatta under Östersjöns olika stadier fram till i dag, samt de strand- och kust-processer som verkat på landskapet då det stigit ur havet.

Isavsmältningen

Avsmältningen av den senaste inlandsisen i Stockholmsområdet ägde rum under en period av omkring 1000 år mellan 12 000 och 11 000 år före nutid (Brunnberg 1995, Stroeve m.fl. 2016). Detta betyder att den senaste inlandsisen lämnade området vid övergången från den sista kallperioden under pleistocen till efterföljande varmperiod, holocen, som vi har i dag (fig. 29). I de södra delarna av Södertörn drog sig iskanten tillbaka 70–100 m per år för att i höjd med Mälaren öka till 200–300 m per år. Isrörelseriktningen vid nedisningens slutskede var i huvudsak ifrån nordväst, men när hastigheten i isavsmältningen ökade kom isrörelseriktningen att vrida till en mer nordlig riktning. I området finns även en äldre isrörelseriktning från västnordväst. Den senare representerar ett äldre nedisningsstadium och är knuten till en äldre morän avsatt från västnordväst (Möller & Stålhös 1965).



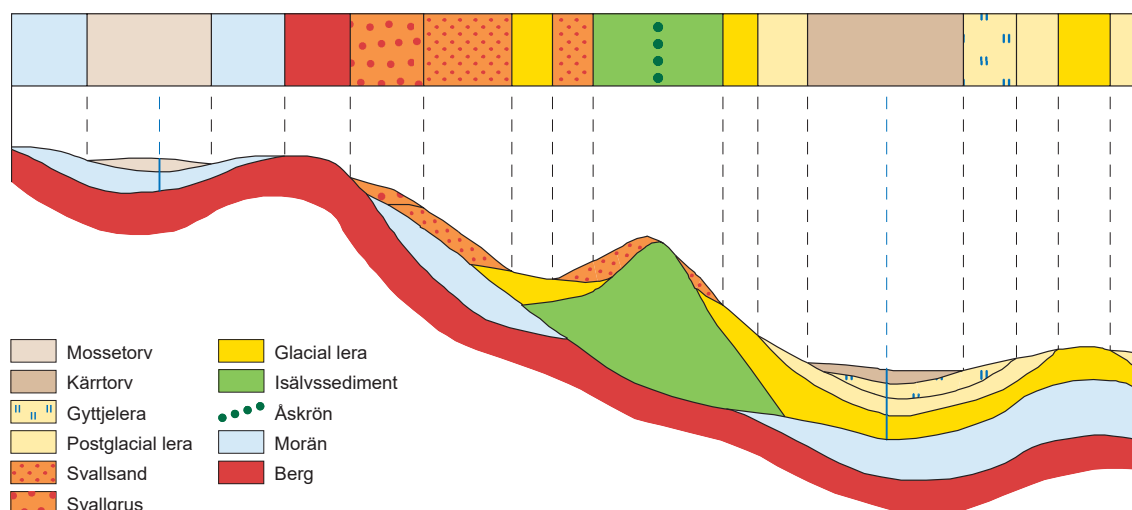
Figur 29. Generaliserad bild av under vilka förhållanden som isavsmältningen skett i Stockholmsområdet och huvuddragen i de glacialt bildade jordarternas egenskaper, utbredning och landformer typiska för de olika perioderna.

Östersjöns utveckling och nivåförändringar

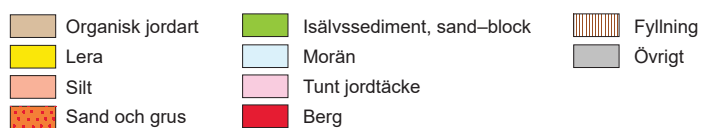
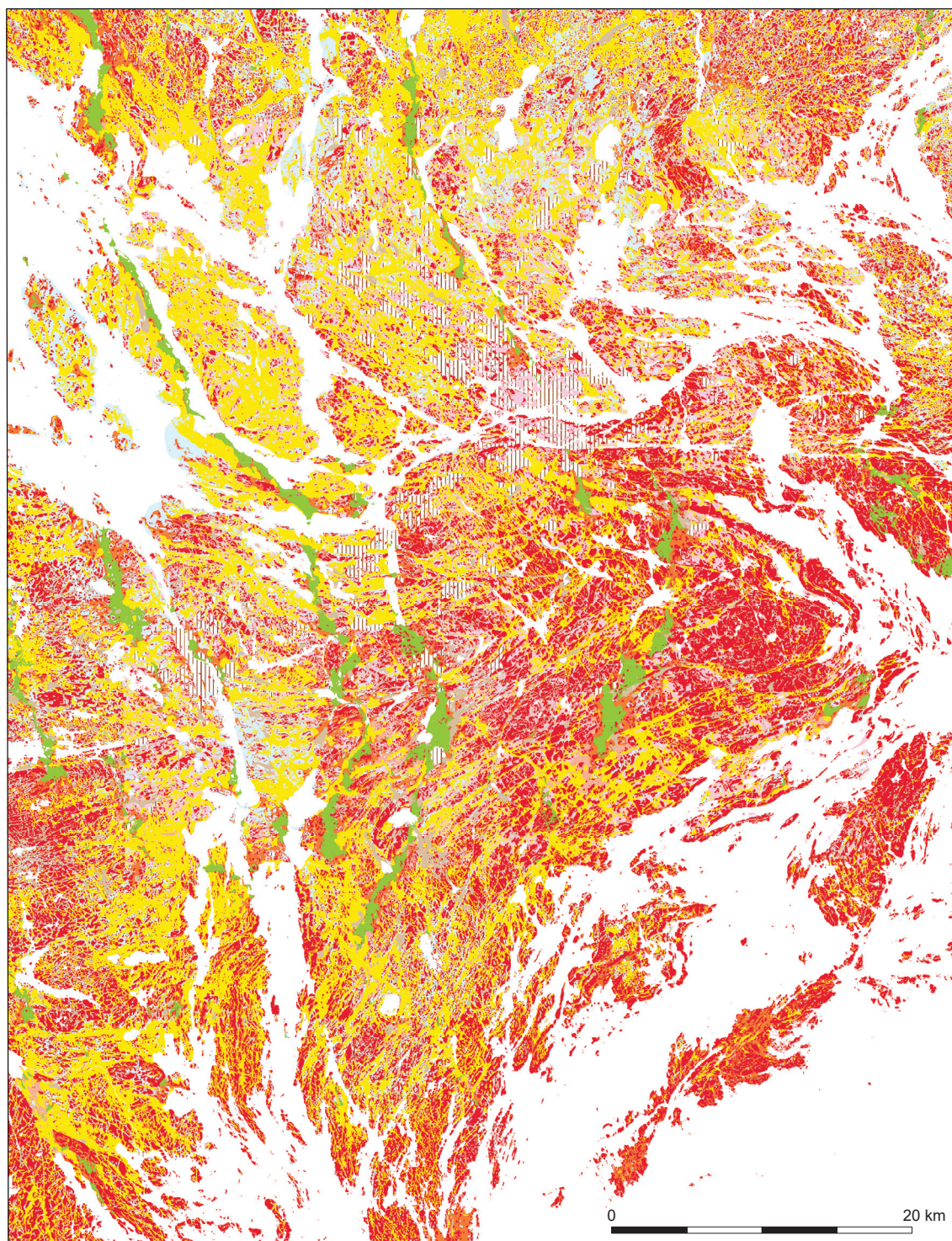
Hela Stockholmsområdet ligger under högsta kustlinjen och vid isavsmältningen låg vattennivån i Östersjöbassängen omkring 150 m över dagens havsnivå i området (Lundqvist 1995, Florin 1944). De avsättningar av sediment som skett i Östersjön fram till i dag, samt av strand- och kustprocesser i samband med att området höjt sig ur havet har haft stor påverkan på områdets jordartsförhållanden. Vattendjupet vid isavsmältningen var i stora delar av de områden som i dag är land över 100 m. Det här gör att den avsättning av finkorniga jordarter som skett under de olika stadierna av Östersjöns utveckling från det att isen lämnade området fram till i dag präglar landskapet. Miljöförhållandena under dessa olika stadier har styrt hur kraftig bildningen av sediment varit och vilka typer av sediment som avsatts och deras egenskaper. Glaciala finkorniga sediment avsatta i Baltiska issjön och Yoldiahavet förekommer i form av varviga leror. Under det efterföljande Ancylus-stadiet kom postglaciala leror att sedimentera över de glaciala lerorna. Ancylussjön följdes i sin tur av Littorinahavet. Under de brackmarina, varma och näringsrika förhållandena som rådde i Littorinahavet kom organiska gyttjeleror att avsättas. Sedan Littorinahavets början för cirka 8 500 år sedan har brackmarina förhållanden existerat i Östersjön.

Jordtäcket och dess landformer

Eftersom området i sin helhet ligger under högsta kustlinjen är det vanligt att yngre jordarter täcker tidigare avsatta jordarter. I figur 30 visas en generaliserad bild över hur jordarterna fördelar sig på djupet. Området hör till östra Sveriges berg- och lerområden vilka till stor del karaktäriseras av avsaknaden av jordtäckte i höjdområden och mäktiga avlagringar av finkorniga havs- och sjösediment i dalgångar och på lägre höjdnivåer (fig. 31). Morän förekommer sparsamt och större sammanhängande områden med morän är ovanliga. Karaktäristiskt för området är även de stora åsar med isälvsmaterial som går genom landskapet i nord-sydlig riktning och visar på den stora mängd sediment som fördes ut från den, från området, snabbt retirerande inlandsisen.



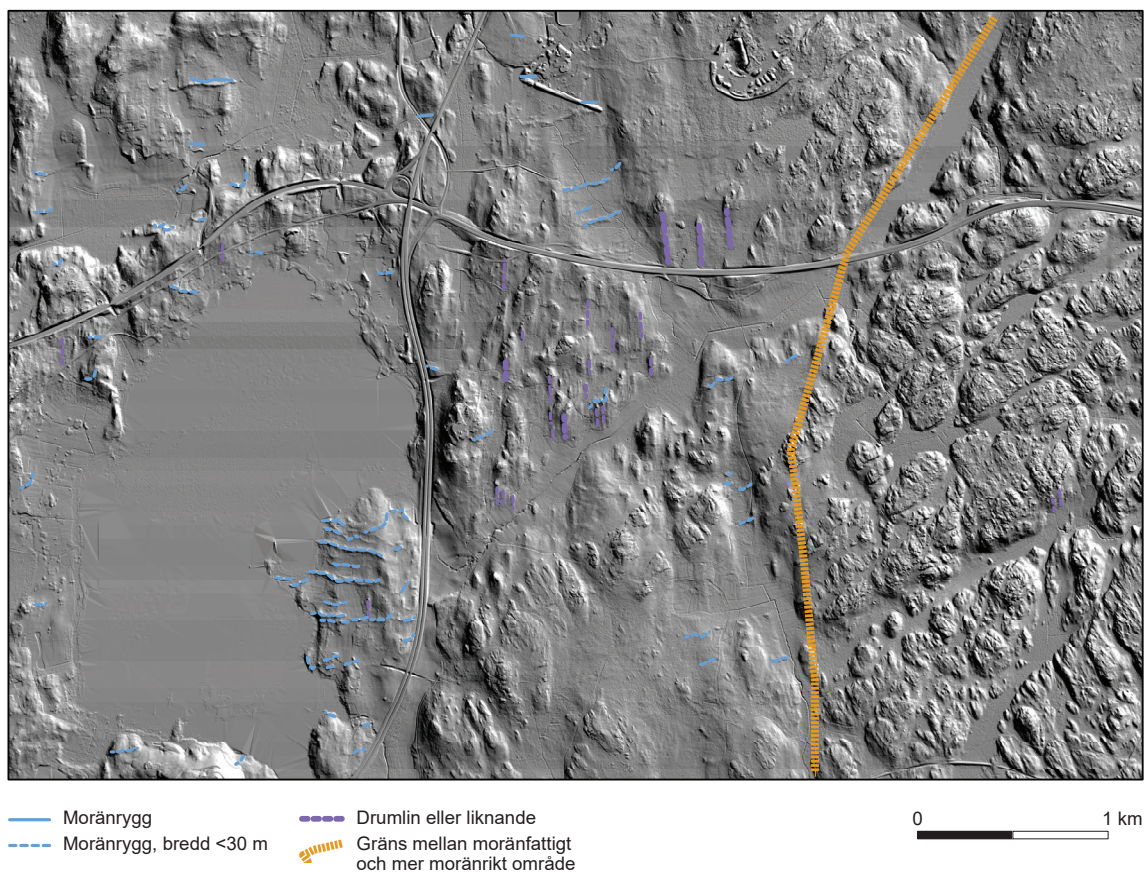
Figur 30. Generaliserad bild över jordarternas fördelning på djupet i östra Sverige.



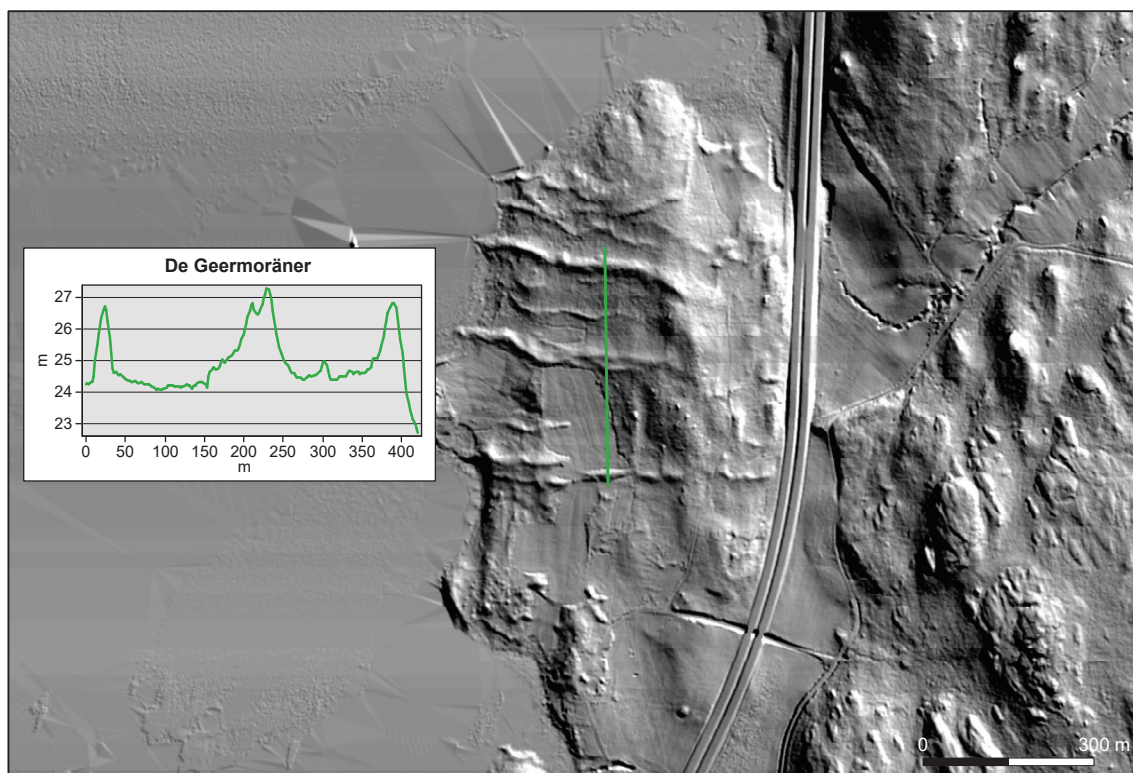
Figur 31. Förenklad jordartskarta över Stockholmsområdet. Områden med kalt berg och tunt jordtäckte samt lera dominerar i området.

Morän

Morän förekommer mycket sparsamt vid markytan inom området, men finns ofta på djupet under yngre jordarter (fig. 31). Mäktigheten är oftast inte mer än ett par meter men morän med större mäktighet kan förekomma på läsidan av uppstickande bergpartier i förhållande till isrörelseriktningen. Det är tydligt att områden med ett mer sammanhängande moräntäcke är vanligare norr om Mälaren och att morän förekommer särskilt sparsamt på Södertörn. En lerig och gråaktig morän förekommer i området under den mer vanligt förekommande sandiga-siltiga moränen. Den förra benämns ofta ”gamla blå” och representerar troligen ett tidigare stadium av den senaste nedisningen. Gamla blå är ofta kompakt och överkonsoliderad och finns framförallt på läsidan av uppstickande bergkullar, i förhållande till den huvudsakliga isrörelseriktningen vid senaste isavsmältningen. Förutom de läsidesmoräner med drumlinform som finns i området förekommer även rikligt med De Geermoräner (fig. 32). De Geermoränerna är karaktäristiska för Mälardalens kvartärgeologi och förekommer ofta tillsammans i svärmar. De Geermoränerna är lägre, 2–5 m höga, och mer oregelbundna och vindlande än vanliga moränryggar, i de flesta fall inte mer än något tiotal meter breda och i huvudsak orienterade parallellt med iskanten (fig. 33). I många fall är De Geermoränerna blockrika, särskilt om de förekommer i odlingslandskapet där människan fyllt på med block och sten från uppodlingen av omkringliggande mark.



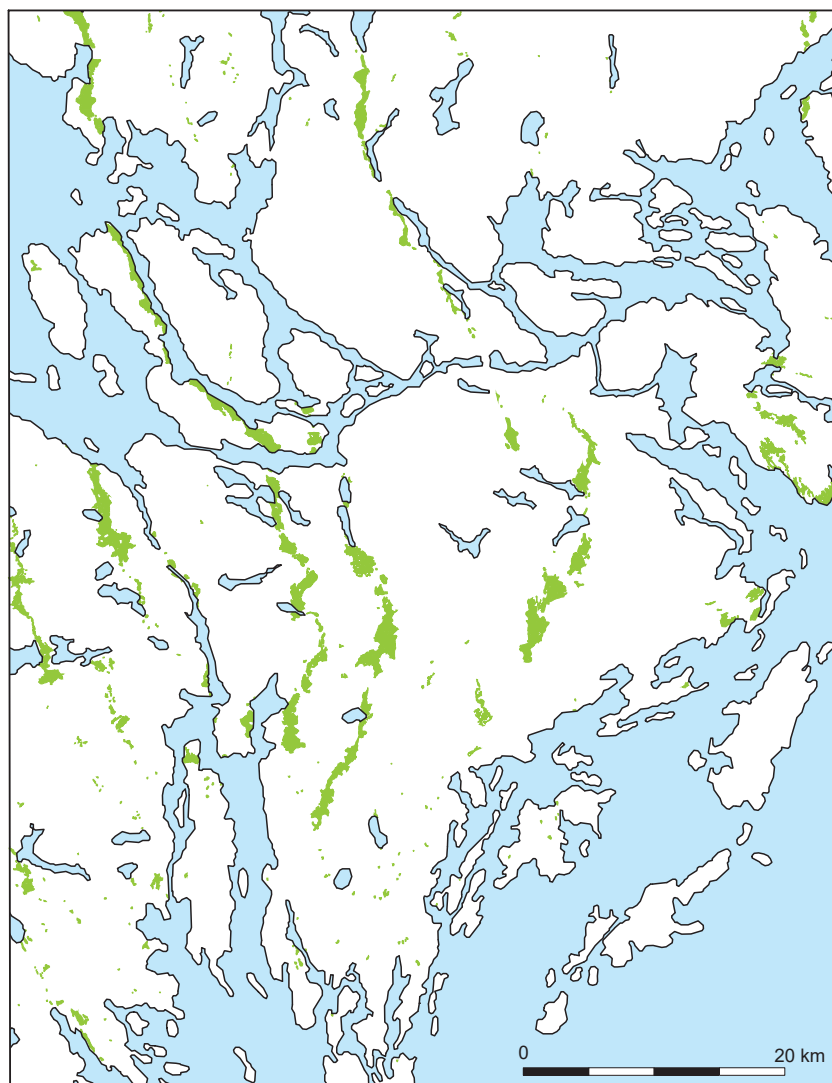
Figur 32. Höjdmodell över ett område där det i öster är ett mycket begränsat moräntäcke och ett område i väster där moräntäcket är mäktigare. I det senare området är läsidesdrumliner rikligt förekommande. Dessa saknas nästan helt där moräntäcket i övrigt även är tunt. I bilden syns även ett flertal De Geermoräner (blå färg) i huvudsak orienterade tvärs mot den senaste isrörelseriktningen.



