

RAPPORT

Bokslut – Sulfidhaltiga bergmassor inom E4 Förbifart Stockholm



Provtagning av borrhax under Kungshatt. Foto: Gustav Dahl, AFRY/Trafikverket

Trafikverket

Postadress: 172 90 Sundbyberg

E-post: trafikverket@trafikverket.se

Telefon: 0771-921 921

Dokumenttitel: Bokslut – Sulfidhaltiga bergmassor inom E4 Förbifart Stockholm

Författare: Tomas Holmström, Trafikverket, Bernt Wistrand, Trafikverket, Magnus Hallberg, Trafikverket, Fredrik Nylén, Trafikverket

Dokumentdatum: 2021-11-12

Ärendenummer: TRV 2021/135027

Version: 1.0

Kontaktperson: Bernt Wistrand, Trafikverket, Tomas Holmström, Trafikverket,

1	Sammanfattning.....	4
2	Introduktion.....	5
3	Bakgrund	6
3.1.	Geologisk beskrivning av området.....	6
3.2.	SGU-undersökning 2015	8
4	Provtagning av tunnelberg	10
5	Resultat	10
5.1.	Totalsvavelhalt och sulfidhalt.....	10
5.2.	ABA-test; NNP och NPR	11
5.3.	NAGpH-test.....	12
5.4.	Fuktkammartest (HCT)	13
5.5.	Mineralogiska studier.....	14
6	Ytprov 2015 i jämförelse med prov av borrhax 2019-2020 ...	16
7	Diskussion om provtagningsmetodik och analysresultat	17
8	Utvärdering och slutsatser	17
9	E4 Förbifart Stockholm; Förutsättningar vid hantering av bergmassor	18
9.1.	Klassning enligt Mark- och Miljödomstolen	18
9.2.	Inriktning vid hantering av bergmassor	19
10	E4 Förbifart Stockholm; Hantering av bergmassor	19
11	Forskning och utveckling.....	20
12	Källa.....	20
	Bilaga 1	21

1 Sammanfattning

Denna rapport är en genomgång och del av Trafikverkets större arbete för hantering av sulfidhaltigt bergmaterial. Den ska ses som en kunskaps- och lägesmanställning i samband med att frågorna om svavel i bergmassor började aktualiseras under våren 2019. Eftersom större delen av berget inom E4 Förbifart Stockholm är uttaget och behandlat i krossanläggningar blir denna rapport också ett bokslut över hanteringen.

Förbifart Stockholms bergmassor utgör inte ett avfall utan klassas som biprodukt enligt miljödom i Mark- och miljödomstolen, 2014. Detta innebär att inriktningen för hantering av bergmassorna har utgått från att bergmaterialet är en resurs och att allt berg ska återanvändas samt att deponi ska undvikas.

Redan 2015 utförde Sveriges geologiska undersökning, SGU, på uppdrag av Trafikverket bergartsgeokemiska undersökningar där 28 bergprov togs ut på hällar (ytberg) längs hela sträckan inom E4 Förbifart Stockholm. Med start våren 2019 och fram till 2020 utförde AFRY, på uppdrag av Trafikverket provtagning och analyser på totalt 29 borrhaxprover. Då provtagningen har gjorts i tunnelfronterna under olika tider så har en mer heltäckande bild av läget erhållits eftersom fronterna rört sig framåt. Samtliga prover har analyserats på totalsvavelhalt.

De borrhaxprover som togs i tunnelfronterna 10-30 meter under ytan uppvisar en tämligen god överensstämmelse av totalsvavelhalt med de prover som togs på ytan av SGU 2015. Detta visar på vikten av en noggrann inledande kartering som pekar på var eventuella fördjupade utredningar och provtagningar behöver utföras. En geologisk kartering ger sålunda en "områdesindikation" på varierande förekomster av sulfidmineral.

Det finns ett antal *statiska tester* som är utvecklade metoder från gruvindustrin. Dessa tester används för att bestämma neutraliseringspotentialen hos materialet. Vidare kan den totala surheten bestämmas genom att få ett resultat på hur långt ner pH teoretiskt kan sjunka. Dessa tester tar inte hänsyn till tidsförloppet vilket *dynamiska (kinetiska) tester* gör. Dynamiska tester, t ex fuktkammartest, bedöms ge den mest realistiska indikationen för risken på sura förhållanden. Testerna utförs under en lång tid där materialet omväxlande utsätts för fukt och torka under kontrollerade former på laboratorium.

Resultatet av de statiska testerna är tyvärr inte helt tillförlitliga. Beroende på utvärderingsmetod är resultatet direkt motstridigt. Fuktkammartestet visar på ett säkrare resultat gällande eventuella förändringar av pH och utlakning av metaller.