Figur 33. Profil över tre De Geermoräner. Avståndet mellan De Geermoränerna är omkring 200 m och de höjer sig 2 till 3 m över omgivande terräng.

Isälvsavlagringar

Det mellansvenska låglandet karaktäriseras av mäktiga subakvatiskt bildade åsar bildade parallellt med den riktning som inlandsisen retirerat i. I figur 34 visas de större isälvsavlagringarna inom Stockholmsområdet. Jordmäktigheten i åsarna kan vara över 50 m. Uppbyggnaden är ofta komplex och återspeglar tillförsel av smältvatten och sediment från inlandsisen, men också den omfattande svallning som skett av åsarna när de stigit ur havet. I regel finns en kärna av grövre stenigt grusigt material draperat av ett mer sandigt grusigt material (Lundqvist 1979). Dessa primära glacifluvialt avsatta material har sedan omlagrats av svallning och strömmar. De svallsediment som ofta täcker åsarnas sidor underlagras ofta av lera som går upp längs åsarnas sidor. Åsarna utgör väsentliga grundvattenmagasin med stor potential för uttag av grundvatten. Där åsarna är mindre mäktiga kan de vara helt täckta av leror och landformen syns inte alls i landskapet. Speciellt för Stockholmsområdet är de så kallade malmarna vilka är stora, mäktiga deltaliknande bildningar, där Pålalm på Södertörn är den sista kvarvarande där man kan se deras karaktär och landform. Malmarna är mycket komplext uppbyggda och representerar en period då isavsmältningen började öka på grund av ett varmare klimat vid övergången från pleistocen (Yngre Dryas) till holocen (Lundqvist & Vilborg 1998). Sedimenttillförseln ökade men iskanten retirerade ännu inte så snabbt norrut vilket gjorde att materialet byggde upp dessa stora isälvsavlagringar. I området söder om malmarna är isälvsavlagringarna mycket mindre. I norra delen av Stockholmsområdet, där hastigheten hos isavsmältningen ökar markant (fig. 29), kan man i vissa åsar se en variation i hur de har bildats med omväxlande mäktigare partier som framträder som kullar med lägre smalare partier emellan (Lundqvist 1999). Detta kan återspegla en viss cyklicitet i isavsmältningens intensitet beroende på variationer i klimatet (Lundqvist 1999).



Figur 34. Isälvsvlagringar i Stockholmsområdet.

Isälvsvlagringar Vatten

Finkorniga glaciala sediment

Glaciala leror täcker stora ytor i regionen och utgör även den huvudsakliga andelen av leravsättningarnas mäktighet (fig. 31). Typiskt jorddjup i mer omfattande lerområden i Stockholmsområdet är 10–20 m, i enstaka fall kan mäktigheterna vara över 30 m. I mindre lerområden och i berg- och moränterräng är mäktigheten oftast inte mer än 5 m. De glaciala lerorna i området är varviga och i de understa lagren av glacial lera är det vanligt med sandiga och siltiga lager. Varven blir tunnare högre upp i lagerföljden och lerhalten är även oftast högre. De glaciala lerorna i området är kalkhaltiga, men kalkhalten är lägre i lerorna avsatta på de södra delarna av Södertörn. Egenskaperna hos de glaciala lerorna varierar och förändras inom området på grund av hur karaktären hos isavsmältningen förändrats när inlandsisen dragit sig tillbaka över området, och att vattenmiljön har förändrats under tiden (fig. 28). Under Baltiska issjöns stadium är de glaciala lerorna avsatta i en sötvattensmiljö och är tydligt varviga. Under det efterföljande Yoldiastadiet kom lerorna att avsättas under brackmarina förhållanden och varven är här mer otydliga (fig. 35). Det är även en viss skillnad i lerhalt mellan de glaciolakustrint och de glaciomarint avsatta lerorna, där lerhalten är högre i de senare (Brunnberg 1995). Hos de glaciolakustrint avsatta lerorna är det även en tydlig

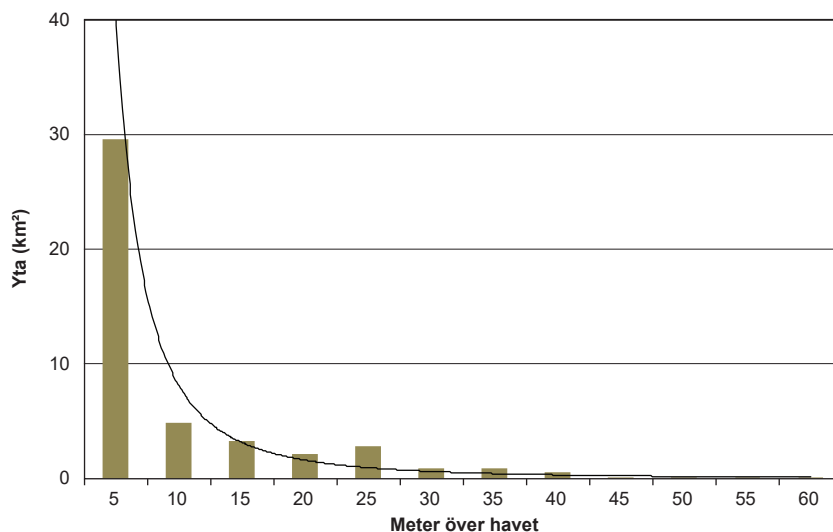


Figur 35. Diffust varvig lera avsatt under Yoldiahavets brackmarina fas. De ljusa skikten är avsättningen under början av året vilket övergår till brunrött skikt vilket representerar sommar och höst. Årsvarvet avslutas med ett mörkare brunt till svart skikt vilket representerar sedimentationen under vintern. Foto: Stefan Wastegård.

skillnad i lerhalt mellan sommar- och vinterdelen av varven, där lerhalten för sommardelen av varven är omkring 25 % och i vinterdelen drygt 70 % (Brunnberg 1995). Denna skillnad i lerhalt mellan sommar- och vinterdelarna av varven finns i stort sett inte hos de brackmarint avsatta glaciala lerorna. Utsätts de glaciala lerorna för belastning, till exempel i form av byggnader eller vägbankar, kan resultatet bli en konsolidering av lerorna vilket ger upphov till sättningar. Sättningar i lerområden kan även uppkomma om grundvattennivån i ett lerområde sänks.

Postglaciala finsediment

På lägre nivåer och i större sedimentationsområden som varit öppna fjärdar med större vattendjup finns postglaciala leror som är gråa i färgen och i regel inte kalkhaltiga. Mäktigheten hos de postglaciala lerorna är, jämfört med de glacialt avsatta sedimenten, små och oftast inte mer än någon till några meter. De postglaciala lerorna är i huvudsak avsatta under Östersjöns Ancylustadium. I fjärdar av Littorinahavet och yngre stadier i Östersjöns utveckling har det avsatts gyttjeleror som har ett innehåll av organiskt material på 1–6 %. Eftersom gyttjelerorna innehåller sulfider kan de när de oxideras bilda sura sulfatjordar till exempel vid dikning eller schaktning. Vid oxidationen sänks pH och det sker en urlakning av tungmetaller (Sohlenius 2011). I Stockholmsområdet förekommer gyttjeleror i första hand på nivåer nära dagens havsyttnivå (fig. 36), främst i anslutning till Mälaren och grunda vikar av Östersjön. På nivåer över 25 m över havet finns gyttjeleror endast i mycket liten utsträckning. Mäktigheten hos gyttjelerorna är ofta inte mer än 1 m men på lägre nivåer kan mäktigheten uppgå till några meter. Precis som de finkorniga glaciala lerorna kan belastning i form av till exempel byggnader eller vägbankar resultera i en konsolidering av lerorna vilket ger upphov till sättningar. På grund av deras innehåll av organiskt material, vattenhalt och uppbyggnad är deras bärighet väsentligt sämre än vad det gäller de glaciala lerorna. Sättningar i lerområden kan även uppkomma om grundvattennivån i ett lerområde sänks.



Figur 36. Utbredning av gyttjeleror i 5-metersintervall i Stockholmsområdet. Den största delen av gyttjelerorna förekommer på nivåer nära dagens havsyttenivå.

Skred och raviner

Det finns väldigt få områden med spår av skred eller där det har bildats raviner. De skredärr och raviner som finns inom Stockholmsområdet förekommer främst på Södertörn, och inga områden med raviner eller skredärr finns norr om Mälaren (SGU databas skred och raviner). De skredärr och ravinområden som finns ligger nästan uteslutande i anslutning till isälvsavlagringar. Förklaringen till detta är att det finns stratigrafiska och hydrogeologiska förutsättningar som gör att skred kan utlösas och att raviner kan bildas. I anslutning till isälvsavlagringarna är jordlagerföljderna komplexa med omväxlande ler- och sandlager, samt att lerorna klättrar upp på isälvsavlagringarnas sluttningar. Eftersom isälvsavlagringarna utgör mäktiga grundvattenmagasin finns förutsättningar för höga portryck som kan utlösa skred. Ravinbildningen i anslutning till isälvsavlagringarna är bildade i distala siltrika leror, och är också kopplad till isälvsavlagringarnas grundvattenföring. Att raviner och skred saknas i anslutning till isälvsavlagringarna norr om Mälaren beror delvis på att isavsmältningen här varit mycket snabbare och att det därmed inte har funnits samma möjlighet till att bygga upp komplexa lagerföljder samt att topografin är mindre kuperad. De glaciala lerorna är i de norra delarna av området mer homogent uppbyggda avseende lerhalt och inslag av sand- och siltlager.

Svallsediment

Eftersom hela Stockholmsområdet ligger under högsta kustlinjen har jordarterna och landskapet i mer eller mindre stor utsträckning påverkats av havets vågor och strömmar. I anslutning till de stora isälvsavlagringarna, med stor tillgång på sand och grus för vattnet att bearbeta, kan svallgrusavlagringarna vara mäktiga och ha större utbredning. I övrigt förekommer svallavlagringar i ganska stor utsträckning men har oftast inte en större mäktighet än 2 m. I högre terräng ligger svallsanden och svallgruset oftast på morän eller direkt på berget. I anslutning till lerområden och isälvsavlagringar är det vanligt att lera underlagrar svallsanden eller ligger som lager i svallsanden.

Torv

Torvmarkerna i regionen är oftast relativt små och utgör 5–10 % av landarealen. Den lägsta andelen finns i de södra delarna av Södertörn och längs med kusten. Området hör till Svealands lägre fornsjöområde (von Post & Granlund 1928) och torvmarkerna här är i huvudsak igenväxningstorvmarker och underlagras därför oftast av organiska sjö- och havssediment i form av gyttjor och gyttjeleror. Dessa underlagras i sin tur ofta av postglaciala och glaciala leror. Både kärr och mossar förekommer, där kärr dominerar över mosstorvmarker framförallt i de norra delarna av området. Den övervägande torvmassan utgörs därför av olika typer av kärrtorv främst starr-vitmosstorv. Eftersom landskapet är ungt är torvdjupet i många kärrtorvmarker inte mer än 1 till 2 m, men i mosstorvmarker kan större torvdjup förekomma, framförallt på högre nivåer i landskapet. Torvdjupet kan här vara mellan 3 och 4 m.

REFERENSER

- Alfvén, L., 2015: Structural and engineering geological investigation of fracture zones and their effect on tunnel construction. *Examensarbete vid institutionen för geovetenskaper*, Uppsala universitet, nr 335, 78 s. ISSN 1650-6553.
- Andersson, U.B. & Swindell, R., 2008: Engineering geology along the planned northern stretch of the city line (Citybanan) tunnel system, north-central Stockholm, Sweden. *International Geological Congress 33, Oslo, Abstract volume*.
- Armengol, A.A., 2012: Comparison between pre-investigations and detailed geotechnical site characterization of City Link, Stockholm. *TRITA-LWR Degree project 12:26*, 38 s.
- Berg, S., 2005: Bergspänningar på litet djup. Examensarbete, Luleå tekniska universitet, Civilingenjörsprogrammet 2005:246, 60 s. ISSN 1402-1617.
- BFS, 1990: Nybyggnadsregler ändringar. *Boverkets författningssamling. BFS 1990:28, nr 2*. Stockholm. ISBN 91-38-12510-2.
- Brunnberg, L., 1995: Clay-varve chronology and deglaciation during the younger Dryas and Preboreal in the easternmost part of the Middle Swedish Ice Marginal Zone. *Quaternaria ser A, 2*. Stockholms universitet.
- Caine, J.S., Evans, J.P. & Forster, C.B., 1996: Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* 24, 1025–1028.
- FENCAT, 2016: University of Helsinki, Finland, <www.seismo.helsinki.fi/english/bulletins/catalog_north-europe.html>, senast åtkommen 2018-04-18.
- Florin, S., 1944: Havsstrandens förskjutningar och bebyggelseutvecklingen i östra Mellansverige under senkvartär tid. *Geologiska Föreningens i Stockholms Förhandlingar* 66, 551–634.
- Fox, A., La Pointe, P., Hermanson, J. & Öhman, J., 2007: Statistical geological discrete fracture network model. Forsmark modelling stage 2.2. *Svensk Kärnbränslehantering AB R-07-46*, 272 s, exkl. bilaga.
- Fries, J.O., Wahlqvist, A.H. & Törnebohm, A.E., 1863: Kartbladet Stockholm. *Sveriges geologiska undersökning Aa 6*, 75 s.
- Golder, 2014: Teknisk rapport. Geomodell Strömmen. Stockholms stad, Exploateringskontoret, dokumentnamn G7-RA-000-1005.
- Guldstrand, F., 2013: Kartering och beskrivning av spröda deformationsstrukturer i södra Stockholm ur ett ingenjörsgelogiskt perspektiv. Självständigt arbete nr 74, kandidatexamen, Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala universitet, 33 s.
- Gustafson, G., 2009: *Hydrogeologi för bergbyggare*. Forskningsrådet Formas T2:2009, 167 s. ISBN 978-91-540-6029-0.

- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., & Müller, B., 2008: The World Stress Map database release 2008. doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
- Hermansson, T., Stephens, M.B., Corfu, F., Page, L.M. & Andersson, J., 2008: Migratory tectonic switching. Western Svecofennian orogen, central Sweden: Constraints from U/Pb zircon and titanite geochronology. *Precambrian Research* 161, 250–278.
- Hildebrand, L., 1994: Sprickor – i Stockholms berggrund. Opublicerat examensarbete 20 p. Geologiska institutionen, Stockholms universitet, 37 s.
- Ignea, S., 2015: Major fracture zones in Fiskarfjärden, Stockholm. *Examensarbete vid institutionen för geovetenskaper nr 323*, Uppsala universitet, 61 s. ISSN 1650-6553.
- Jelinek, C. & Eliasson, T., 2015: Strålning från bergmaterial. *SGU-rapport 2015:34*, Sveriges geologiska undersökning, 26 s.
- Lagerbäck, R. & Sundh, M., 2008: Early Holocene faulting and paleoseismicity in Northern Sweden. *Sveriges geologiska undersökning C 836*, 80 s.
- La Pointe, P., Fox, A., Hermanson, J. & Öhman, J., 2008: Geological discrete fracture network model for the Laxemar site. Site Descriptive Modelling SDM-Site Laxemar. *Svensk Kärnbränslehantering AB R-08-55*, 269 s.
- Lidmar-Bergström, K., 1994: Berggrundens ytformer. I C. Fredén (red.): Berg och jord. *Sveriges Nationalatlas*, 44–54.
- Lundqvist, J., 1979: Morphogenetic classification of glaciofluvial deposits. *Sveriges geologiska undersökning C 767*, 72 s.
- Lundqvist, J., 1994: Jordarterna. I C. Fredén (red.): Berg och jord. *Sveriges Nationalatlas*, 124–143.
- Lundqvist, J., 1999: Periodical sedimentation in Scandinavian eskers. *GFF* 121, 175–181.
- Lundqvist, J. & Vilborg L., 1998: Isavsmältning och israndlinjer i Sverige. I S. Andersen & S.S. Pedersen (red.): Israndlinjer i Norden. *Nordiska ministerrådet, TemaNord 1998:584*.
- Mattila, J. & Viola, G., 2014: New constraints on 1.7 Gyr of brittle tectonic evolution in southwestern Finland derived from a structural study at the site of a potential nuclear waste repository (Olkiluoto Island). *Journal of Structural Geology* 67, 50–74.
- Mikko, H., Smith, C. A., Lund, B., Ask, M. V. & Munier, R., 2015: LiDAR-derived inventory of post-glacial fault scarps in Sweden. *GFF* 137, 334–338.
- Morfeldt, D. & Persson, L., 1997: Research and documentation on the importance of engineering geology in some underground projects in Stockholm. *Tunneling and Underground Space Technology* 12, 473–477.
- Munier, R. & Talbot, C.J., 1993: Segmentation, fragmentation and jostling of cratonic basement in and near Äspö, southeast Sweden. *Tectonics* 12, 713–727.
- Möller, H. & Stålhös, G., 1964: Beskrivning till geologiska kartbladet Stockholm NO. *Sveriges geologiska undersökning Ae 1*, 148 s.
- Möller, H. & Stålhös, G., 1965: Beskrivning till geologiska kartbladet Stockholm NV. *Sveriges geologiska undersökning Ae 2*, 101 s.
- Möller, H. & Stålhös, G., 1969a: Beskrivning till geologiska kartbladet Stockholm SO. *Sveriges geologiska undersökning Ae 3*, 122 s.
- Möller, H. & Stålhös, G., 1969b: Beskrivning till geologiska kartbladet Stockholm SV. *Sveriges geologiska undersökning Ae 4*, 125 s.
- Mörner, N.-A., 2004: Active faults and paleoseismicity in Fennoscandia, especially Sweden. Primary structures and secondary effects. *Tectonophysics* 380, 139–157.
- Mörner, N.-A., 2005: An interpretation and catalogue of paleoseismicity in Sweden. *Tectonophysics* 408, 265–307.
- Perman, F. & Sjöberg, J., 2007: Initiala bergspänningar i Stockholmsområdet – Underlag för projektering av Citybanan. Rapport Vattenfall Power Consultant, 122 s.

- Persson, C., 1994: Jordartsregioner. I C. Fredén (red.): Berg och jord. *Sveriges Nationalatlas*, 143.
- Persson, L., 1998: Engineering geology of Stockholm. *The Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 57, 79–90.
- Persson, K.S. & Sjöström, H., 2002: Fold and shear accommodated convergence in eastern Bergslagen, central Sweden. I K.S. Persson: *Deformation zones in models and nature*. Ph. D. thesis, Uppsala universitet, 23 s.
- Persson, L., Sträng, M. & Antal, I., 2001: Berggrundskartan 10I Stockholm, skala 1:100 000. *Sveriges geologiska undersökning Ba 60*.
- Persson, L., Antal, I., Göransson, M., Lundqvist, S. & Sträng, M., 2002: Bergkvalitetskartan 10I Stockholm, skala 1:100 000. *Sveriges geologiska undersökning Ba 60 Bk*.
- Saintot, A., Stephens, M.B., Viola, G. & Nordgulen, Ø., 2011: Brittle tectonic evolution and paleostress field reconstruction in the southwestern part of the Fennoscandian Shield, Forsmark, Sweden. *Tectonics* 30, TC4002. doi:10.1029/2010TC002781.
- Sandström, B., Tullborg, E.-L., Smellie, J., MacKenzie, A.B. & Suksi, J., 2008: Fracture Mineralogy of the Forsmark Site. *Svensk Kärnbränslehantering AB R-08-102*, 113 s.
- Sandström, B., Tullborg, E.-L., Larson, S.Å. & Page, L., 2009: Brittle tectonothermal evolution in the Forsmark area, central Fennoscandian Shield, recorded by paragenesis, orientation and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of fracture minerals. *Tectonophysics* 478, 158–174.
- Sohlenius, G., 2011: Sulfidjordar och sura sulfatjordar – vad gör SGU? *SGU-rapport 2011:12*, Sveriges geologiska undersökning, 20 s.
- Smith, C. A., Sundh, M. & Mikko, H., 2014: Surficial geology indicates early Holocene faulting and seismicity, central Sweden. *International Journal of Earth Sciences* 103, 1711–1724.
- SNSN, 1904: Swedish National Seismic Network. Uppsala universitet. Other/Seismic network., doi:10.18159/SNSN.
- Stephens, M.M. & Wahlgren, C.-H., 2008: Bedrock evolution. I B. Söderbäck (red.): Geological evolution, palaeoclimate and historical development of the Forsmark and Laxemar-Simpevarp areas. *Svensk Kärnbränslehantering AB R-08-19*, 25–88.
- Stephens, M. B. & Andersson, J., 2015: Migmatization related to mafic underplating and intra-or back-arc spreading above a subduction boundary in a 2.0–1.8 Ga accretionary orogen, Sweden. *Precambrian Research* 264, 235–257.
- Stephens, M.B., Fox, A., La Pointe, P., Simeonov, A., Isaksson, H., Hermanson, J. & Öhman, J., 2007: Geology Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. *Svensk Kärnbränslehantering AB R-07-45*, 224 s.
- Stephens, M.B., Ripa, M., Lundström, I., Persson, L., Bergman, T., Ahl, M., Wahlgren, C.-H., Persson, P.-O. & Wickström, L., 2009: Synthesis of the bedrock geology in the Bergslagen region, Fennoscandian Shield, south-central Sweden. *Sveriges geologiska undersökning Ba 58*, 259 s.
- Stroeven, A. P., Hättestrand, C., Kleman, J., Heyman, J., Fabel, D., Fredin, O., Goodfellow, B.W., Harbor, J.M., Jansen, J.D., Olsen, L., Caffee, M.W., Fink, D., Lundqvist, J., Rosqvist, G.C., Strömberg, B. & Jansson, K.N., 2016: Deglaciation of Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews* 147, 91–121.
- Strålskyddsmyndigheterna i Danmark, Finland, Island, Norge & Sverige, 2000: *Naturally occurring radioactivity in the Nordic countries – recommendations*. The radiation protection authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden, 80 s. ISBN 91-89230-00-0.
- Stålhös, G., 1968: Stockholmstraktens berggrund. *Sveriges geologiska undersökning Ba 24*.
- Stålhös, G., 1969: Beskrivning till Stockholmstraktens berggrund. English summary. *Sveriges geologiska undersökning Ba 24*, 190 s.
- Stålhös, G., 1976: Aspects of the regional tectonics of eastern central Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 98, 146–154.