Analyserna av bergmaterialet från Förbifart Stockholm visar att neutraliserande ämnen dominerar. På sträckan från och med Kungshatt och norrut, vilket omfattar merparten av allt berg i Förbifart Stockholm, finns berg med äldre granit som har bra neutraliserande förmåga. Här har också den icke-syrabildande bergarten ortognejs karterats.

I Tunnel Söder (delen söder om Kungshatt mot Skärholmen) har bitvis högre totalsvavelhalter analyserats. Här har bergarten paragnejss karterats som kan vara syrabildande. Fuktkammartest från bergmaterial från Tunnel Söder visar dock att ingen pH-sänkning eller utlakning skett. Att endast utgå ifrån totalsvavelhalter för att klassificera bergmaterial är därmed inte en säker metod. De fuktkammartester, som bättre motsvarar lakning över tid vad gäller risken för försurning, har utförts på material från Tunnel Söder med totalsvavelhalterna (0,43%, 0,71% och 1,09%). Resultatet från dessa tester uppvisar ingen försurning och inte heller utlakning av metaller över tid.

Det som saknas för bygg- och anläggningsbranschen är tillförlitliga och snabba predikteringsmetoder som också är anpassade för den verksamhet som bedrivs. Idag pågår två större doktorandprojekt i samarbete med Luleå Tekniska Universitet som ska bidra till att fylla kunskapsluckorna om prediktering av sulfidförande bergmaterials möjliga miljöpåverkan/omgivningspåverkan.

2 Introduktion

De kemiska förutsättningarna för sura reaktioner i svavelhaltiga bergmassor är tillgång till luftens syre, en fuktig miljö, neutraliseringskapaciteten i bergmaterialet samt av avgörande betydelse hur sulfiden är kemiskt bunden och hur mineralet sitter i förhållande till andra mineral.

I det fallet att vittring av bergmaterialet sker, uppstår den över ett antal år d.v.s. vittringen är mycket långsam. Vittring är ytterligare en förutsättning som ska uppfyllas för att risk ska uppstå för sura förhållanden i berg med förhöjda halter av sulfidmineral. I de fall vittring sker och sulfidmineralen är kemiskt bunden kommer inte sura förhållande att uppstå. En faktor som påverkar risken för vittring är storleksfördelningen hos bergmaterialet då det krossas. Ju större stenfraktion desto mindre exponerad yta desto lägre vittringsgrad och vice versa.

Att bergmaterialet innehåller svavel, behöver alltså inte innebära att lakvatten från ett bergmaterial per definition är surt d.v.s. har ett pH under 7.

Vid ogynnsamma förutsättningar enligt ovan kan dock ett pH-värde under 7 i lakvattnet från bergmaterialet förekomma. Vid uttalat dåliga förutsättningar, där sulfidmineralet är svagt bunden och inte omgivet av neutraliserande mineral, kan även kraftiga sänkningar av pH ske i lakvattnet. Vid extremt låga pH (<4,5) kan som konsekvens en större mängd metaller lakas ur materialet.

Det är alltså komplexa kemiska och fysiska förutsättningar som avgör om risken för en sur påverkan på lakvatten finns.

De standardiserade metoder för analys av svavelinnehållet och dess sura eller basiska potential har sitt ursprung i lerjordar men används även som vägledande underlag för analys av bergmaterial. Partikelstorleken i en jord är mycket fin jämfört med berg- och krossmaterial. De standardiserade metoderna för analyserna innebär alltså en uppkrossning av bergmaterialet till fraktioner under två mm, ungefär som borrhax. Analyser utförs således på en bergfraktion som inte är användbar i anläggningsbranschen som t ex ballast till vägunderbyggnad eller betongframställning.

Det finns ett antal *statiska tester* som är utvecklade metoder från gruvindustrin. ABA-tester (*Acid Base Accounting*) används för att bestämma neutraliseringspotentialen hos materialet. Vidare kan den totala surheten bestämmas genom att få ett resultat på hur långt ner pH teoretiskt kan sjunka via tillsats av kraftigt oxidationsmedel, s k NAGpH-test (*Net Acid Generation*). De statiska testerna bedömer bara om materialet är syrabildande, i en osäkerhetszon, eller neutraliserande. Dessa tester tar inte hänsyn till tidsförloppet för eventuell förurning och lakning av metaller.

De tester som idag bedöms ge den mest realistiska indikationen för risken på sura förhållanden och eventuell lakning är s k *dynamiska (kinetiska) tester* t ex fuktkammartestet (*Humid Chamber Test, HCT*). Fuktkammartestet utförs under en lång tid (flera månader) där materialet omväxlande utsätts för fukt och torka under kontrollerade former på laboratorium.

För att kunna förutsäga om ett bergmaterial kommer att producera en sur, neutral eller basisk miljö är det nödvändigt att skaffa sig så mycket kunskap som möjligt om bergmaterialets kemiska sammansättning, mineralogi och textur. Med *mineralogiska studier*, optisk mikroskopering och kvantitativ SEM (Scanning electron microscope) i kombination med fuktkammartestet ges bättre underlag för att förutse ett bergmaterials egenskaper.

3 Bakgrund

3.1. Geologisk beskrivning av området

Berggrunden i Stockholmsområdet, framför allt i den centrala och södra delen domineras av 1,9 miljarder år gamla metasedimentära bergarter¹ vars ursprungsmaterial utgjorts av leriga till sandiga sediment t ex gråvackor² (se blå färg i figur 1). Bergarterna är vanligtvis kraftigt omvandlade och har genomgått mer eller mindre kraftig partiell uppsmältning, varför varianter av bergarten migmatit dominerar. Det är de vanligaste och äldsta bergarterna i Stockholmsområdet.

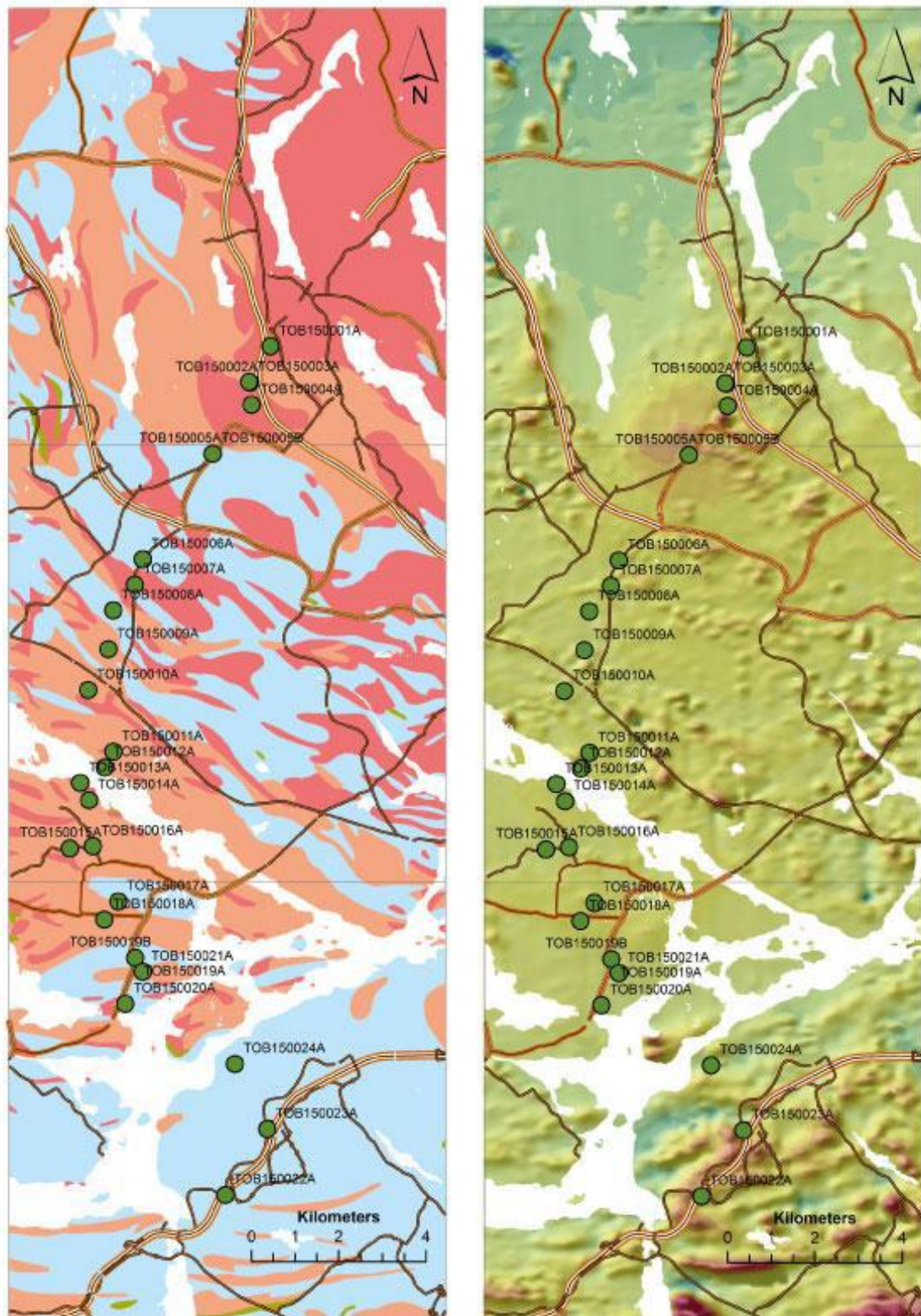
Något yngre än metasedimentära bergarter är vulkaniska bergarter och en liten del kalksten som är karakteristiska för Bergslagen som också finns i Stockholmsområdet. Dessa bergarter, och gråvackorna, innehåller ibland mineraliseringar med järnoxider och/eller sulfider. Gråvackor, vulkaniska bergarter och kalkstenar sammanfattas som ytbergarter, d.v.s. bergarter som ursprungligen avsatts på markytan eller havsbotten.