- Stålhös, G., 1991: Beskrivning till berggrundskartorna Östhammar NV, NO, SV, SO med sammanfattande översikt av basiska gångar, metamorfos och tektonik i östra Mellansverige. *Sveriges geologiska undersökning Af* 161, 166, 169, 172, 1–249.
- Sundius, N., 1939: Berggrunden inom sydöstra delen av Stockholms skärgård. *Sveriges geologiska undersökning C* 419, 93 s.
- Sundius, N., 1948: Beskrivning till berggrundskarta över Stockholmstrakten. *Sveriges geologiska undersökning Ba* 13, 98 s.
- Söderlund, U., Elming, S.-Å., Ernst, R.E. & Schissel, D., 2006: The Central Scandinavian Dolerite Group – protracted hotspot activity or back-arc magmatism? Constraints from U-Pb baddeleyite geochronology and Hf isotope data. *Precambrian Research* 150, 136–152.
- Söderlund, P., Hermansson, T., Page, L. M. & Stephens, M. B., 2009: Biotite and muscovite ⁴⁰Ar–³⁹Ar geochronological constraints on the post-Svecofennian tectonothermal evolution, Forsmark site, central Sweden. *International Journal of Earth Sciences* 98, 1835–1851.
- Terzaghi, R.D., 1965: Sources of error in joint surveys. *Geotechnique* 15, 287–304.
- Tröften, P.E., 1997: *Neotectonics and paleoseismicity in southern Sweden with emphasis on sedimentological criteria*. Doctoral thesis, Stockholms universitet, 124 s. ISBN-91-7153-627-2.
- Uski, M., Hyvönen, T., Korja, A. & Airo, M.-L., 2003: Focal mechanisms of three earthquakes in Finland and their relation to surface faults. *Tectonophysics* 363, 141–157.
- Vass, A., 2012: Structural model of the Lambarfjärden area from surface and subsurface data in connection with the E4 Stockholm bypass. *Examensarbete vid institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet nr* 237, 68 s. ISSN 1650-6553.
- Viola, G., Venvik Ganerød, G. & Wahlgren, C.-H., 2009: Unraveling 1.5 Ga of brittle deformation history in the Laxemar-Simpevarp area, south-east Sweden: A contribution to the Swedish site investigation study for the disposal of highly radioactive nuclear waste. *Tectonics* 28, TC5007, doi:10.1029/2009TC002461.
- von Post, L. & Granlund, E., 1928: Södra Sveriges torvtillgångar I. *Sveriges geologiska undersökning C* 335, 127 s.
- Wahlgren, C.-H., Curtis, P., Hermanson, J., Forssberg, O., Öhman, J., Fox, A., La Pointe, P., Drake, H., Triumf, C.-A., Mattsson, H., Thunehed, H. & Juhlin, C., 2008: Geology Laxemar. Site Descriptive Modelling SDM-Site Laxemar. *Svensk Kärnbränslehantering AB R-08-54*, 410 s.
- Åkerblom, G., Pettersson, B. & Rosén, B., 1990: Markradon. Handbok för undersökning av markradonförhållanden. *Byggforskningsrådets rapport R85:1988, reviderad utgåva 1990*, 160 s.
- SKB-rapporter i referenslistan kan laddas ner från SKBs webbplats www.skb.se.*

BILAGA 1. INGENJÖRSGEOLOGISKA ERFARENHETER FRÅN 50 ÅR MED GEOLOGI OCH BERGARBETEN I STOCKHOLMSTRAKTEN

I denna bilaga redogörs för erfarenheter från infrastrukturprojekt i Stockholmsområdet. För vidare läsning om ingenjörsgologi relaterad till Stockholm, se till exempel Morfeldt & Persson (1997) och Persson (1998).

Ingenjörsgelogiska erfarenheter från 50 år med geologi och bergarbeten i Stockholmstrakten

Mats Tenne

Geokonsult Tenne AB
Segeltorpsvägen 11
125 53 Älvsjö
mats.tenne@telia.com



Medelbrant lutande sprickplan vid bygget av en avisningsanläggning i Älvsjö.

Innehåll

Inledning.....	3
Allmänt	3
Långtidsstabilitet	3
Geologisk kartering	4
Förundersökning och förprojektering	5
Bergstabilitet	7
Bergspänningar och deformationsmätningar	8
Bergskärningar.....	11
Husgrunder	12
Bergras.....	14
Grundvatten, tunneltätning och energibrunnar	17
Isproblem i tunnlar och bergskärningar	19
Speciella schaktningsmetoder och ljudöverföring i berg	22
Brand i tunnel.....	25
Riskområden och skyddszoner	25
Entreprenadformer, upphandling och kvalitetskontroll	26
Besiktning- och lästips	27
Geologiska utmaningar	28

Inledning

Följande text baseras på underhållsbesiktningar av mer än 100 km tunnlar för trafik, energi, ledningar och vatten/avlopp samt cirka 25 bergrum för lagring av olja, kol, glass, sprit, för sophantering och parkering, avisning av tåg och som publika skyddsrum m.m. Vidare delges erfarenheter från geologiska förundersökningar, från tunneldrivning med olika metoder liksom från schaktning och besiktning av bergskärningar och nya husgrunder. Exempel ges också på bergmassans betydelse vid nyproduktion av undermarksanläggningar, för släntstabilitet och grundläggning. Texten omfattar såväl författarens egna erfarenheter som händelser och förhållanden som kan vara bra att känna till inför framtida arbeten i Stockholmstrakten.

Erfarenheterna omfattar främst objekt i Stockholms centrala delar och förorter förutom bland annat VA-tunnlar i Märsta-Stocksundet-Lidingö och Botkyrka-Himmerfjärden, tåg-tunnlar i Kallhäll-Kungsängen, bergrum i Södertälje, berghangarer i Tullinge och Finnbergstunneln i Nacka.

Allmänt

Stockholmstraktens berggrund med gnejser, graniter och blandbergarter av olika typer samt få breda svaghetszoner med omvandlat berg av sämre kvalitet, har med få undantag visat sig stabil och med tillräckliga bergspänningar för utförande av tunnlar, bergskärningar och grundläggningar.

Bergmassan är mestadels tämligen tät med begränsad mängd grundvatten i spricksystemen. Det innebär emellertid att även små läckage till berganläggningar har medfört grundvattensänkningar med omfattande sättningar i marklagren. Särskilt tydligt har det varit i små områden med stora lermäktigheter, t.ex. Mariatorget och Karlaplan m.fl., där omfattande skador på byggnader, ledningar, trottoarer m.m. har uppstått.

Alla typer av utföranden av undermarksanläggningar i tätort kräver omfattande tätningsarbeten med avseende på begränsade grundvattentillgångar. Undantag härifrån kan vara anläggningar, t.ex. i närheten av den vattenförande Stockholmsåsen, där tätningar behövs av andra orsaker, t.ex. för att minska pumpningskostnader.

Långtidsstabilitet

Anläggningar i berg har byggts i Stockholm sedan mitten på 1800-talet med en kraftig ökning från mitten av 1940-talet med T-banetunnlar, energi- och ledningstunnlar, bergrum för kol, olja m.m. och för publika skyddsrum. I stort sett har alla anläggningar utförts konventionellt med borrhning/sprängning. Gamla SJ-tunneln vid Slussen var första tunneln som utfördes med bormaskin och nitroglycerin på 1870-talet. Några tunnlar har utförts cirkulära med fullborrning som Saltsjö-tunneln på 1980-talet, från Huvudstabron till Kastellholmen cirka 7

km och på 1990-talet utjämningsmagasinet Ormen från Roslagstull till Karlavägen efter några stora bågar, totalt cirka 4 km. Runt 2000 utfördes trafikunneln Södra länken, omkring 2010 Norra länken och nyligen Citybanan, samtliga med konventionell borrhning/sprängning. Under utförande är Förbifart Stockholm från Kungens kurva till Häggvik.

En intressant studie av långtidsstabilitet gjordes 2006 i nedlagda berghangarer för flygflottiljen F18, Tullinge. Där finns en äldre del, troligen från 1950-talet, med tegelväggar, betonggolv och valvformade, kraftiga betongtak samt med två tunnlar till dagen. I mitten av utrymmet finns större, stöttande bergpelare. I anslutning till den äldre delen, men cirka 10 m djupare, finns sedan 1960-talet utsprängt en cirka 500 m lång centraltunnel med öppning till dagen och med sex sidorum plus ytterligare en cirka 200 m lång tunnel till dagen. Alla tunnlar är cirka 15 m breda och cirka 6 m höga. Tunnlarna blev inte färdigställda med annat än driftförstärkningar med enstaka bultar och i princip ett betongvalv över en svaghetszon, och har alltså nakna bergytter i tak och vägg och har i princip inte åtgärdats sedan 1960-talet, medan pumpning av läckvatten hela tiden har utförts. Utöver nämnda tunnlar sprängdes utrymme för stabspersonal, närförsvar m.m. Berggrunden i anläggningen utgörs av grå, lätt sliriga gnejser med inslag av amfibolit och sliror av glimmer. Vid besiktningen noterades att tunnlar hade god kontur och att enbart enstaka nedfall av block inträffat. Några större inläckage noterades.

Allmänt kan konstateras från besiktningar att tunnlar och bergrum i Stockholmsområdet efter utsprängning och förstärkning mestadels är långtidsstabila. I några fall har ventilation i inbyggda skyddsrum och/eller uppvärmda fjärrvärmestunnlar medfört uttorkning av berget med instabila ytblock som följd. Även T-bane- och tågtunnlar med kraftig ventilation av tågpassagerarna kan medföra uttorkning. I fuktiga VA-tunnlar är uppbommade ytblock mycket sällsynta. Instängt grundvatten bakom sprutbetong har enstaka gånger medfört nedfall.

Besiktningar har oftast utförts genom överknackning med skrotspett/hammare eller mera sällan okulärt med stickprovvis bomknackning. Mest tidskrävande är tunnlar utan sprutbetong som kräver överknackning av alla ytor, medan skador/fukt på sprutbetongytter just där ofta indikerar behov av speciell kontroll. Beroende på sprutbetongens utförande, kvalitet och vidhäftning kan i många fall okulär besiktning med stickprov vara tillräcklig i betongsprutade tunnlar. Förekommande bergarter ger erfarenhetsmässigt tillräcklig vidhäftning vid rätt utförd betongsprutning, undantag är svaghetszoner med omvandlat berg eller stora sprickytter belagda med glimmer, grafit eller harneskytter. Den typen av yttor i tunnelväggar eller som plana yttor i tak kan oftast skönjas bakom sprutbetong vid besiktning.

Geologisk kartering

Krav på geologisk kartering av berganläggningar har införts efterhand från 1960-talet, varför många tidigare anläggningar tyvärr inte är karterade. Få äldre energitunnlar och VA-tunnlar

är karterade medan ledningstunnlarna ofta har karterats. Fullborrade tunnlar som Saltsjötunneln och Ormen är karterade liksom Södra länken, Norra länken och Citybanan.

Fullborrade tunnlar och vadersågade schakt/bergskärningar med släta bergytor har visat sig svårare att kartera än ojämna, sprängda ytor. Kartering av berget bakom inbyggnader, i t.ex. skyddsrum, är mestadels svårt eller omöjligt p.g.a. utrymmesbrist.

Under tunneldrivning karteras berget helst så nära brytningsfronten som möjligt då berget där är rensolat och bra belysning finns. Speciellt viktigt är det att utföra kartering om dåliga bergförhållanden uppdagats som kräver driftförstärkning med döljande sprutbetong. I vissa fall kan långa avsnitt karteras om bra bergförhållanden förelegat och inga större driftförstärkningar med sprutbetong utförts. Är detta förfarande möjligt fås ofta en bättre geologisk kontinuitet, men det kräver att berget är rensolat på aktuell sträcka

Förundersökning och förprojektering

Förundersökningar ska utföras efter de geologiska förutsättningarna, men många gånger får beställarens ekonomi styra i för stor utsträckning. Konsultens ambitioner att åstadkomma en perfekt förundersökning kan också medföra stora kostnader. Mestadels blir det en balansgång mellan kostnader och ambitioner och vanligtvis uppstår inga geologiska eller andra överraskningar i Stockholmstrakten, men de förekommer.

Några exempel där geologiska förhållanden medfört negativa följder bör nämnas, t.ex. tågtunneln för dubbelspår söder om Kungsängen på linjen Kallhäll-Kungsängen, där förekomst av mycket blockig terräng försvårade borrhningar och omöjliggjorde seismiska undersökningar (fig. 1). Den anlitate konsulten föreslog en djupare tunnel, medan beställaren valde ett ytligare läge för att uppnå bättre spårgeometri. Bergytan visade sig vid entreprenaden vara mycket kuperad och del av den planerade bergtunneln fick i stället utföras som kostsam betongtunnel efter schaktning från markytan.



Figur 1. Tågtunnel för dubbelspår söder om Kungsängen. Blockig morän ovanpå kuperad bergyta.

I Södertälje utfördes stående, runda bergsilos för kol med höjd 70 m och 31 m diameter med avsmalnande övre delar, vilket är en bergtekniskt svårare konstruktion än raka väggar. Enligt uppgifter från närbelägna bergrum för oljelagring skulle berget vara bra. Vid bergschaktningen framkom kraftiga grafitinslag i de övre delarna, vilket medförde komplicerad bergschaktning och utökade förstärkningar med långa, förspända stag.

I kv. Hästen intill NK-huset i Stockholm utfördes i början på 1970-talet en upp till 24 m djup schaktning i delar av Stockholmsåsen. Jord- och bergförhållandena avvek kraftigt från förundersökningarna, vilket krävde speciella grundläggningsmetoder vilket i stort sett fördubblade de beräknade kostnaderna. Projektet behandlas vidare under Husgrunder nedan.

Förprojektering innefattar kontroll av befintliga anläggningar i berg. Då många anläggningar omfattas av sekretess av olika grader är det ofta svårt och mycket tidskrävande att få relevanta uppgifter. Misstag eller felaktiga antaganden kan få besvärliga och fördyrande följder. Några exempel tas upp nedan.

Samma beteckning kan på plankartor förekomma för byggnad respektive schakt d.v.s. en fyrkant med ett kryss. Vid drivningen av en tunnel mellan Bromma och Huvudsta utfördes sondering från fronten varvid ett tomrum upptäcktes. Borrningen hade nått fram till ett större schakt för slampumpar. Tunneln, som tursamt nog enbart skulle föra renat avloppsvatten, kunde backas en kort sträcka och fick göra en kurva runt schaktet. Det som vid projekteringen antagits vara en byggnad var alltså ett schakt.

I Beckomberga skulle en mindre avloppstunnel i berg utföras. Ritningarna visade täta jord/bergsonderingar med 3-5 m bergtäckning över tunneln på något hundratal meters sträcka. Ritningskontroll av längdprofilen visade olika längd-och höjdskala. Det som såg ut som tät borrning med högst 10 m borrhålsavstånd visade sig med samma skalor vara 25 m mellan hålen med avsevärd risk för svackor i berget däremellan. Kompletterande borrningar visade, trots allt, att tunneln kunde utföras som planerat.

Saltsjötunnelns korsning med en ledningstunnel på nivå cirka -50 m planerades med cirka 9 m berg mellan tunnlarna. Ledningstunneln från Sergels Torg/Brunkebergstorg ner till Norrström antogs ha jämn lutning. I verkligheten hade den i närheten av Sergels Torg utförts med en brant trappa och därefter med svag lutning mot Norrström. Detta medförde, i kombination med att Saltsjötunneln utförts cirka 1,5 för högt, att avståndet i berg mellan de bägge tunnlarna blev 3 m. Saltsjötunneln i bra berg förstärktes/tätades här invändigt, då den i drift skulle gå vattenfylld med atmosfärstryck.

I samband med Kungliga bibliotekets utvidgning på 1980-talet med två bergrum under befintlig byggnad, med bredvid liggande bokutrymme i betongbyggnad under mark, utfördes förundersökningar med jord/bergsondering från markytan. Beställaren satte ut borrhålen och borrningen påbörjades. I ett av borrhålen påträffades berget några meter ned men efter cirka 50 cm försvann borren, med full vattenspolning, ner i ett tomrum. Det var det underliggande boklagret som genomborrats efter 50 cm "hårt berg", som förstås var betongen i taket på boklagret.

Bergstabilitet

Som ovan nämnts är berget mestadels stabilt i Stockholmstrakten och tål stora vertikallaster. Problem kan uppträda när ogynnsamt lutande sprickplan medför nedsatt stabilitet i en bergvägg, ett berghörn eller ett tunneltak. Särskilt om sprickytorna är belagda med glimmer, grafit eller är harneskytor, samt om vattenföring förekommer i sprickorna.

Ett bra exempel på risk för instabilitet utgjorde en bergplint för Åhléns på söder nära Johanneshovsbron, där ett utrymme för ett större garage sprängdes ned intill och på nivå cirka 5 m under gamla Åhlénsbyggnaden, cirka 6 våningar, som med stålskelett grundlagts på stora stålplattor på berg. Vid inspektion, en fredag, av andra bergarbeten på tomten, upptäcktes en 45-gradig spricka från den nya schaktbotten och upp under ett utåtgående berghörn under byggnaden. Det återstod några mindre salvor som stod laddade intill hörnet.

Sprängningsarbetena avbröts under stora protester. Sent på kvällen hade en mycket kraftig I-balk mellan den nya bergbotten och berghörnet monterats och förankrats. Klartecken kunde efter denna åtgärd ges för sprängning och sprängarna kunde sedan ta helg med gott samvete.

Södra länken har många korsande tunnlar mellan ramper och huvudtunnlar med brokonstruktioner i betong. Typritningen för broar, godkänd av Vägverket, var en traditionell rambro i betong med stående betongväggar ned till underliggande tunnels golv. Entreprenören kom raskt på att broändarna kunde läggas på bergfundament i stället, för att spara pengar. Redan vid första bron var de geologiska förutsättningarna ogynnsamma och halva bergfundamentet rasade ut längs en spricka. På grund av det blev ett 30-tal betongarbetare, som skulle arbetat med bron, lediga i flera veckor. Broarna utfördes därefter på traditionellt sätt.