Norra delen av Stockholmsområdet utgörs av yngre granit (1,8 miljarder år gammal, se röd färg i figur 1) som ett väsentligt inslag i berggrunden, medan yngre granit är helt underordnade i södra delen.

På Lovön domineras bergarten huvudsakligen av äldre graniter (se orange färg i figur 1)

¹ Förbifart Stockholm – Bergartsgeokemi. En bergartsgeokemisk undersökning av de dominerande bergarterna utefter Förbifart Stockholms sträckning - Anders Hallberg, Torbjörn Bergman, Sveriges geologiska undersökning, Uppsala augusti 2015, SGU Dnr 35-1875/2014.

² SGU slutade att använda termen "gråvacka" 2020. Numera använder SGU termen "vacka".



Figur 1. Till vänster del av SGUs (1:50 000 skala) berggrundsgeologiska karta där blå färg visar olika sedimentgnejser (t ex gråvacka), orange färg äldre graniter och röd färg yngre (Stockholms-) graniter. Till höger ett utdrag ur SGUs flygmagnetiska karta där röd färg indikerar mera magnetiska bergarter. Provtagna lokaler visas som gröna punkter.

3.2. SGU-undersökning 2015

2015 utförde Sveriges Geologiska Undersökning, SGU, på uppdrag av Trafikverket bergartsgeokemiska undersökningar där det togs 28 bergprov (ytberg) längs hela sträckan inom Förbifart Stockholm. Eftersom berggrunden i Stockholmsområdet är ovanligt välblottad och det finns flera sprängda vägskärningar för provtagning utefter projektets sträckning, utfördes provtagning på hållar i stället för på borrhärlor som genererats av de olika geologiska undersökningar som genomförts. Provtagning på ytan ger dessutom möjligheten att få en två-dimensionell överblick runt provtagningslokalen för att säkerställa att den provtagna bergarten är representativ för lokalen.

Tjugoåtta bergartsprov har bl a analyserats på totalsvavel som redovisas i tabell 1. De gröna punkterna med provbeteckning i figur 1 visar var proverna togs.

Tabell 1. Provresultat av totalsvavelhalten från SGUs bergartsgeokemiska rapport från 2015.

Prov ID	Lokal	Projekt inom E4 Förbifart Stockholm	Tot-S %
TOB150001A	Häggvik	Akalla-Häggvik	0,04
TOB150002A	Öster om Hansta naturreservat	Akalla-Häggvik	0,12
TOB150003A	Öster om Hansta naturreservat	Akalla-Häggvik	0,19
TOB150004A	Öster om Hansta naturreservat	Akalla-Häggvik	0,02
TOB150005A	Akalla	Norr	0,02
TOB150005B	Akalla	Norr	0,02
TOB150006A	Lunda, vägskärning nära	Norr	0,02
TOB150006B	Lunda, vägskärning nära	Norr	0,33
TOB150007A	Vägskärning	Norr	0,01
TOB150008A	Kälvesta	Norr	0,05
TOB150009A	Vinsta vid Bilprovningen	Norr	0,01
TOB150009B	Vinsta vid Bilprovningen	Norr	0,04
TOB150010A	Hässelby Gård vägskärning	Norr	0,02
TOB150011A	Grimsta nära koloniområde	Norr	0,01
TOB150012A	Grimsta	Norr	0,01
TOB150013A	Lövön, nära norra stranden	Lövön	0,01
TOB150014A	Lövön, norra, Solbrinks gård	Lövön	0,01
TOB150015A	Lövön, vägskärning vid Backtorp	Lövön	0,04
TOB150016A	Lövön, vägskärning vid Hogsta	Lövön	0,01
TOB150017A	Lövön, golfb. väster om D-holm,	Lövön	0,03
TOB150018A	Lövön, golfb. väster om D-holm,	Lövön	0,06
TOB150019A	Lövön, vid Edeby	Lövön	0,01
TOB150019B	Lövön, vid Edeby	Lövön	0,02
TOB150020A	Lövön, strax öster om Lindötunneln	Lövön	0,13
TOB150021A	Lövön, sydvästra, vägskärning vid Bergdalen	Lövön	0,02
TOB150022A	Kungens Kurva, sydvästra delen, cykelbana	Kungens Kurva	2,36
TOB150023A	Skärholmen, vägskärning vid St1-macken	Kungens Kurva	0,36
TOB150024A	Sätra Berg, sydväst om vattentornet	Söder	0,09

Generellt sett är det låga totalsvavelhalter i berget i större delen av Förbifart Stockholm. Högre halter kan noteras i södra delarna vid Kungens Kurva.