Bergspänningar och deformationsmätningar

I Stockholmstrakten har det vid anläggningsarbeten sällan noterats problem med bergspänningar. Den gynnsamma spänningsbilden styrks även av utförda spänningsmätningar. Situationer där spänningsbilden varit ogynnsam har förekommit och som exempel kan nämnas utsprängningen av T-banestation Fridhemsplan på Kungsholmen som utfördes på 1950-talet. Stationen består av två enkelspårstunnlar i berg med cirka 10 m bergtäckning. Vid schaktningarna noterades s.k. knäppberg, med knäppar och smällar som inträffade i flera omgångar, varvid berget luckrades upp efter utförd bergrensning. Berget förstärktes därför med armerade betongbågar i hela stationen. Berggrunden utgörs i området av gnejs med inslag av granit. Gnejsigheten är brantstående med strykning nära vinkelrätt mot stationen. På 1970-talet utfördes sedan en korsande tunnelbana, linje 3, med en ny, djupare del av stationen förlagd snett under men i plan helt utanför den tidigare. Vid sprängning av en förbindelsetunnel mellan stationerna upptäcktes att betongbågar i den äldre stationen blivit allvarligt skadade. Betongbågarna hade uppsprickning med upp till 1 cm breda sprickor och berg ovan bågarna hade fallit ned. Geologiskt förekom flacka sprickor med sprickplan klädda med klorit och ibland förekom lerfyllda sprickor mellan de övre delarna av den äldre stationen och förbindelsetunneln. Utredning visade att rekylkrafterna från sprängningarna av förbindelsetunneln hade orsakat rörelser i flacka bergskivor, vilka tryckts iväg och orsakat skadorna. Omfattande kontinuerliga mätningar utfördes av sprickorna i bågarna och av avståndet mellan långväggarna i den gamla stationen. Mätningarna visade pågående rörelser som så småningom stannade upp. Bergtaket och bergväggen i den äldre stationen och området i berget mot den nya stationen förstärktes med förspända bultar och linor. Injektering utfördes även av sprickor i bergtaket.

Nära Hälsingehöjden, Vasastaden, noterades i en ytlig ventilationstunnel till T-banan avskalningar av tunna bergskivor och även rena bergbrott bakom ett förstärkningsnät i taket (fig. 2). Berggrunden utgörs av relativt finkornig granit.



Figur 2. Ventilationstunnel vid Hälsingehöjden. Avskalningar av tunna bergskivor och även rena bergbrott bakom ett förstärkningsnät i taket.

Deformationsmätningar utförs för att kunna bedöma stabilitet i tunnlar och bergskärningar. I Älvsjö utfördes deformationsmätning, konvergensmätning, med specialmåttband och fasta mätpunkter i en ytlig, mindre va-tunnel under tiden den drevs igenom tre svackor vilka hade förstärkts med jetpelare. Endast några millimeters deformation uppmättes och busstrafiken ovanför kunde fortsätta. Tunneln förstärktes senare med betonglining på aktuella avsnitt.

Södra länken mot Hammarby Sjöstad har en stor mynning med 30 m spännvidd och en bredvidliggande mynning med 20 m spännvidd. Bergtäckningen är 5-8 m. Den mindre mynningen utfördes först med förförstärkningar runt blivande mynning med långa, slaka bultar, pilottunnel, begränsade sprängsalvor och mellanliggande förstärkningar med bultar och sprutbetong. Stabilitetskontroll utfördes i huvudsak genom att kontrollera eventuell uppsprickning i sprutbetongen. För den större mynningen utfördes bergmekaniska stabilitetsberäkningar. Två pilottunnlar hade innan uttaget av mynningen utförts till cirka 20 m in och med 10 m mellan tunnarna samt 3 m kvar till slutlig väggkontur. Förbultning runt den planerade mynningen utfördes med två rader med 6-8 m långa bultar med bricka mot en 2 m bred och 70 mm tjock bård av fiberarmerad sprutbetong. Ovanför mynningen hade vertikalt gjutits in rader med bultar till 0,5 m över slutlig hjässa. För kontroll monterades, innan schaktning av den stora mynningen, extensometrar ovanför den blivande hjässan och

reflektorer för konvergensmätning med totalstation vid mynningen. Innan schaktningsstart förinjekterades berget runt mynningen till cirka 20 m in. Schaktningen påbörjades med att pilottunnlarna vidgades till slutlig kontur till cirka 10 m in i 5-meters etapper med förstärkning av ytterväggarna. Härefter utfördes strossning av taken i pilottunnlarna på motsvarande sätt till slutlig kontur och förstärktes med 400 mm fiberarmerad sprutbetong och bultar. Mittpelaren sprängdes sedan bort, delad i längsled, i korta etapper med separat strossning av delen närmast slutkonturen. Förstärkning utfördes efterhand med 400 mm sprutbetong till 10 m in från mynningen varefter 200 mm utfördes inklusive bultning. Pelarnosen till anslutande 20 m bred tunnel förstärktes kraftigt innan slutligt uttag av bottenpallen i den stora tunneln. Deformationsmätningarna visade svårtolkade resultat, men har bedömts visa att berget i inslagsväggen totalt har sjunkit med 5-6 mm medan berget rört sig utåt med 15-17 mm. Berget ovan tunneln har spruckit upp i samband med schaktningsarbetena och fått efterinjekteras ett flertal gånger på grund av vattenläckage. Uppsprickning har observerats i ovanliggande hållar och i sprutbetongen i tunneltaket. Slutligt utförande för vattenisolering i tunneln blev att tak och väggar helt kläddes in med ett s.k. Örstavalv, ett valv av isolerande material in till pelarnosen cirka 20 m in (fig. 3).



Figur 3. Så kallat Örstavalv i Södra länkentunneln.

Käppalaverkets anläggning för vattenrening dubblerades 1994-1998 med anläggningen Käppala 2001. Här utfördes sju nya bergrum med tvärtunnlar m.m. med en volym av cirka

450 000 m³. Berget utgörs av sliriga gnejser med nära öst-västlig strykning med inslag av granit och amfibolit. Fem av rummen ligger parallellt med tidigare rum i anläggningen med ungefärlig orientering nordost-sydväst, medan två rum ligger utmed kortändarna på nya och gamla anläggningens rum. Berget i den tidigare anläggningen och den nya är mestadels utmärkt för bergbyggande, men i ett av de annorlunda orienterade rummen närmast Gåshagaleden noterades sämre berg i taket, vilket krävde driftförstärkningar och kraftigare permanenta förstärkningar. Snart efter idrifttagandet av anläggningen noterades instabiliteter i bergtaket. Kompletterande förstärkningar utfördes ovan filterbassängerna i drift och anordningar för kontroll av deformationer monterades. Nya deformationer har inte inträffat senare. Orsak till instabiliteterna kan bero på att anläggningsdelen ligger relativt ytligt i utkanten av en större bergplint med kanske för litet horisontaltryck i det sämre berget.

När Söderleden överdäckades på 1990-talet nedfördes stora laster från nytt betongdäck och nya byggnader. Konvergensmätningar utfördes i den underliggande gamla tågtunneln från 1870-talet som nu hade förstärkts med armerade sprutbetongbågar. Endast några millimeters sättningar registrerades.

Bergskärningar

Äldre bergskärningar är intressanta, t.ex. den från 1914 utmed Millesgården på Lidingö. Vid restaurering av Lidingöbanan 1986 utfördes bergrensning och bergbultning på vanligt sätt av skärningen. Högt upp i skärningen, ovanför spåret, fanns en raukliknande stenstod 5-6 m hög och 1-5 m i diameter. Dess stabilitet mättes regelbundet med skjutmått på ett givet ställe sedan man med livet som insats klättrat ned uppifrån. Ett gyllene tillfälle att ta bort en ständig och allvarlig risk för spårtrafiken uppkom vid restaureringen, som även omfattade byte av kontaktledning och spår. Rauken togs ned med ett jordbävningsbrak på spårområdet och fraktades bort. Vad som inte var känt var att spårområdet just här för länge sedan hade skredat ned i Lilla Värtan! Kännedom om skredet hade sannolikt inte hindrat nedtagningen av rauken men hade förstås fått utföras i mindre etapper.

Bergskärningarna längs Söder Mälarstrand och Stadsgården har schaktats fram under lång tid, arbetet gick ofta i arv från far till son. Mycket är utfört på 1800-talet med handhållen borrar med en man som höll i borren och 2-3 man som slog med slägga på borren. Trots att delar av skärningarna ligger utmed och nära Stockholms största förkastning med kraftigt omvandlat berg är skärningarna med sprickrikt berg förvånansvärt stabila, delvis tack vare det skonsamma bergtuttet, fast de är kanske brytvärda på järn eftersom det sitter mängder med bultar i berget!

I Årstadal, Liljeholmen utfördes på 1960-talet 3 större bergrum för lagring av paketerad glass och matvaror. Tillträde till rummen skedde genom raka, cirka 30 m långa tunnlar vinkelrät mot gavlarna. I början på 1970-talet sprängdes berget runt tunnarna bort i två pallar fram till cirka 8 m ifrån rumsgavlarna. Den nya bergskärningen med cirka 15 m höjd fick samma

utsträckning som strykningsriktningen, i princip öst-väst, i den vertikalstående gnejsen, vilket medförde stora, instabila skivor i skärningen. Bergschaktningen hade följt tidplanen men inga förstärkningar hade utförts! All borrarning för bultförstärkning från cirka 5 m och upp fick utföras från sky-lift på grund av att bultbollar med större bormaskin inte hade utförts från den övre pallen. Bergets temperatur i bergrummet för glass var minus 26 grader och temperaturen hade på cirka 10 år spritt sig i berget så att nollisotermen stod cirka 6 m ifrån rummet. Detta innebar att temperaturen i delar av ytan i den nya bergskärningen var nära noll grader men hade frysgrader längre in. Bergbultning av block/skivor i detta område i skärningen utfördes genom att bulthålen fylldes med varmt bultbruk varefter ström kopplades till införda förstärkningsbultar av stål för värmning under bultbrukets härdning.

På Värmdöleden inträffade på 1970-talet ett ras med bergblock ut på vägbanan. Orsak till raset bedömdes vara vatten i bergsprickorna i skärningen i kombination med frysning. För dränering av vattnet i berget bakom skärningen sprängdes en nisch in i skärningen från marknivå, varefter borrades långhål från nischen och uppåt till några meter under bergöverytan. När kontakt med vattenförande sprickor erhöles isolerades nischen för att minimera risken för frysning.

Bergskärningar för vägar och väggar i husgrunder har i en del fall blivit instabila genom felaktig borrarning/sprängning som medfört stora underhållskostnader och onödiga säkerhetsrisker. Ibland har i handlingarna angivits tät borrarning i konturen och kanske av hjälparraden medan avståndet till nästa hålråd kan vara flera meter. Ofta har det skrivits in av kostnadsskäl eller okunnighet. Vid sprängning medför detta att den kostsamma, tätborrade konturen tappar sin avsedda verkan och kvarstående berg spräcks upp och blir instabilt, vilket medför extra förstärkningar och ökat framtida underhåll. Upphandlingen kan också ha varit enbart ett pris per kubikmeter som givetvis innebär så hård sprängning som möjligt med hänsyn till omgivningen och medför därmed onödig uppsprickning av kvarstående berg. Handlingarna bör upprättas av erfaren berg- och sprängningskonsult och platskontrollen utföras av bergsakkunnig.

Husgrunder

Byggnader i centrala Stockholm har sedan slutet av 1940-talet ofta utförts med en eller flera källare ner till eller under den naturliga bergytan. För att inte riskera vatteninläckage i grunden eller sättningar i omgivningen injekteras och tätas bergbotten innan, under eller efter utsprängning. Täta ytterväggar av betong gjuts från bergbotten och upp till över grundvattennivå. Beroende på bergets kvalitet förekommer mycket stor variation i behovet av tätning liksom att ökat grundvattentryck mot djupet har stor betydelse. Jämför t.ex varuhuset Åhléns, kv. Gripen på Klarabergsgatan med grundläggningsnivå cirka -5 och det närbelägna, tidigare PUB's varuhus, kv. Skotten med sprängd bergbottennivå -19.

På 1970-talet utfördes den hittills kanske mest spännande grundläggningen i Stockholm, med slitsmurar i kv. Hästen intill NK-huset. Djupet till berg varierar mellan 12 och 24 m

under gatunivån och grundvattennivån ligger 3-4 m under samma nivå. Metoden med slitsmurar var ny för Sverige och innebar mycket enkelt uttryckt att en smal slits schaktades upp i jordlagren ned till bergytan. Bergytan mejslades sedan horisontellt. Slitsen hölls hela tiden öppen med en tixotrop vätska av tung bentonit så att en armeringskorg kunde sänkas ned till den mejslade ytan. Härfter ifylldes betong med start från botten. Slitsmuren utfördes etappvis i 4,5 m-7,5 m breda paneler med längder på upp till cirka 24 m. Paneler, 59 stycken, med en sammanlagd yta av 5 500 m² utfördes med 80 cm tjocklek. Enligt handlingarna bestod jordlagren av fyllning samt distala avlagringar från Stockholmsåsen med uppifrån räknat lera, moig sand och sandigt grus mot bergytan, enstaka block kunde förekomma. Berggrunden beskrevs som granit, gnejs och pegmatit av tämligen god kvalitet. Diagonalt över tomten förmodades berggrunden bilda en svacka där berget skulle vara av lägre kvalitet.

Redan från start visade det sig att jordschaktningen cirka 3 m över antagen bergyta stötte på hårdare material än de lager som antagits ned till bergytan. Med hjälp av mejselmaskiner kunde förhållandena bemästras. När cirka hälften av de 59 panelerna utförts påbörjades kontaktingektering mellan underkant mur och berg varvid stora mängder injekteringsbruk gick åt på några platser utan att det blev tätt. Resultaten från injekteringarna tolkades först som att muren inte stod på berg utan på packade block. Efter ytterligare undersökningar antogs att det fanns ett tjockt lager med omvandlat berg på det fasta berget. När den stora tomten var omgärdad av slitsmurar påbörjades jordschaktningen men avbröts då allt större mängder vatten kom in i schakten. Eftersom man misstänkte var läckagen fanns togs beslut att avbryta jordschaktning och pumpning och frysa jorden utanför de misstänkta avsnitten för att stoppa läckagen. Pumpningen avbröts för att inte få strömmande vatten vid frysningen. Det innebar att det under några månader var en insjö på hela tomten. Efter frysningen utfördes kompletterande injekteringar, varefter schaktning av jordmassorna på hela tomten ner till berg utfördes samtidigt med bakåtförankrad stagsättning av slitsväggarna med 650 temporära stag. Cirka ¼ år efter kalabaliken med de mot berg otäta slitsmurarna konstaterades efter friläggning av bergytan att alla panelerna stod på eller i berg men att berget ställvis var kraftigt omvandlat. Ingen morän återfanns på tomten. Kompletterande murar gjöts på insidan av de befintliga, injekterades och dimensionerades för uppträckning mm.

Efter avslutade arbete i kv Hästen noterades att jordlagren närmast berg huvudsakligen utgörs av en grusig, stenblockig jord med upp till tio meters mäktighet. Blockmängden varierar mellan 2 till 15 block per m³. Avsättningen utgörs enligt SGU, som bl.a. karterade jord-och bergförhållandena, troligen av en proximal del av Stockholmsåsen i form av en sidogren till huvudisälven. Stora partier av tomten täcks av s.k. rösberg, omvandlat berg, med upp till cirka sju meters tjocklek.

Stockholmsåsen står i förbindelse med Saltsjön så mycket stora vattenmängder fanns tillgängliga i kv Hästen. Inläckaget till tomten mättes med piezometrar under 1971 när större

delen av ridåinjekteringen och mindre del av kontaktinjektering utförts. Inläckaget till den 6000 m² stora tomten uppmättes efter 2 månaders provpumpning och fortvarighetstillstånd till cirka 150 l/min, varvid vattenytan var sänkt till nivå - 10 m. Efter ytterligare injekteringar mättes läckaget till cirka 70 l/min efter att bergbotten injekterats och utan att grundvattensänkningar inträffat på utsidan av tomten. Efter ökade läckage beslutades 1974/75 om kompletterande injekteringar främst vid panelernas kontakt med berget. Uppmätt läckage uppmättes herefter till cirka 40 l/min, vilket är cirka 10 l/min mindre än det som då eftersträvades för konstruktioner med täta bergbottnar, vilket var 0,008 l/min x m².

Några ytterligare praktiska erfarenheter från husgrundläggning på berg kan nämnas som horisontella sprickors betydelse. Vid bergschaktningsarbeten bl.a. på Lidingö har entreprenören borrar upp hela tomten innan sprängning. Det har då inträffat, kanske redan vid första salvan, att berget rört sig något i sidled ovan en flack spricka så att även de vertikala salvhålen förskjutits och omöjliggjort laddning och allt har fått borraras om.

Ett annat exempel finns från bergschaktning nära och ovanför en tunnelbanehall vid Hornstull. Där avsågs schaktningen utförd med expanderande cement s.k. snigeldynamit, för att inte ge vibrationer. Området borrhades upp med vertikala hål som fylldes med flytande expansionscement. Hela området plus ett nyrenoverat grannhus lyftes efterhand då cementen hade runnit ut i flacka sprickor och expanderat.

Kvarsittande förstärkningsbultar i schaktväggarna från granntomten, när den sprängdes ner, kan orsaka både vibrations- och schaktningsproblem vid senare bergschaktning i den egna tomten. Bultning får utföras temporärt i schaktväggarna men ska tas bort när den egna byggnaden uppförts. Temporärt bultade avsnitt kan behöva stöttas permanent med det egna huset eller på annat sätt. Kvarsittande bultar i grannfastighet kan medföra oväntade extrakostnader för den egna entreprenaden.

Bergras

Bergras i skärningar och tunnlar har inträffat i mycket liten omfattning tack vare mestadels goda bergförhållanden men flera exempel finns tyvärr på motsatsen.

Ett av de mest omtalade rasen inträffade i november 1965 vid drivning av en ledningstunnel vinkelrät och under Södra Hammarbyhamnen nära Skanstull. Vid raset blev två arbetare instängda, men lyckades rädda sig upp till en luftficka vid tunnelfronten vid Ringvägen. Stort TV-pådrag, större bormaskin från Tyskland och borrhning ned till arbetarna i tunneln som fick telefonkontakt och mat uppifrån. De räddades senare genom att tunneln kunde grävas ur nedifrån från ett till tunneln hörande schakt på Södermalm. Först antogs att jordmassor och vatten från Södra Hammarbyhamnen trängte in i tunneln, men det visade sig att raset inträffat i tunnelns andra brytfront på andra sidan Södra Hammarbyhamnen vid Mårtensdal. Där bildades från ytan en mäktig krater där stora transformatorer och mindre byggnader låg huller om buller (fig. 4). Tunneln hade kvällen innan raset nära nog gått ut ur berget och in i

jordlager på nivå cirka – 22 m. Efter omfattande urgrävning mot rasplatsen från schaktet på Södermalm utfördes en tät betongplugg i rastunneln cirka 160 m ifrån rasplatsen, och en ny tunnel utfördes efter en brant backe ner till en cirka 10 m lägre nivå, förbi och bredvid rasplatsen.



Figur 4. Raset som inträffade 1965 vid Mårtensdal, Södra Hammarbyhamnen.

Från Södra Hammarbyhamnen och söderut hade jord/bergsonderingar utförts fram till södra Hammarbyvägen. Sedan hade cirka 400 m antagits ha tillräcklig bergtäckning och det var efter cirka 250 m av den sträckan som raset inträffade i en djup svacka i berget. Svackan är öst-västligt orienterad och bedöms ha påträffats vid grundläggning av Johanneshovsbrons södra del, där berget påträffades 15-20 m under vattenytan och pålar nedborrades 5-6 m ned i berg av sämre kvalitet innan tillräcklig bärighet erhöles.

I Masmo inträffade ett ras i en befintlig, mindre VA-tunnel på grund av sämre bergförhållanden.

Ras inträffade 1959 i en ledningstunnel under Hammarbyleden mitt emot Danviksklippan, varvid en mindre krater uppstod på ledens norra sida och tunneln fylldes enligt uppgift med glaciallera.

Mindre ras har inträffat några gånger i tunnlar på grund av att vatten samlats och stängts in med ökande tryck bakom sprutbetong i tak. Mestadels har enbart sprutbetongen släppt.

I Kungens kurva, intill nuvarande Heron city, inträffade ett större ras vid schaktning av en bergskärning inför byggandet av Heron city. Raset inträffade utefter ett lutande sprickplan från bergytan och ned i det utsprängda området.

I Årstadal nära Liljeholmen inträffade 1972 ett ras efter bergschaktning fram till befintliga berggrum (fig. 5). Vid raset släppte en cirka 2 m tjock och 6 m bred vertikal skiva från bergytan och ner till tunnelmynningen, som blockerades helt. Innan raset körde distributionsbilar frekvent genom mynningen. Orsaken till raset var dels att bergskivan satt mot en vertikal spricka belagd med grafit och dels att horisontaltrycket i berget hade tagits bort genom bergschaktningen.



Figur 5. Raset vid Glace Bolaget AB i Årstadal 1972.

I ett lagringsrum i Fittja för uppvärmd olja på cirka 30 000 m³ inträffade 1972 ett ras i och intill vertikalschaktet ner till rummet, varvid berg lossnade från nedre schaktkanten och klämde ihop in- och utpumpningsledningarna. Efter förstärkning av schaktet från

hängställning och urpumpning av all uppvärmd olja kunde bergtaket synas från flotte på det då vattenfyllda rummet. Det noterades att merparten av bergbultningen utförts i för stora hål, som då tillgängliga perfobultar med bultbruk inte kunde fylla ut, varför förstärkningseffekten var låg. Många block hängde i bultarna eller satt lösa i bergtaket. I området där det större bergraset inträffat, den stabilitetskänsliga delen där schaktet kommer in i rummet, hade mycket få bultar monterats. Det beslutades att ändra uppvärmningstekniken från bäddvattenuppvärmning till förvärmad olja, eftersom hela bergtaket annars hade behövt förstärkas och mitt i oljekrisen väntades dessutom en båt med olja. I en bergrensad och nyförstärkt 6 m bred remsa längs takmitt hängdes en inpumpningsledning upp i långa, förspända stag och två vertikala ledningar leddes till rumsbotten och förankrades.

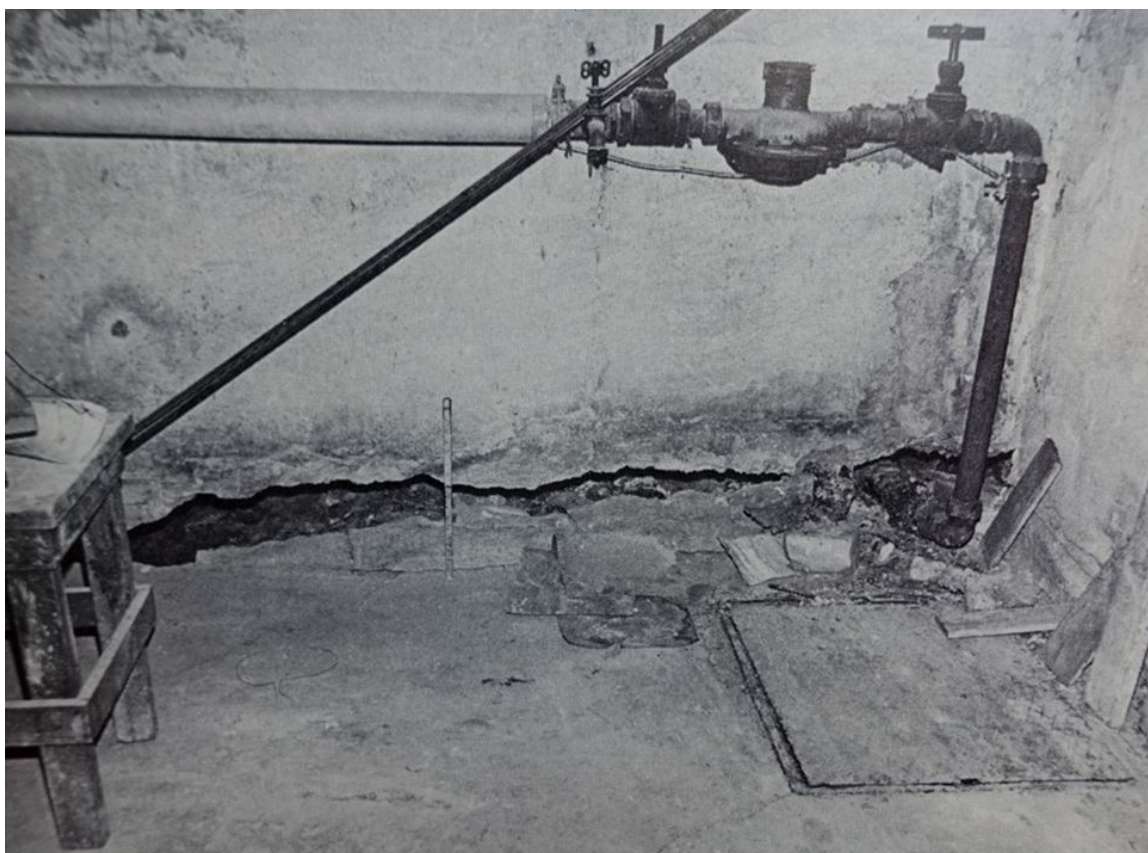
Grundvatten, tunneltätning och energibrunnar

I Stockholm finns små isolerade, mindre lerområden med instängt grundvatten i friktionslager närmast berget. Exempel är Karlaplan, Mariatorget, Lindhagensplan m.fl.

Vid samtidig drivning av tunnlar med olika ägare vid Karlaplan inträffade 6 m grundvattensänkning på cirka 1 veckas tid. Vattnet slutade läcka in i tunnlarerna men sättningar började snabbt komma. Trottoarerna stod på högkant och pannor hängde i sina ledningar i källarna m.m. Tunnlarerna tätades och konstgjord infiltration startades. Men det blev långvariga rättsliga förhandlingar och många återställningsarbeten (fig. 6 och 7, från Byggnadsgeologi, Staden och grundvattnet).



Figur 6. Karlaplansområdet 1964. Sättningar i gatumark intill träpålad byggnad.



Figur 7. Karlaplansområdet 1964. Raserat källarutrymme på grund av sättningar.

Vid Mariatorget drogs en spårtunnel i berg som med sitt inläckage sänkte grundvattnet så att pålspetsarna till pålade byggnader kom över vattenytan och pålarna ruttnade efterhand. Reparationer av sättningar utfördes men någon fastighet fick rivas.

Vid tunneldrivning i tätort stipuleras utförande av mätdammar i tunneln i samband med drivningen för att se om tätningsinsatserna är tillräckliga eller behöver ökas för att klara bedömt inläckningskrav. Kravet kan även vara felbedömt så att grundvattnet i omgivningen sjunker trots uppfyllda kravkriterier. Det kan innebära behov av temporär infiltration, ofta från tunneln, tills tätningar kunnat utföras eller om det inte lyckas kan infiltrationen behöva permanentas. Både utförandet av mätdammar i rätt tid och att utföra tillräcklig injektering kan vara svårt att få igenom i en entreprenad av tidsmässiga och ekonomiska skäl, och ska i handlingarna beläggas med höga viten om de inte utförs.

Energibrunnar utförs allt oftare och numera inte bara för villor utan även för större bostadshus. Enligt lag ska brunnarna registreras hos SGU men det sker inte alltid. Brunnarna ska utföras inom den egna tomten och kan vara flera hundra meter djupa. De är alltid beroende av grundvattnet, så en grundvattensänkning vid utförandet av en tunnel kan bli mycket kostsam. Eftersom det är svårt att få tunnlar tillräckligt täta bör områden med energibrunnar om möjligt undvikas.

Isproblem i tunnlar och bergskärningar

Problem med is uppträder överallt där vatten tränger ut ur berget i vinterkyla (fig. 8). En gammal missuppfattning är att isbildningen upphör när isen tätat till läckaget, vilket den inte gör. Beroende på isbildningens lokalisering innebär den större eller mindre risker och arbetsinsatser. Speciellt känsliga är tåg- och vägtunnlar eller skärningar intill trafikleder. Många försök har utförts för att minska isbildningen varav ett förstås är att täta läckaget med injektering. Ofta lyckas inte detta helt och då kvarstår mindre läckage som med tiden kan ge stora isbildningar. Lyckas tätningen blir resultatet ofta att vattnet söker sig nya vägar med nya isbildningar till följd. I Stockholm har varmluftgardiner provats vid kortare tunnel genom en bergknalle, men trafiken för med sig för stora mängder kallluft för att det ska fungera. Även eluppvärmda dräner har provats liksom spolbara dräner. På några ställen där det varit möjligt har portar monterats, och får luften stå stilla bakom portarna kommer bergets värme att reducera eller eliminera isbildning.

Under 1960-1990-talet utfördes dräner ofta med en tunn, smal mineralullsremsa täckt av sprutbetong. Mestadels fungerade konstruktionen dåligt, frös sönder och blev ibland en nedfallsrisk i sig. Numera sätts minst 1 m breda, vertikala sjok av extruderad polyeten, typ liggunderlag upp, där vattnet kan rinna bakom ner till grunden. Tjocklek på dränen bestäms av ortens köldmängd och i trafiktunnlar måste sugkrafterna från trafiken beaktas. I vissa tunnlar tas luft in för kylning och de är extra känsliga för isbildning och kan nästan helt sättas igen av is.



Figur 8. Kraftig isbildning i tunnel.

I Finnbergtunneln förekom kraftig isbildning speciellt vid den övre tunnelportalen (fig 9). För att åtgärda isproblemen monterades böjliga skivor av extruderad polyeten i tak och väggar vid mynningen och en bit in i tunneln (fig. 10).



Figur 9. Isbildning i Finnbergstunneln innan åtgärd.



Figur 10. Skivor av extruderad polyeten i tak och väggar vid mynningen och en bit in i Finnbergstunneln.

Speciella schaktningsmetoder och ljudöverföring i berg

I olika sammanhang provas nya metoder för bergschaktning. Exempel i stor skala i Stockholm har varit fullborrning, utförda med samma maskin, av Saltsjötunneln och Ormen i slutet 1980-talet och början av 1990-talet.

I fallet med Ormen hade maskinen modifierats så att förinjektering av berget även kunde utföras av tunnelbotten. Både Saltsjötunneln (fig. 11) och Ormen har en diameter på 3,5 m och en längd av 7 km respektive 4 km. Tunnlarna har borrats under Stockholm på nivåer mellan cirka -20 och -50 m. Saltsjötunneln går fylld med vatten av atmosfärstryck, medan Ormen är ett utjämningsmagasin för regnvatten och står alltså ganska tom långa tider. Fullborrning provades med några kortare tunnlar på 1970-talet i Stockholm, men då med för svaga maskiner för det hårda berget. I Saltsjötunneln passerades inga större svaghetszoner, medan Ormen passerade zoner i Humlegården, alltså en del av förkastningen under Birger Jarlsgatan. Förstärkningsbehoven i tunnlarna var extremt små och förinjekteringen inte särskilt omfattande. Ett problem med Saltsjötunneln var att styra maskinen, vilket gjorde att tunneln kom 25-30 m fel i sidled och ibland 1-2 m fel i höjd. Ljudnivån var låg jämfört med

sprängning, men innebar ändå att maskinen stannades några minuter innan föreställningen på Operan när maskinen var 45 m under.



Figur 11. Saltsjötunneln.

Tidigare användes ibland slitsborrning längs ytterkonturen av schakt för husgrundläggning för att minska vibrationer mot grannfastigheten. Det krävde att slitsen gjordes helt öppen för att minska vibrationerna men ofta fanns det vatten eller sten i slitsen som gjorde det besvärliga och dyra borrarbetet mer eller mindre bortkastat. Metoden torde helt ha kommit ur bruk. På senare tid används vadersågning allt mer och med goda resultat (fig. 12). Metoden används för alla möjliga applikationer som schakt, väggar m.m.



Figur 12. Vajersågning används allt oftare för att förhindra att vibrationer fortplantas och påverkar befintliga byggnationer negativt.

Raiseborrning för ventilationsschakt m.m. används tämligen frekvent. Metoden bygger på att ett borrhål görs ned till ett underliggande bergutrymme, där en större rullborrkrona sätts på borrhålen, varefter hela paketet dras uppåt och berget krossas och faller nedåt (fig. 13). Att tänka på vid raiseborrning är tätning av berget innan borringen och att dåligt berg kan medföra bekymmer för efterförstärkningar.



Figur 13. Raiseborrat ventilationsschakt.

Brand i tunnel

Brand i tunnlar inträffar lyckligtvis sällan, men har tyvärr inträffat vid några tillfällen.

En energitunnel i drift i Akalla brandhärjades. Orsaken kan ha varit kortslutning i elektriska kablar. Branden medförde att på ett mindre avsnitt vid brandplatsen flagnade delar av det betongsprutade taket tillsammans med underliggande tunnare bergskivor. Bergrensning utfördes av skivorna liksom delar av sprutbetong som släppt varefter ny oarmerad sprutbetong påfördes.

Brand uppstod i ett mindre skyddsrum i Ulvsunda med oförstärkt tak och även här uppstod avflagningar på samma sätt som när man eldar på en berghäll.

Riskområden och skyddszoner

Berganläggningar i Stockholmsområdet har riskområde 50-100 m och skyddszon 2-10 m närmast tunneln beroende på typ av anläggning m.m. Avsikten med riskområdena och skyddszonerna är att anläggning inte i onödan ska utsättas för menlig påverkan vid närliggande jord-bergschaktning, pålning, energiborrning eller liknande. Kontakt ska tas med respektive tunnelägare i planeringsstadiet för nya objekt.

Entreprenadformer, upphandling och kvalitetskontroll

Flera typer av entreprenadformer förekommer. Alla har sina för- eller nackdelar. Några erfarenheter är att beställaren oberoende av entreprenadform måste se till att ha full kontroll under hela entreprenaden på utförandet och insyn i alla moment, att alla tänkbara moment är upptagna och prissatta i upphandlingen, att vitesbeloppen är tillräckligt stora för att inte användas av entreprenören t.ex. vid tidsförseningar, att garantiåtagandena är realistiska och att relationsdokument alltid upprättas. Ett moment som ofta mer eller mindre förbises är vinterförhållanden och de kostnader dessa kan medföra. Ovanstående låter enkelt men då det alltid är ekonomin som styr, trots alla kvalitetsdokument, är det en grannlaga uppgift för beställaren att hela tiden ha full kontroll.

Exempel på övertolkning av bestämmelser förekommer. När VA-tunneln Botkyrka-Himmerfjärden byggdes i början på 1970-talet krävde beställaren att berget skulle berggränsas till s.k. klingfast berg även där svaghetszoner med dåligt berg förekom. Resultatet blev att tunneln vid zonerna fick meterdjupa sido-och takfickor som sedan förstärktes med tjock, armerad sprutbetong. Även bomma men inkilade bergskivor i tunnelväggarna nära botten, som senare skulle gjutas över med en betongvagg, beordrades bortrensade. Förutom en rättslig process avseende kraftiga fördyringar, som entreprenören förlorade, torde stabiliteten i tunneln ha försämrats liksom vattnets strömning i betongvaggan.

Betydelsen av rätt utförande framgår av en entreprenad för upphängning av tunga rör i ok som monterades i tunneltaket med bultar i berget. Entreprenören hävdade att provdragning av bultarna var onödigt, de satt ju fast. Provdragning beordrades med tanke på vad som skulle hända om rören under drift föll ned. Ett flertal bultar klarade inte provdragningen och fick göras om – de godkändes sedan efter förnyad provdragning (fig. 14).



Figur 14. I tunneltaket upphängda tunga rör. Provdragning var nödvändig för att säkerställa hållfastheten.

Besiktnings- och lästips

Besiktning av speciellt tunnlar/bergrum bör av säkerhetsskäl om möjligt utföras av flera personer samtidigt. Varje tunnelägare kan ha sina säkerhetsföreskrifter, vilket ska kontrolleras och följas. I tunnlar som T-banan i drift är det ett krav med extra säkerhetsvakter. VA-tunnlar bör vara luftade och besiktningspersonal ska medföra syrgastuber och mask och ha midjehöga, täta byxor. Kontakt med personal på markytan bör finnas eftersom bedömd tid för besiktning ska ha överenskommit. Syrehalten kan vara låg i VA-tunnlar. Medförd belysning ska i alla sammanhang bestå av minst två oberoende belysningssystem. I samband med pågående entreprenad ska kontakt tas med arbetsledningen innan tillträde.

För bättre kännedom om hur Stockholms tunnelbana har konstruerats och utförts rekommenderas läsning av skrifter om Stockholms tunnelbana, t.ex. Teknisk beskrivning av Stockholms tunnelbana, Kungl. Boktryckeriet P. A. Norstedts Stockholm 1957, Stockholms tunnelbanor 1964, En teknisk beskrivning, SVR:s Förlags AB Stockholm, Kristianstads Länsstryckeri Kristianstad 1964, samt The Stockholm Underground '75, A technical description, utgiven av Stockholms läns landsting, augusti 1976.

Geologiska utmaningar

Som framgått ovan har stora områden med mestadels berg av bra kvalitet med smärre svaghetszoner genomtvärats med tunnlar i Stockholmsområdet. Den stora öst-västliga svaghetszonen utmed Stadsgården och Söder Mälarstrand har emellertid ännu inte passerats med en bergtunnel, men borrhningar har utförts för utbyggd tunnelbana Kungsträdgården-Nacka, för Östlig förbindelse ungefär mellan Kvarnholmen och Djurgården, för en energitunnel och för eventuell framtida tunnelbana parallellt med Västerbron. En liknande eller kanske samma zon har undersökts mellan Smedslätten, Brommalandet och Hägersten. Undersökningsresultaten visar på djup till berget på 40-90 m, och berg av dålig kvalitet i en omfattning som tidigare inte påträffats i infrastrukturprojekt i Stockholmsområdet.

BILAGA 2. ERFARENHETER AV BYGGNADSGEOLOGISKA ARBETEN I STOCKHOLMSOMRÅDET

I denna bilaga redogörs för erfarenheter från infrastrukturprojekt i Stockholmsområdet. För vidare läsning om ingenjörsgéologi relaterad till Stockholm, se till exempel Morfeldt & Persson (1997) och Persson (1998).

Erfarenheter av byggnadsgeologiska arbeten i Stockholmsområdet

Lars M Hansen



Jämförelse mellan sågad och sprängd bergmassa. Foto: Jörgen Theander, Golder.Ass.

Innehåll

Inledning.....	3
Bankningssprickor	3
Ytligt uppsprucken berggrund	4
Hänsyn till befintliga underjordsanläggningar	5
Planutglidning, kilutglidning, tippning.....	5
Planutglidning.....	5
Kilutglidning.....	5
Tippning.....	6
Sprickzoner och lineament.....	11
Höga bergväggar intill befintliga byggnader och andra anläggningar.....	13
Bergmassans hållfasthet för grundläggning.	15
Förkastning i Söderström	15
Bedömning av sprickighet i en bergmassa utifrån borrhärdar.....	18
Bergspänningar.....	19
Mätningar av bergspänningar	19
Bergspänningar vid Arlandabanan	22
Lösa jordmassor på berg	23
Ras av lösa block från höga bergslänter	23
Djup till berg.	24
Tätskärm.....	25
Förslag till löpande uppdatering av byggnadsgeologiskt underlag	27
Referenser	28

Inledning

Geologiska förhållanden i allmänhet och i synnerhet geologiska spröda strukturer, så som förkastningar och sprickor, men också foliationsplan, där t.ex. glimmer har leromvandlats helt eller delvis kan påverka stabiliteten i berganläggningar, och medföra omfattande förstärkningsarbeten till höga kostnader. Bristande kunskap om sådana förhållanden och deras orientering och läge i förhållande till en projekterad anläggning vill som regel medföra att dessa kostnader ökar. Tidigare erfarenheter av geologiska strukturers inverkan på bergstabilitet kan användas för att i tid förebygga större skred, ras och andra oönskade händelser.

Följande är en sammanställning av erfarenheter, dels författarens egna, dels från nuvarande och tidigare anställda på konsultföretaget Golder Associates AB. Projekten omfattar huvudsakligen öppna bergskärningar med en slänthöjd på upp till ca 10 meter. De flesta projekten ligger inom eller nära Stockholms Stad med tåg tunneln vid Arlanda flygplats som undantag.

Bankningssprickor

Sprickor, vars orientering följer bergöverytan, och som i första hand antas ha bildats genom tryckavlastning under den senaste isavsmältningen, kan vanligen ses i öppna bergskärningar som i de flesta exemplen är mindre än ca 10 m djupa.

I områden norr om Stockholm, t.ex. Täby och Ulvsunda, finns bankningssprickor, som är fyllda med någon cm sand eller lera. I samband med sprängning i Täby uppstod skador i Vallentunagranit, då spränggaser trängde in i en plan bankningsspricka belägen ovan grundvattenytan, varvid en metertjock skiva av ytberget lyftes upp. Därvid blev berget helt söndersprängt (Figur 1), vilket medförde att flera spränghål fick borraras om.