Utifrån denna kunskap kan det med stor sannolikhet antas att huvuddelen av bergarterna utefter Förbifart Stockholms sträckning generellt inte är syraproducerande.

4 Provtagning av tunnelberg

Provtagning och analyser har utförts på borrhax³ från olika tunnelfronter längs med Förbifart Stockholm. I undersökningen som utförts av AFRY har totalt 29 prov från de olika tunneldelarna samlats in. Sammanlagt har 12 prov samlats in från Tunnel Norr, 6 prov från Tunnel Lovö, 2 prov från Kungshatt (del av Tunnel Söder) samt 9 prov från Tunnel Söder. Se sammanställning i tabell A i bilaga 1 samt i tabell 2.

Samtliga prover har analyserats på totalsvavelhalt⁴ och i de flesta fall även på sulfidhalt. Proverna har sedan analyserats vidare med ABA-test och en del dessutom med NAGpH-test. Tre stenmaterialprover från Tunnel Söder har genomgått fuktkammartest (HCT).

Proverna har samlats in under olika tider längs med hela Förbifart Stockholm med start våren 2019. Därefter komplettering med Tunnel Lovö och ytterligare provtagning längs med hela sträckan hösten 2019.

Under 2020 kompletterades provtagningen med ytterligare borrhaxprov från Tunnel Lovö och Tunnel Söder. Då provtagningen har gjorts i tunnelfronterna under olika tider så har en mer heltäckande bild av läget erhållits då fronterna rört sig framåt.

Parallellt med denna provtagning har även arbetet med att ta fram en standardiserad provtagningsmetodik med XRF-analys (X-Ray Fluorescence) på bergmassor påbörjats och där den inledande fasen är genomförd (*PM Inledande Försök Provtagningsmetodik Borrhax 2020-04-14 Slutversion*). XRF-metoden är en snabb metod där analysen kan göras på borrhax-provet i fält. Inom ramen för FoI-projektet "*Identifiering av bergmassans nyckelparametrar för geokemisk prediktering innan uttag av bergkross*" tillsammans med Luleå Tekniska Universitet kommer bl a denna metod för provtagning att utvecklas vidare.

5 Resultat

5.1. Totalsvavelhalt och sulfidhalt

Att bestämma totalsvavelhalten är det första steget för att få en uppfattning om materialet kan vara syraproducerande. Allt svavel är dock inte syrabildande eftersom det finns olika svavelföreningar där inte alla oxideras av luftens syre. Däremot kan mineraler som innehåller föreningar i formen av sulfider oxideras och bli syrabildande, t ex mineralet pyrit (järnsulfid). Tabell 2 visar på svavelanalyser från borrhax från Förbifart Stockholms tunnlar. Sulfidhalten ligger på ca 80-90% av totalsvavelhalten. Totalt är 29 borrhaxprover uttagna och halterna av totalsvavel fördelar sig på följande sätt:

<u>Totalsvavelhalt</u>	
<0,3 %	= 21 st
0,3-0,5%	= 2 st
0,5-1,0 %	= 3 st.
>1,0 %	= 3 st

³ Mestadels borrhaxprover från injekteringsborrning men några få även från salvborrning.

⁴ Resultat från metod ALS S-IR08 har använts i redovisningen. Där det saknas sådana analyser har Sweco's analysresultat använts.

Tabell 2. Antal prov per tunneldel och medelvärde av totalsvavelhalt och sulfidhalt på respektive del. (Ej viktat mot mängden berg.)

Plats	Antal borrkaxprover (st)	Medelvärde svavelhalt (%)	Medelvärde sulfidhalt (%) ⁵
Tunnel Söder – Sätra/Skärholmen	9	0,82	0,78
Tunnel Söder - Kungshatt	2	0,040	0,030
Tunnel Lovö	6	0,083	0,068
Tunnel Norr	12	0,12	0,096 (5 prov)
Totalt antal prov	29	0,33	

Se även bilaga 1.

5.2. ABA-test; NNP och NPR

ABA (*Acid Base Accounting*) är som tidigare nämnts en *statisk* metod⁶ dvs man får ett resultat av andelen syraproducerande förmåga i jämförelse med andelen neutraliserande förmåga hos ett bergmaterial. Analysen talar inte om förurningens hastighet eller om materialet verkligen blir försurande. Detta framkommer istället i andra undersökningar, bl a i *dynamiska* analyser. Se kapitlet 5.4 *Fuktkammartest (HCT)* nedan.