Bankningssprickor med en betydligt mer oregelbunden form (Figur 2) påträffades också i sedimentgnejs i Ulvsunda, men är där fyllda med enbart lera, och även i en gnejs vid Liljeholmen finns flacka sprickor med en oregelbunden form då delar av dem följer den brantstående gnejsfoliationen (Figur 3). Däremot finns det i en sedimentgnejs vid Smista Allé uthålliga bankningssprickor, som tvärsar den mest dominerande foliationen utan att påverkas nämnvärt av denna (Figur 6).



Figur 1. Täby. Vänster: borrning av konturhål intill spont. Höger: upptill syns ytberg skadat av spränggaser från en salva 4 m bort. Foto: Lars M Hansen, Golder.



Figur 2. Ulvsunda. Sedimentgnejs med oregelbundna bankningssprickor ca 10 m under bergytan, fyllda med några cm finmaterial. Foto: Lars Bergkvist, Golder.

Ytligt uppsprucken berggrund

Ytligt uppsprucken berggrund förekommer här och var i Stockholmsområdet, ofta under ett flera meter tjockt jordtäck, vilket är fallet i t.ex. bangårdsområdet vid Stockholms Central. Sprucket ytberg av denna typ påträffas sällan i områden med berg i dagen eller med tunt jordtäck där inlandsisen eroderat bort det löst sittande bergmaterialet. Vid berguttag behöver det tas ställning till åtgärder som skrotning och förankring samt tätning. Vid tätning av ytberg i spontgrop måste manschetten placeras i ovanliggande jord, som först injekteras, vilket ställer krav på anpassat manschettryck för att undvika att jordtätningen spricker. Tätningsmetoder för lera, friktionsjord och berg beskrivs utförligt i kapitel 11.3.



Figur 3. Liljeholmen. Wiresågad bergskärning med oregelbundna bankningssprickor och en brantstående gnejsighet/foliation. Skärningen ligger ovanför en befintlig tunnel, och både horisontell och vertikal bergskärning har wiresågats för att undvika att överskrida tillåtna vibrationsvärden i en hisstunnel. Foto: Anja Olsson, Golder.

Hänsyn till befintliga underjordsanläggningar

Från Liljeholmens T-banestation går en bergbana i en tunnel. Ovanför tunneln pågår bygge av både en ny väg och hus. För att riktvärden för vibrationer inte skulle överskridas och för att undvika skador på el utrustning i den befintliga hisstunneln, sågades vägskarningen i stället (Figur 3). Bergarten, som är en glimmergnejs, är benägen att spricka längs den brantstående foliationen i de glimmerrika partierna .

Planutglidning, kilutglidning, tippning

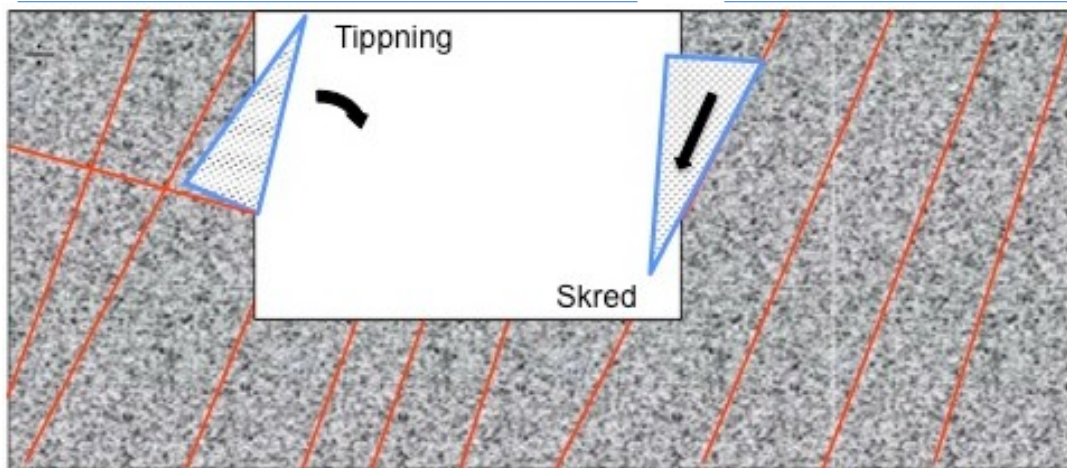
Plana strukturer, särskilt förkastningsytor, skiffrighet samt ytor med glimmer eller lermineral, men även foliation i allmänhet och tektoniska sprickor, kan orsaka omfattande bergskred med mycket allvarliga följder, om dess läge och orientering är ogynnsamma i förhållande till en bergskärning, och om sprickytans råhet och mineralbeläggning/fyllning medför minskad friktion.

Planutglidning

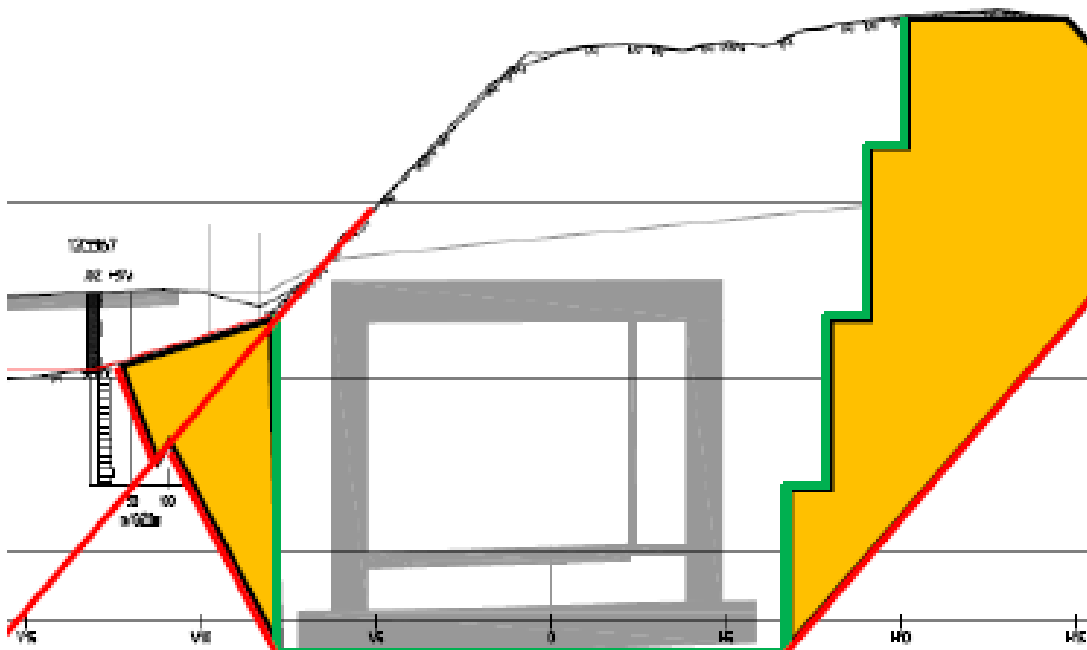
En planstruktur som stryker parallellt med en bergskärning eller i liten vinkel till den kan orsaka s.k. planutglidning.

Kilutglidning

Två plan vars skärningslinje stupar mot schaktgropen kan orsaka s.k. kilutglidning.



Figur 4. Sektion av bergskärning visande tippning (ras) på hängsidan (vänster) och utglidning (skred) på liggsidan (höger).



Figur 5. Sektion av bergskärning för betongtunnel visande hur utfallets area, och därmed volym ökar med ungefär kvadraten på skärningens höjd. På vänstra sidan kan även tippning förekomma.

Tippning

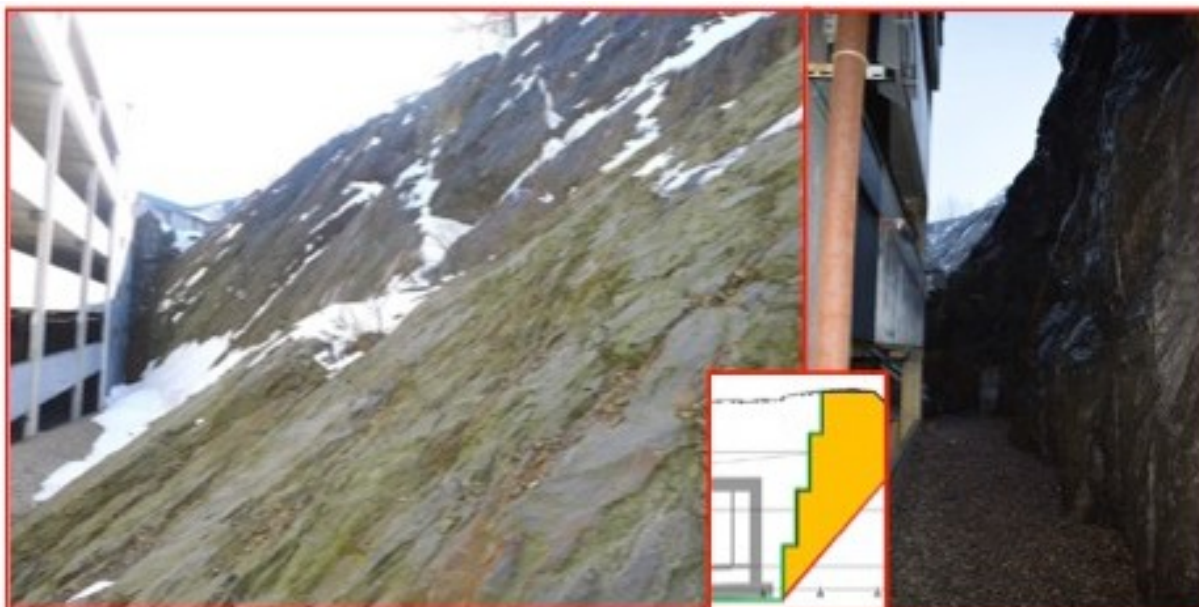
Planutglidning och kilutglidning kan förekomma på liggsidan av schaktgropen, medan det på hängsidan kan förekomma utfall genom tippning, om även flacka sprickor finns (Figur 4). Volymen på plan- och kilutglidning är proportionell med kvadraten på slänthöjden (Figur 5).

Berggrunden i området kring Kungens Kurva, söder om Stockholm, består av veckad och förkastad metagråvacka och här finns brantstående veck med stupning åt öster, en öst-västligt orienterad skjuvzon, samt foliationsytor med beläggning av illit, klorit och andra lermineral. Orienteringen av dessa strukturer varierar från ungefär nord-sydlig vid Heron

City till nordöstlig vid Smista Allé, och stupar 40°-60° mot öster respektive sydöst. I området kan observeras flera exempel på utglidning, ett vid Smista Allé (Figur 6) och det största vid Heron City, där flera plan tillsammans bildar ett skålat skredärr, som syns bra från Månskärsvägen samt från det intilliggande P-huset (Figur 7).



Figur 6. Bergskärning vid Smista Allé. Bergskärningen är ca 3 m hög. På grund av utglidning längs en foliationsyta har släntens lutning blivit flackare än den borrade konturen, som var vertikal. Den ringa höjden har medfört ett hanterbart utfall, och slänten är numera stabil då den följer den befintliga bergstrukturen. Foto: Lars Bergkvist, Golder.



Figur 7. Bergskärning vid P-hus vid Kungens Kurva. Bergskärningen är ca 12 m hög, projekterad att bli vertikal vilket syns på den högre bilden, men på grund av bergskred blev släntens lutning ca 50° , följande flera foliationsplan. Strukturens mynning vid släntfot, samt höjden 12 m medförde att utfallet blev mycket stort: ca 7000 kubikmeter. Slänten är numera stabil då den följer den befintliga bergstrukturen som orsakade bergskredet, vilket turligt nog inträffade under byggtiden och inte efter det att byggnaden färdigställts och tagits i bruk. Ett liknande skred i Norge förstörde ett bostadshus och tog ett antal människoliv. Foto: Mehdi Bahrekazemi, Golder (vänstra), Lars M Hansen (högra).



Figur 8. Bergskärning vid E4/E20 vid Kungens Kurva. Bergskärningen är ca 6 m hög. Konturhålen har borrats vertikalt, men på grund av utglidning har släntens lutning upptill blivit flack. Strukturens mynning högt upp på slänten medförde att utfallet blev begränsat. Den undre röda linjen i högra figuren visar en struktur som ligger tillräckligt långt från schakt för att bilda stöd för bergmassan. Foto: Lars M Hansen.

I ovanstående exempel (Figur 6 och Figur 7) berörs inte befintliga anläggningar. I Figur 9, 10 och 11 visas å andra sidan kraftledningsstolpar som är grundlagda på berg nära en väg som skall breddas. En av dessa stolpar står på en bergmassa av mindre bra kvalitet (Figur 9), en annan i ett område med planstrukturer i berget med ofördelaktig orientering och ett befarat ogynnsamt läge.

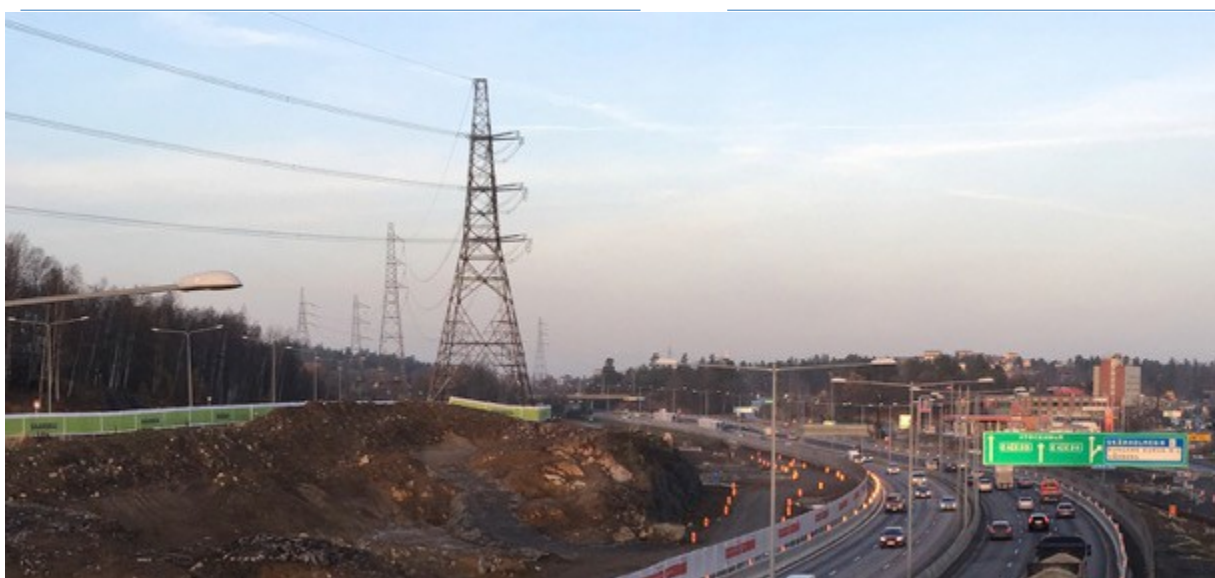
För att på ett skonsamt sätt göra berguttag användes wiresågning (Figur 10) av en slits via vilken spränggaser kan avledas och därmed hindras att tränga in i sprickor och medföra en oacceptabel stor skadezon. Utanför bild i Figur 8 står en annan mast som kan komma att påverkas vid pågående breddning av E4/E20 (Figur 11). Slits har även här utförts med wiresågning, men bergmassan har i skrivande stund ännu inte tagits ut, eftersom mindre sättningar har påvisats, som fordrar att utförd förstärkning kompletteras.



Figur 9. Kraftledningsmast nära väg som skall breddas. Bergmassan består av sedimentgnejs av mindre bra kvalitet och med oxiderade partier. Foto: Lars M Hansen.



Figur 10. Samma kraftledningsmast som i Figur 9. Konturen flyttades några meter ifrån planerat läge och sågades i tre snitt. Ett av sågsnitten syns tydligt t. v. om masten. Foto: Lars M Hansen.



Figur 11. Kraftledningsmast på berg. Längs Skärholmsvägen och längs E4/E20 finns planstrukturer med ogynnsam orientering för stabiliteten (se Figur 8), och utglidning av samma dimension som visas i Figur 7 kan orsaka stor skada. Därför utförs berguttag mycket skonsamt, och kontinuerliga mätningar av stolpens fundament utförs för att kunna avgöra om sättning förekommer. Foto: Lars M Hansen.

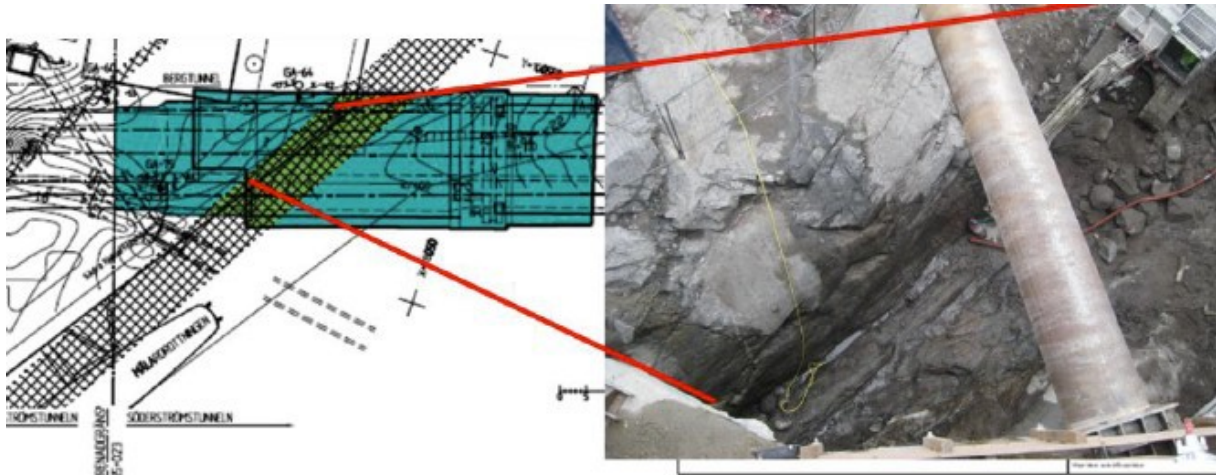
Sprickzoner och lineament

Topografiska lineament, "sprickzoner" och "krosszoner" på byggnadsgeologiska kartan över Stockholm (Stockholms stad, tekniska kontoret) visar sig inte alltid betyda att det finns någon större zon med inflytande på stabiliteten, vilket har visat sig i tunnlar och öppna schakt. Vid Hjorthagen finns ett topografiskt lineament längs Rådjursstigen som visar sig bero på en ca 1 m bred zon med krossat berg (Figur 12). Vid Riddarholmen har en "krosszon", som även utgör ett topografiskt lineament, visat sig vara en sprickzon med en bredd på ca en halv meter (Figur 13). Dessa två exempel visar att sprickzoner och krosszoner kan behöva ses över, då en krosszon i regel av en projektör eller entreprenör betraktas som mer omfattande än en sprickzon. Förslag på hur det kan gå till nämns i avsnittet om kontinuerlig uppdatering.

Zoners och enstaka foliations- eller sprickytors påverkan på stabiliteten är helt beroende av samspelet mellan deras läge och orientering i förhållande till en tunnel eller öppen bergskärning. Till exempel kan en 3 m bred brantstående krosszon som tvärsar en tunnel ha mycket liten påverkan på en tunnel, medan en enstaka foliationsyta (eller kombination) med ca 50-60 graders stupning och strykning parallellt med en bergskärning (Figur 6) kan ha förödande konsekvenser för stabiliteten om den mynnar ut vid släntfoten (Figur 7 vänster), medan samma typ av struktur längre in i bergmassan inte vållar något besvär (Figur 7 höger).



Figur 12. Hjorthagen. Sprickzon som även markerats på byggnadsgeologiska kartan. Översikt och närbild. Foto: Sofie Eskilander, Golder.



Figur 13. "Krosszonen" på byggnadsgeologiska kartan visar sig vid schakt vara en sprickzon med en bredd på ca ½ m (norr är ungefär åt vänster på figuren).Foto: Anja Olsson, Golder.

Höga bergväggar intill befintliga byggnader och andra anläggningar

Vid flera projekt pågår byggen som resulterar i höga bergskärningar intill befintliga anläggningar (t.ex. Förbifart Stockholm vid Smista-Skärholmen-Kungens Kurva) och flera bergskärningar har utförts intill byggnader (t.ex. Idrottshögskolan, Karolinska Sjukhuset och Musikhögskolan), samt intill vatten t.ex. vid Riddarholmen (Figur 14). Vid Södersjukhuset pågår i skrivande stund schaktarbeten, och såväl förbultning som wiresågning utförs för vertikala bergskärningar och tunnlar (Figur 15, Figur 16 och Figur 17).