De uttryck som används är AP (*Acid Potential*) och NP (*Neutralization Potential*). Vid jämförelse finns två sätt att redovisa detta. Förenklat antingen som en subtraktion mellan NP och AP eller som en kvot mellan NP och AP. Det kan sammanfattas på följande sätt:

- NNP (*Net Neutralization Potential*) dvs $NP - AP$
- NPR (*Neutralization Potential Ratio*) dvs NP/AP

Både NNP och NPR är parametrar som visar om ett bergmaterial är potentiellt syrabildande eller neutraliserande.

NNP (*Net Neutralization Potential*) över 20 är neutraliserande -20 till 20 innebär osäker zon och under -20 syrabildande. Med god kunskap om mineralogin behöver dock inte

⁵ Analysresultat <0,01 har räknats som 0,01.

⁶ SS-EN 15875:2011 Karaktärisering av avfall – Statisk test för bestämning av syrabildnings- och neutraliseringspotential i sulfidhaltigt avfall

intervallet vara orsak till osäkerhet⁷. NNP visar mer konkret mängden försurande ämnen som kan lösgöras från ett bergmaterial.

NPR (*Neutralization Potential Ratio*) över 3⁸ är neutraliserande, 1-3 osäker zon och under 1 syrabildande. Metoden bygger på utvinningsavfall och är utvecklat från gruvindustrin.

Totalt har ABA-test utförts på 22 borrhaxprover av totalt 29 uttagna prover. NNP och NPR fördelar sig på följande sätt:

NNP (*Net Neutralization Potential*)

>20 neutraliserande = **2 st**

-20 till 20 osäker zon = **17 st**

<-20 syrabildande = **3 st**

NPR (*Neutralization Potential Ratio*)

>3 neutraliserande = **9 st**

1-3 osäker zon = **6 st**

<1 syrabildande = **7 st**

Samtliga prover som är klassade som syrabildande, både i NNP och NPR, kommer från områden söder om Kungshatt.

Se kapitel 7.

5.3. NAGpH-test

Något förenklat går testet ut på att tillsätta ett starkt oxidationsmedel, väteperoxid H₂O₂, och sedan bestämma den totala surheten där resultatet visar hur långt ner pH teoretiskt kan sjunka, NAGpH-test (*Net Acid Generation*). Allt svavel oxideras till syra och därmed kan man avgöra materialets förurningsförmåga. Eftersom det är en statisk metod visar den inte om detta sker i verkligheten och därmed inte heller hur lång tid det tar för materialet att sänka pH. För att ytterligare utvärdera NAGpH-svaret kan testet kompletteras med NPR.

Om pH är <4,5 efter NAGpH-test klassas det som syrabildande eller osäkert beroende på värdet på NPR.

Om pH >4,5 klassas det som icke syrabildande eller osäkert beroende på värdet på NPR.⁹

Totalt har NAGpH-test utförts på 15 borrhaxprover av totalt 29 uttagna. Två prov av 15 uttagna prov är från Tunnel Söder. Följande resultat har erhållits:

⁷ Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 120–132.

⁸ SFS 2013:319 6§

⁹ AMIRA (2002). ARD Test Handbook, Project P387A Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage. AMIRA International Limited, May 2002.

NAGpH-test (*Net Acid Generation*)

- pH >4,5 = **14 prov** (pH-intervall: 6,4-11,2, då NPR>1). Klassas som icke syrabildande.
- pH >4,5 = **1 prov** från Tunnel Söder (pH: 7,6 och NPR<1). Klassas som osäkert.
- pH<4,5 = **0 prov**. Inget av proverna klassas som syrabildande

En reservation gällande provsvaren för NAGpH handlar om att dessa värden kan ha påverkats av rester av cementbruk från injekteringen i tunneln. Bruket har en stark basisk förmåga som neutraliserar den uppkomna syran i materialet, vilket kan ge förhöjda pH-värden. Samtidigt utgör cementen en åtgärd som buffrar materialet.

Se resultat i bilaga 1

5.4. Fuktkammartest (HCT)

För att bestämma hur lång tid det tar för den verkliga försurningen och utlakningen behöver ett *fuktkammartest* (*Humid Chamber Test, HCT*) genomföras. Det är en dynamisk process där materialet får påverkas av vatten och luft på ett laboratorium under lång tid och under kontrollerade former. I lakvattnet kan man analysera olika parametrar som exempelvis metallkoncentrationer samt pH. Den sistnämnda parametern är viktig att följa. Så länge inte surt lakvatten bildas (lågt pH) har materialet en bra buffrande förmåga. Fuktkammartestet är en dyr metod och tar lång tid att utvärdera. Helst bör provet stå minst 20 veckor men gärna längre tid. En tendens kan avläsas efter ca 6-8 veckor.

Tre stenmaterial har tagits ut från tunneln vid Sätra med totalsvavelhalterna (0,43%, 0,71% och 1,09%). Stenmaterialet har krossats och placerats i cylindrar med reglerbar fuktighet. Se figur 2.



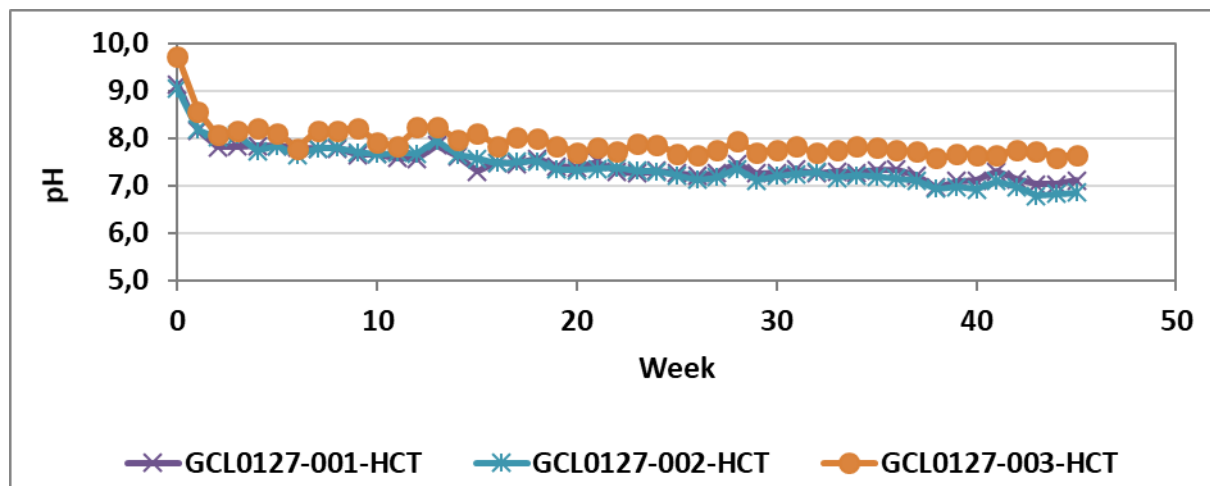
Figur 2. Fuktkammartest (HCT) utfört på prov från Tunnel Söder på laboratorium i Wales.

Surhetsgraden (pH-värdet) i lakvattnet redovisas i figur 3 veckovis. Inga prover uppvisar någon försurande tendens och därmed ingen lakning efter ca 46 veckor från start av försöket. En förklaring till det höga pH-värdet i början kan vara att proverna är kontaminerade med cementrester och sprängrester som sedan sköljs bort under de första veckorna. Totalsvavelhalterna i de tre proven är följande:

GCL0127-001 = 0,71% tot-S (7100ppm)

GCL0127-002 = 0,43% tot-S (4300ppm)

GCL0127-003 = 1,09% tot-S (10900 ppm)



Figur 3. Fukt-kammartest. pH-värdet avsatt mot veckovis provtagning av pH i prov 001 tot-S 0,71%, 002 tot-S 0,43%, 003 tot-S 1,09%. (Källa: Geochemic Ltd – Wales).

5.5. Mineralogiska studier

För att kunna förutsäga om ett bergmaterial kommer att producera surt, neutralt eller basiskt lakvatten och om materialet kommer att mobilisera metaller eller andra ämnen är det nödvändigt att skaffa sig så mycket kunskap som möjligt om dess kemiska sammansättning, mineralogi och textur.

Med optisk mikroskopering identifieras och uppskattas mineral som även förekommer i mindre omfattning och därmed möjliggörs undersökning av mineralens sammansättning och uppbyggnad.

Tunnslip på stenmaterial från tunnelfront vid Tunnel Söder har genomgått mineralogisk-petrografisk analys (s k optisk mikroskopering) vid SGU, Sveriges geologiska undersökning. Resultaten från tunnslipsanalyserna visar att prov från tunneln under Sätra kan beskrivas som en paragnejs (metamorf bergart med sedimentärt ursprung) vilket stämmer bra överens med karterat tunnelberg som visar sedimentär gnejs. I provet förekommer sulfidmineral, främst pyrit.