Figur 14. Riddarholmen. Schaktgrop i berg, avskärmad från Riddarfjärdens vatten med hjälp av sekantpåleväggar, som syns högst upp t.v. i fotot. Skonsamt berggutttag har utförts med wiresågning då bergtäckningen är liten. En sänka i bergytan ovan betongtunneln har fyllts med betong. Sänkan beror på en ca 1/2 m bred sprickzon (Figur 13), som stryker åt NV med stupning åt SV. Foto: Anja Olsson, Golder.



Figur 15. Södersjukhuset. Sågade, ca 10 m höga bergväggar intill befintliga byggnader. Innan sågning har det utförts förebyggande förstärkning i form av lång bult satta från krönet för planerad slänt. Foto: Jörgen Theander, Golder.



Figur 16. Tunnel med liten bergtäckning. Tunneln är förstärkt ovanför det blivande valvet före berguttag och konturen är wiresågad för att hindra spränggaser att tränga in i sprickor och därmed orsaka en allt för stor skadezon i bergmassan runt tunneln. Foto: Jörgen Theander, Golder.



Figur 17. Jämförelse mellan sågad och sprängd bergmassa där även den sågade ytan behöver förstärkas. En sågad yta kan vara förrädisk och uppmärksamhet krävs då sprickorna inte framträder lika tydligt. Foto: Jörgen Theander, Golder.

Bergmassans hållfasthet för grundläggning.

Vid grundläggning av byggnader på berg dimensioneras grundtrycket utifrån bergmassans hållfasthet, vilken i sin tur beror på en mängd faktorer. Viktigt är belägenheten: Hamnar ett grundtryck nära en lodrät brant som på bilderna från Södersjukhuset, kan bergmassans enaxiella hållfasthet (σ_{Ac}) gälla som grundtryck, medan man längre in i bergmassan kan använda sig av en inre hållfasthet (σ_{Ac_m}). Förenklade metoder för bedömning av σ_{Ac_m} har utvecklats av Stille (baserat på RMR_{bas}) och Barton (baserat på Q_i). Den mest sofistikerade metoden baseras på Hoek-Brown och Mohr-Coulumb kriterierna och finns i mjukvaran RocLab (nu RocData), där flera parametrar ingår bl.a enaxiell tryckhållfasthet för intakt berg (σ_{Ac_i}), geologisk bedömning (GSI) och bedömning av sprängskador. En utförlig beskrivning av tillvägagångssättet finns i Evert Hoek:s Course Notes (Hoek, www.rocscience.com).

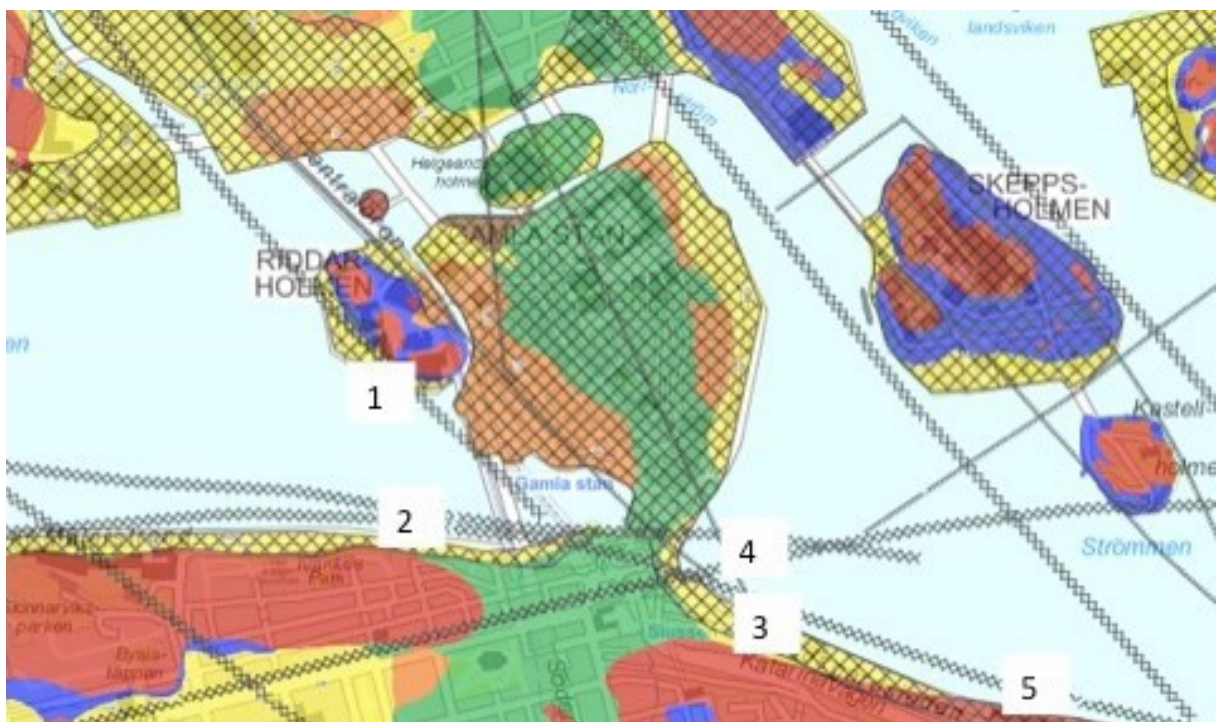
Förkastning i Söderström

Ett antal planerade tunnlar (Förbifart Stockholm, VA-tunnel mellan Bromma och Sickla, tunnelbana mellan Kungsträdgården och Södermalm, en ledningstunnel mellan Danderyd och Södra Hammarbyhamnen och en vägtunnel i öster (Östlig förbindelse)) planeras korsa Mälaren-Söderström-Saltsjön, och en stor utmaning för dessa är förkastningen under

Stadsgårdskajen längs Söderström (Figur 18, 7 och 8). Norra blocket är nerförkastat (Stålhös 1969, karta) och vid Slussen-Stadsgårdskajen stupar förkastningsytan ca 50° åt söder (Olsson m.fl. 2014).

Vid Slussen och längre åt öster vid Stadsgårdskajen har det borrats tre kärnborrhål (13GA01 för Stockholms Stad samt KB01 och 13VEC06 för City Link), som visar en sträcka på ca 50-100 m med uppsprucket berg längs med och under Stadsgårdskajen med flera tecken på bergrörelser som leromvandling, glidytor och krossat berg som blir sämre norrut med kärnförluster för att tämligen avrupt övergå till bättre berg (Figur 19). I samband med borrning av 13GA01 vid övergången från mycket dåligt till bättre berg under Stadsgårdskajen, spolades drygt ca 2,5 m borrhärlor bort med borrhärlor. Detta material bestod sannolikt av svällande lera, vilket kunde påvisas från en bit omvandlat berg ur samma borrhärlor (Clarín & Clark, 2015).

Sprickor med glidytor och med stupning åt söder har observerats vid Södersjukhuset (Figur 20), men rörelseriktningen är inte säkerställd. Även i en tunnel för Citybanan vid Söder Mälarstrand (Figur 21) finns sprickor med leromvandlade ytor och med stupning åt söder, och utanför kajen finns en zon med bredd 50 m (Olsson m.fl. 2014).



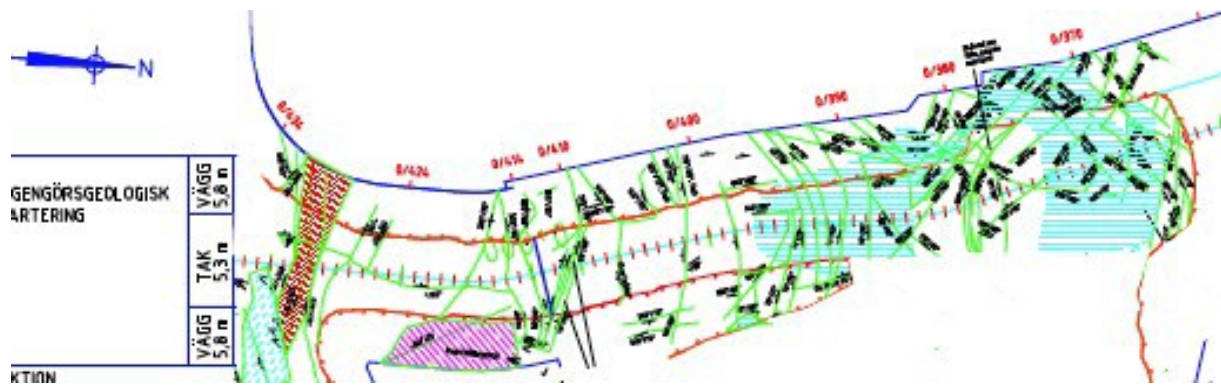
Figur 18. Byggnadsgeologisk karta över Strömmen. 1: < ½ m bred sprickzon (se Figur 13 och Figur 14). 2: Svacka i berggrunden utanför kv Lappskon större vid Söder Mälarstrand. 3: >50 m bred sprickzon som påträffats i kärnborrhål (13GA01), vilken i norr gränser till bra berg men med en ca 2,5 m bred kärnförlust som antas utgöra en zon med leromvandlat berg med svällande lera. 4: dessa två krosszoner har inte påträffats av ett kärnborrhål, 13GA01, som har borrats från en tunnel under Katarinavägen för att korsa dessa,. 5: liknande zon som i #3 har påträffats i två borrhål.



Figur 19. Borrkärna från kärnborrning genom Söderströmsförkastningen vid Slussen. Kärnförlust på ca 2,5 m fördelad på två upptag antas bero på svällande lera. En mindre mängd av sådan lera fanns i den bruna biten av omvandlat berg, och uppvisade ett svälltryck på 150 kPa (Clarín & Clark 2015). Den bortspolade leran kan antas kunna svälla med minst lika högt tryck).



Figur 20. Sydligt stupande sprickor vid Södersjukhuset. Foto: Lars Bergkvist, Golder.

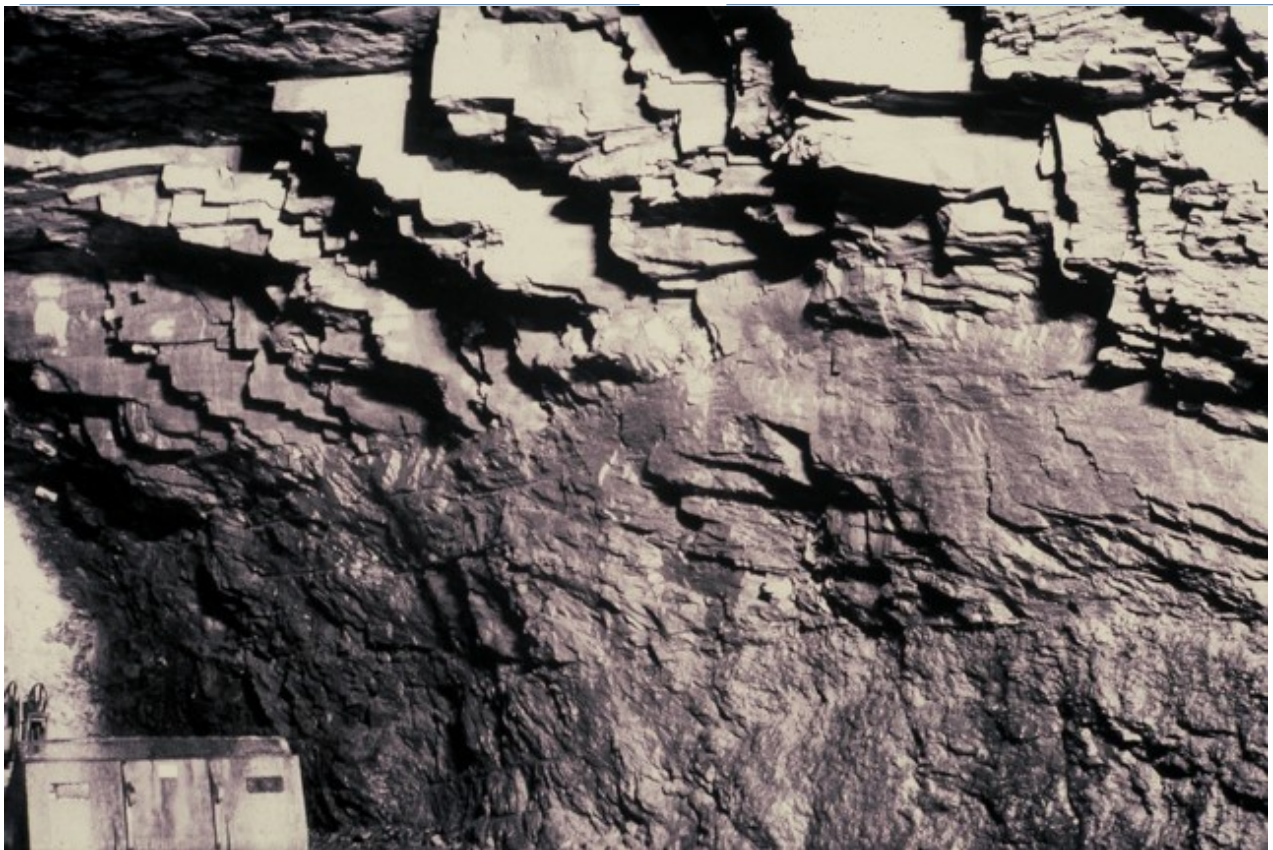


Figur 21. Kartering av tunnel vid Söder Mälarstrand. Brun linje är bergkontur mot tunnel. På båda sidor visas väggarna uppvikta. (standard vid tunnelkartering). Gröna linjer är sprickspår på väggar och tak.

Spricksvärmen stryker ungefär E-W (sprickspår i tak) med stupning på ca 50°S som visas av sprickspår på väggarna.

Bedömning av sprickighet i en bergmassa utifrån borrhäror

Förhållandet mellan den totala sprickmängden i en borrhära och mängden sprickor över en viss diameter (cirkulära sprickplan) i en bergmassa har uttryckts som en exponentialfunktion (Fox m.fl. 2008). Funktionen konstanter är platsspecifika och har bestämts bl.a. för Forsmark och Oskarshamn. Exempelvis kan sprickor med utbredning på över 5 m i bergmassan i Forsmark beräknas utgöra ca 10 % av mängden sprickor som påträffats i en borrhära. Vid Henriksdal har detta testats på en tunnel med bredd 4 m, en längd på ca 100 m och en lika lång borrhära. I borrhäran fanns 200 sprickor och i tunneln karterades ca 20 sprickor som skar genom tunneln, vilket stämmer. Metoden behöver kontrolleras på flera platser för att utröna om funktionen från Forsmark kan användas generellt för Stockholm eller behöver modifieras för olika delar, t.ex. yngre graniter i norr och sedimentgnejs i söder.



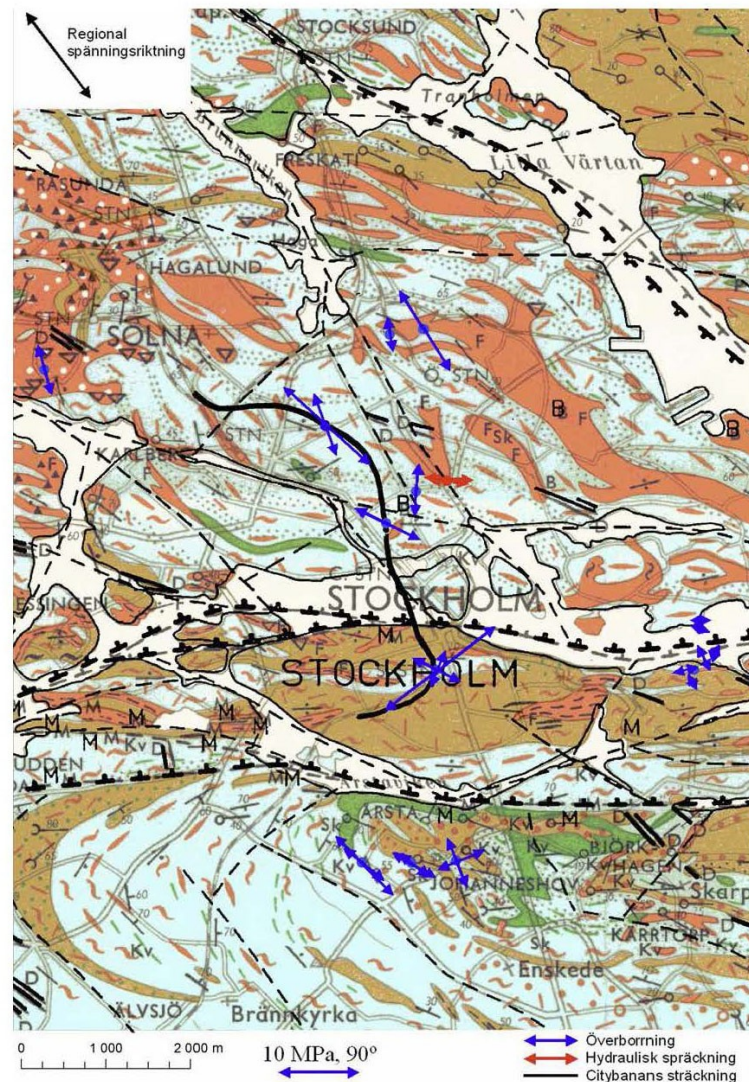
Figur 22. Fotot visar hur samma spricksystem uppträder olika tydligt avseende sprickornas utbredning, beroende på skillnader i bergarternas deformationsegenskaper. Överst mylonitisk kvartsit, i mitten grå fyllit och underst grafitisk fyllit. I bergmassan har mätts höga bergspänningar (20-40 Mpa), vilka dock inte gett upphov till spricksystemet, som orsakats av spänningar som rådde vid bildningen av fjällkedjan. Från tunnel vid Stora Sjöfallet. Foto: Lars M Hansen.

Bergspänningar

I större delen av Stockholmsområdet är initialspänningarna tämligen gynnsamma (3-10 Mpa) för byggande i berg. Smällberg i tunnlar i Stockholm och omnejd är därför sällsynt. Effekterna av bergspänningarna beror, förutom av bergspänningarnas magnitud och riktning i förhållande till anläggningen i fråga på bergarternas deformationsegenskaper (Figur 22).

Mätningar av bergspänningar

I Stockholmsområdet har det utförts bergspänningsmätningar för flera projekt. Resultat och utvärdering av alla dessa mätningar finns sammanställda i en rapport för Citybanan (Perman & Sjöberg 2007). Spänningarnas riktningar visas i Figur 23. Intill Söderströmsförkastningen vid Finnboða varv är spänningarna låga och rentav negativa vilket stämmer väl med det regionala spänningsfältet och förkastningens strykning.

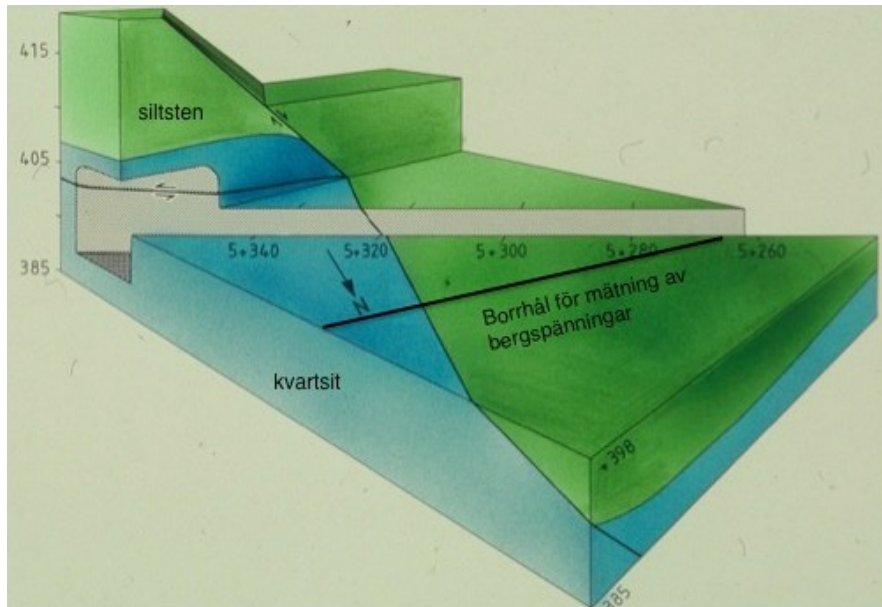


Figur 23. Bergspänningars riktningar i Centrala Stockholm. Mätningarna på Södermalm har utförts i ett område med förgreningar av Söderströmsförkastningen och avviker därför från det regionala nordvästligt orienterade spänningsfältet, som kan ses i t.ex. N Djurgården och söder om Årstaviken (från Perman & Sjöberg 2007).

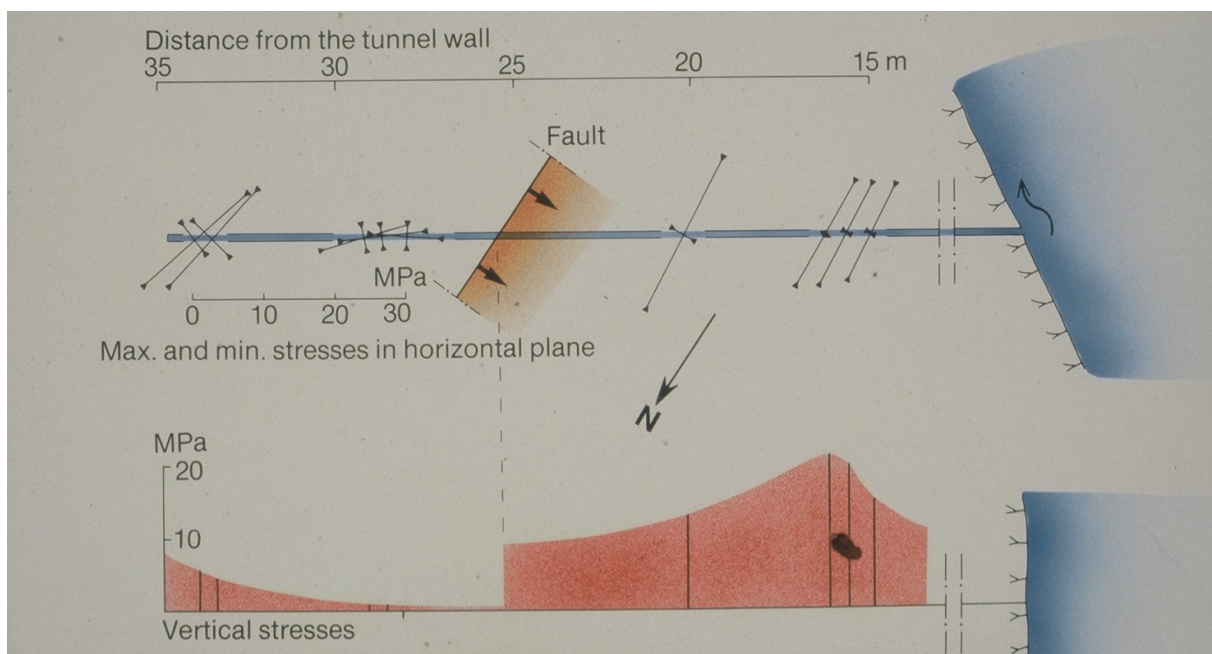
Inga mätningar har utförts på ett systematiskt sätt genom förkastningen vid Söderström eller någon annanstans i Stockholm, så att variationen i spänningsfältet kring förkastningar kan studeras. Sådana mätningar har dock utförts kring en normalförkastning i en tunnel vid Vietas kraftstation (Figur 24). Denna förkastning ingår i en grupp som bildar en gravsänka under Kaledonidfronten (Hansen 1989).

Resultaten som kan ses i Figur 25 visar höga (20-30 MPa) nästan tvådimensionella bergspänningar riktade parallellt med förkastningsplanet på hängsidan fram till ca 5 meter från förkastningsplanet. På liggsidan (vänster i bilden) är spänningsfältet intill förkastningen nästan helt horisontellt och riktat nära tvärs förkastningen, i likhet med några av resultaten vid Söderström, men återgår efter 5-10 meter till ungefär samma orientering som på

hängsidan, men med betydligt lägre vertikalspänning. Framtida mätningar kan komma att ge svar på frågan om hur det förhåller sig med spänningsfältet kring förkastningarna i stockholmsområdet visar samma mönster, och vilka skillnader som finns mellan olika förkastningstyper.



Figur 24. Blockmodell av bergmassa med förkastad yta mellan Prekambrisk kvartsit och därpå lagrad siltsten. Bergspänningar har mätts med överborrning i borrhål som borrades från en tunnel vid Stora Sjöfallet, Lappland (Martna & Hansen 1986).



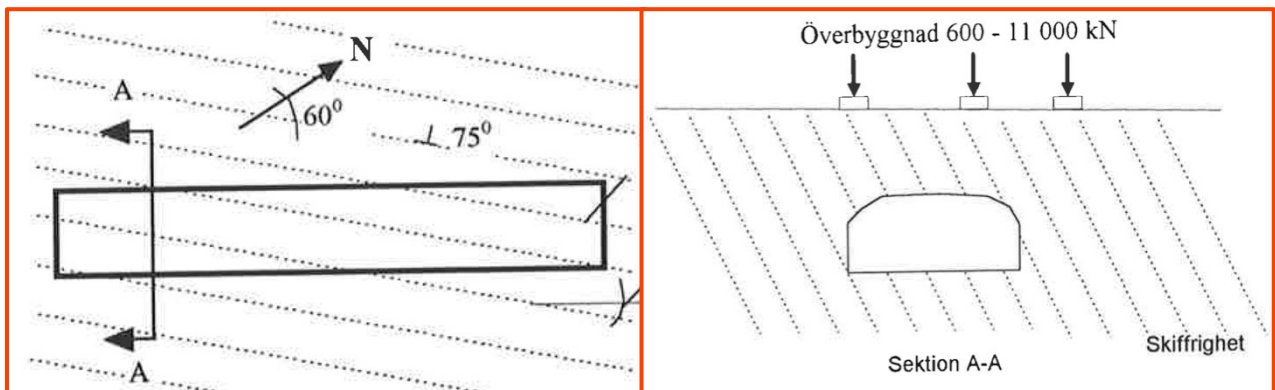
Figur 25. Resultat av bergspänningsmätningar kring en normalförkastning med överborrning (Martna & Hansen 1986).

Bergspänningar vid Arlandabanan

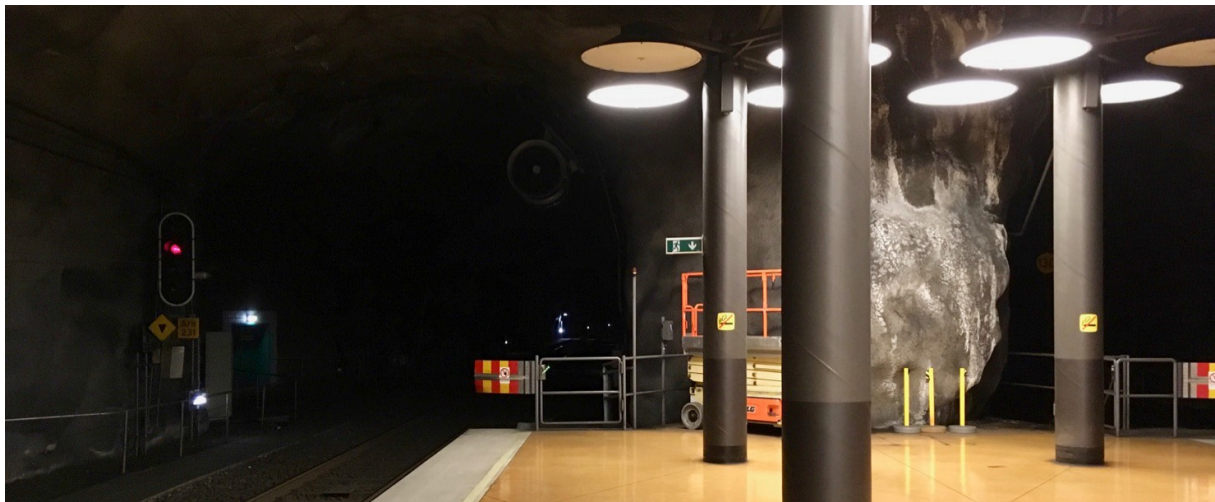
Arlandabanan som är byggd i glimmergnejs och glimmerskiffer som på flera platser ser ut som fyllit, samt i norra änden i granodiorit, utgör ett exempel på hur bergspänningar kan ha gynnsam inverkan på tunnelstabilitet. Största huvudspänningen i stationsområdet är riktad ungefär tvärs tunnlar. Stationerna ligger i ca 20 m breda bergrum med en höjd på ca 8 m och en bergtäckning på ca 10 m (Figur 26). Mellan spårtunnlarna finns en pelare med ca 4 m bredd (Figur 27).

Under bergguttaget av Norra Stationen vid Terminal 5 medförde bergspänningarna ett lyft av taket så att det i övergången mellan stationen och spårtunnlarna uppstod en spricka med en vidd på ca 5 mm mellan bergpelaren och taket, vilket visade att stationsbergrummet hade gynnsamma stabilitetsförhållanden (Ljunggren & Chang 1998).

Även de breda tunnarna för Citybanan vid Tegelbacken och Söder Mälarstrand gynnas på liknande sätt av bergspänningarna.



Figur 26. Skiffrighetens orientering i området vid station Arlanda N. Sektionen AA visar lasten från Terminalbyggnaden på bergmassan ovan stationen (Ljunggren & Chang 1998).



Figur 27. Bergpelare vid övergång station-spårtunnlar. Foto: Lars M Hansen.



Figur 28. Arlandabanan, södra änden av station Arlanda N (terminal 5). Här förekom hävning i taket i samband med sprängning. Sprickan som uppstod mellan bergpelare och ovanliggande bergmassa syns inte på bilden då den är täckt av sprutbetong och den gjutna betongpelaren. Foto: Lars M Hansen.

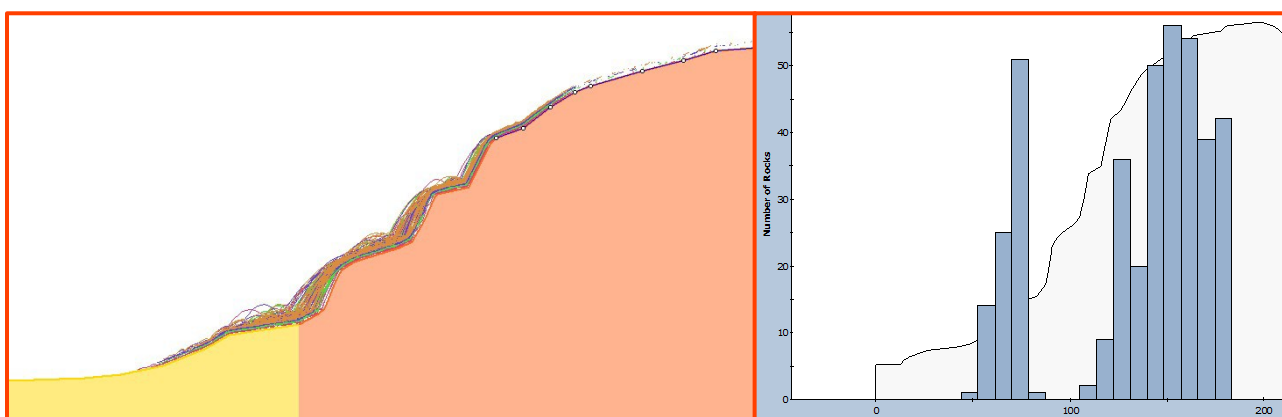
Lösa jordmassor på berg

Ras av lösa block från höga bergslänter

På många ställen i Stockholmsområdet förekommer höga naturliga bergslänter i anslutning till bostäder (Figur 29). Tyresö är ett exempel där ras och rullning av lösa block har förekommit. Riskanalys för sådana händelser kan utföras med hjälp av mjukvara för att bedöma sannolikheten för hur långt från branten block av en viss storlek och form kan hamna (Figur 30).



Figur 29. Byggnad nedanför brant bergssluttning, samt block på krön av sluttning. Foto: Anja Olsson, Sofie Eskilander.



Figur 30. 400 simuleringar av block som kommer i rullning har utförts. Exemplet visar att tre fjärdedelar av dessa block stannar högt uppe på slänten, medan ca $\frac{1}{4}$ kommer hela vägen ner. Simuleringen är konservativ då den behandlar kubiska block, medan verkliga block i detta fall är mer parallelepipediska och således mer benägna att stanna på färden. Träd och buskar bidrar också dämpande.

Djup till berg.

Vid projektering av anläggningsarbeten och husbyggen brukar sondering förekomma för att undersöka jordarternas tekniska egenskaper samt djupet till berg. Förväntade djup styr med vilken täthet sonderingar utförs. Det finns dock alltid osäkerheter: Figur 31 och Figur 32 visar exempel på detta från ett bygge på Norra Östermalm.



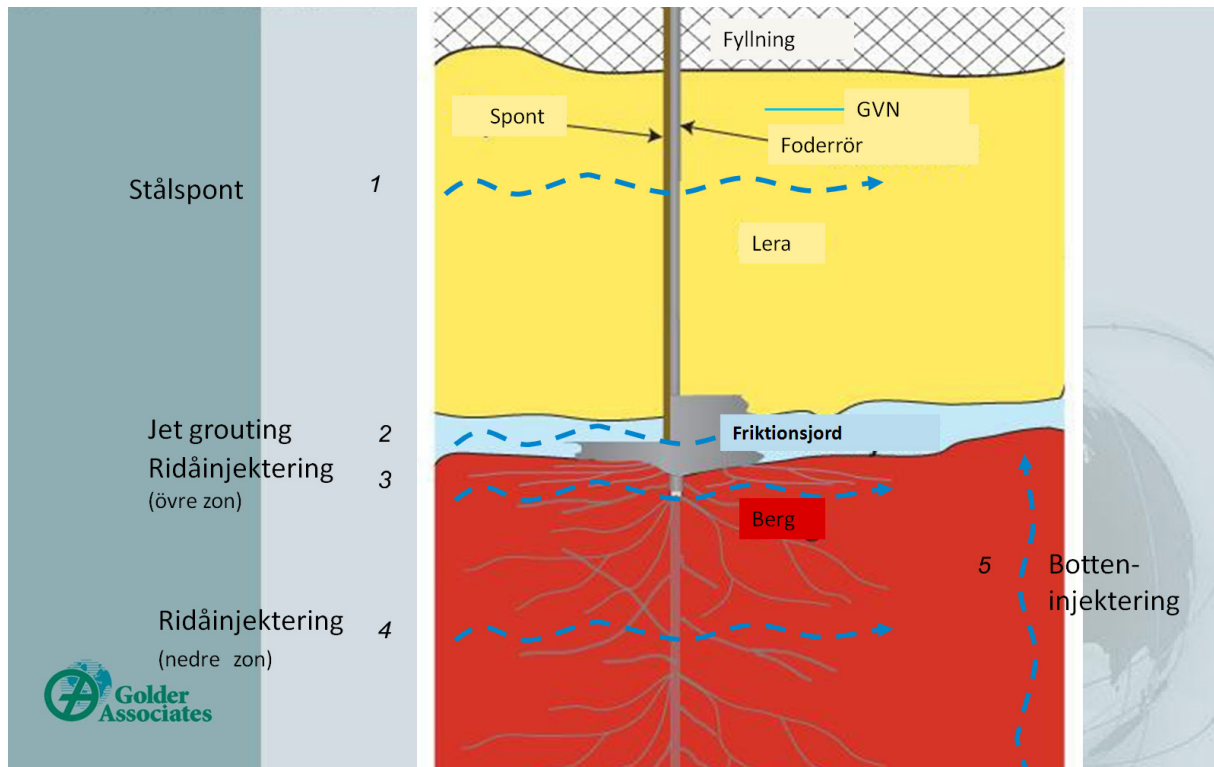
Figur 31. Exempel på hur bergsondering kan ge upphov till missvisande tolkning. Vid sondering som utförts vid pilarna (cc ca 10 m) missades sänkan. Foto: Edward Runslätt, Golder.



Figur 32. Figuren visar tolkad (vit) bergnivå baserad på sonderingar och verklig (röd) bergnivå, samt stödmur som fick byggas på grund av detta. Foto: Edward Runslätt, Golder.

Tätskärm

När bergschakt skall utföras i jordgrop, behövs ofta en tätskärm mot jordras/skred och vatten. Dessutom kan det krävas tätning för att möta krav på grundvattennivå för att bl. a. förebygga sättningar i befintliga byggnader. Figur 33 visar utförandet av en typisk tätskärm för spontgrop, och Figur 34 visar hur olika metoder används i de geologiska formationerna. Kontakten mellan spont och berg visas i Figur 34 och Figur 35.



Figur 33. Uppbyggnad av tätskärm med spont och injektering som sker på flera nivåer, och med olika metoder. I många fall säkras sponten med en kantbalk av armerad och bergförankrad betong. 1) Tätskärmen i fyllning och lera består av spont, som dels tätar mot vatten, dels hindrar ras eller skred in i gropen. I friktionsjord på berg och i bergmassan utgörs tätningen av injekteringsvätska. 2) Jetinjektering utförs i jord-berg gränsen. 3-4) förinjektering i berg kan behöva utföras i nivåer, och i den färdiga kan det behövas botteninjektering (5). Ytberget (3) är ofta otätt, och kan tillsammans med friktionsjorden utgöra en gemensam akvifär som kan vara förbunden med eller skild från den djupare bergakvifären, om en sådan finns (4) Figuren är modifierad efter Mikael Creütz, Golder.



Figur 34. Injekteringsbruk i kontakten mellan spontfot och berg. Foto Mikael Creütz, Golder.



Figur 35. Grop av rörspont bestående av foderrör och svetsad plåt, där bergväggen till vänster har sågats med wire och den till höger har sprängts. Under spontfoten (mörka området till höger om mitten, där foderrörens undre ände hänger fritt) har block glidit ut, en utglidning av samma typ som visats i Figur 8. Foto: Mikael Creütz, Golder.

Förslag till löpande uppdatering av byggnadsgeologiskt underlag

- Genomgång av befintlig tunnelkartering och annat material från förundersökning och uppföljning av Citybanan och andra avslutade projekt, avseende påträffande av zon eller lineament på kartan
- Kontinuerlig uppföljning av pågående och planerade projekt avseende påträffande av zon som kan kopplas till tolkad zon eller lineament som markerats på byggnadsgeologiska kartan.
- Ovanstående kan utföras av studenter som kandidat- eller masterarbeten

Referenser

Barton, N R; Lien, R; and Lunde, J. Engineering Classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech. 6(4), 189-239

Clarín, V.; Clark; A. 2015. The Incidence and Associated Geotechnical Issues of Swelling Clay in Stockholm. Uppsala universitet/Institutionen för geovetenskaper

Fox, A; La Pointe, P; Hermanson, J; Öhman, J. 2008. Statistical geological discrete fracture network model. Forsmark modelling stage 2.2. Updated 2008-12. SKB R- 07-46

Hansen, L., Age relationship between normal and thrust faults near the Caledonian thrust front at the Vietas Hydro Power Station, Swedish Lapland. Proc. Conf.

Caledonian and Related Geology of Scandinavia, Cardiff 1987. Graham & Trotman, London, 1989.

Hoek, E. Rock Mass Properties, Practical Rock Engineering, www.rocscience.com.

Ljunggren, C.; Chang, Y.; Vattenfall Hydropower. Andersson, J.; Golder Associates. 1998. Bergspänningsmätningars representativitet. Mät noggrannhet och naturliga variationer vid hydraulisk spräckning och överborrning. SveBeFo Rapport 37.

Martna, J., & Hansen, L. Initial rock stresses around the Vietas headrace tunnel no. 2 and 3, Sweden. Proc. Int. Symp. Rock Stress, 605-613, Stockholm, 1986.

Martna, J. & Hansen, L. Rock bursting and related phenomena in some Swedish water tunnels. 6th Int. Congr. Rock Mech. ISRM, Montreal, 1987

Olsson, A., Hermansson, J. och Hansen, L. M. (2014). Geomodell Strömmen. Stockholm: ELU Konsult AB (Teknisk rapport, 12512480520).

Perman, F; Sjöberg, J. Initialspänningar för Citybanan. Vattenfall 2007 Stille, H. Bergmekanik för väg- och vattenbyggare. Kompendium. KTH

Stålhös, G.; 1969. Beskrivning till Stockholmstraktens Berggrund. SGU Ba 24.