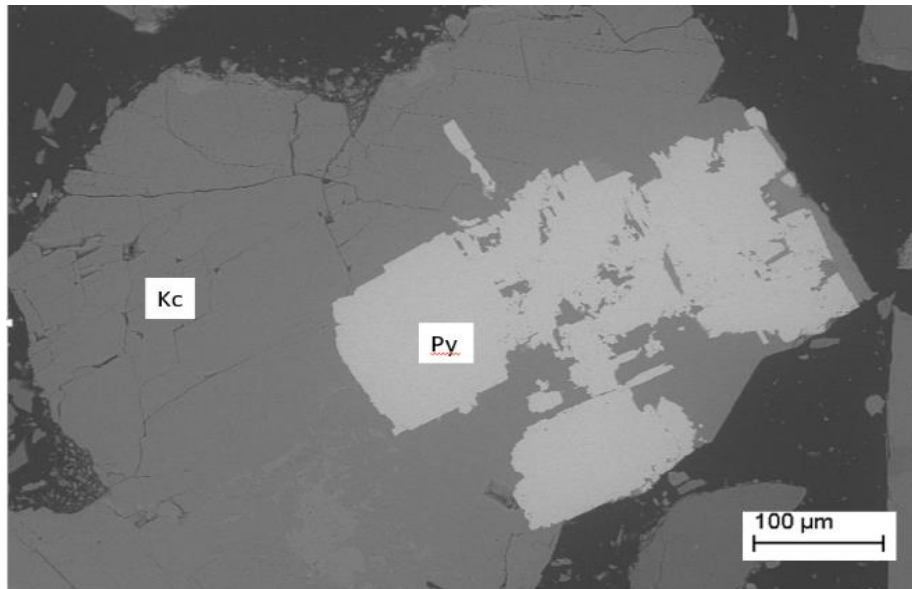
Tunnslipsanalyserna från Tunnel Lovö och Tunnel Norr kan beskrivas som ortognejs (metamorf bergart med magmatiskt ursprung) vilket är samstämmigt med tunnelkarteringen som visar bergarten granitgnejs. I dessa tunnslip förekommer sulfider i varierande mängd men inget av proven innehåller någon större mängd vilket stämmer väl med totalsvavelhalten i proverna. Det är sålunda främst paragnejsen som står för totalsvavelhalterna över 0,5%. Halter inom intervallet 0,1–0,5% totalsvavel återfinns primärt hos ortognejserna.

Alla paragnejser klassas dock inte som potentiellt syrabildande efter att ha genomgått ABA- och NAG-analyser. Att endast utgå ifrån totalsvavelhalter för att klassificera bergmaterial är därmed inte en säker metod.

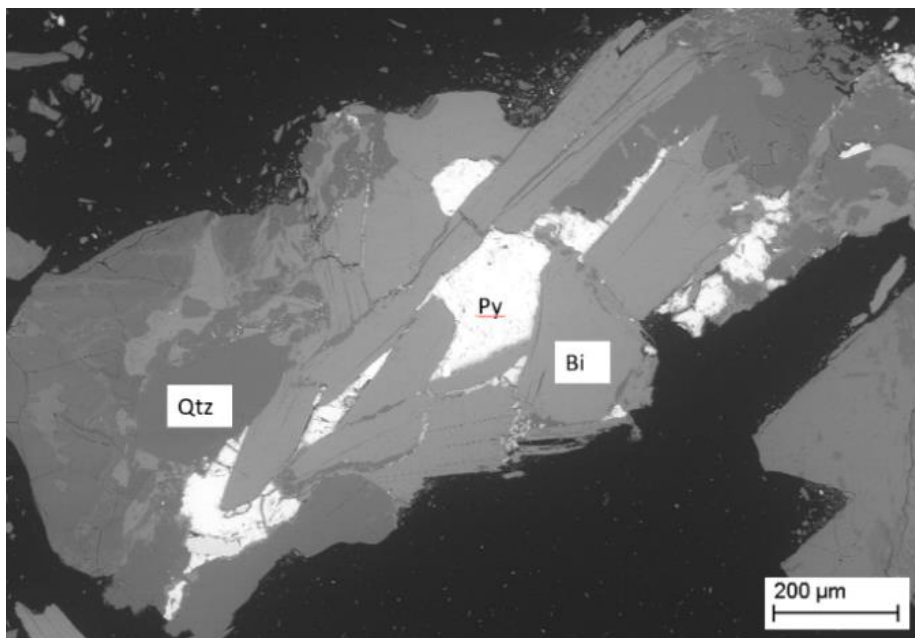
Ortognejserna klassas i samtliga fall (i de fall där ABA- och NAG-analyser utförts) som icke syrabildande. Utifrån detta kan slutsatsen dras att paragnejs är den enda bergarten som

potentiellt kan utgöra risk för syrabildning. Ortognejs kan betraktas som icke syrabildande. Se indelning i tabell A, bilaga 1.

I samarbete med Luleå Tekniska Universitet (LTU) har ett examensarbete dessutom detaljstuderat sulfidmineral i stickprov från bergmaterial från Tunnel Söder i Förbifart Stockholm. På bilderna nedan visas resultat från mineralogiska studier av bergmaterial som analyserats kvalitativt i optiskt mikroskop och kvantitativt i svepelektronmikroskop, SEM (Scanning electron microscope) att pyriten (Py) är omgiven av neutraliserande kalcit (Kc) (fig. 4) och att det även finns neutraliserande silikater (t ex biotit, Bi) som inte analyseras i ABA-testerna (fig. 5).



Figur 4. Mineralen pyrit (Py), FeS_2 , omgiven av neutraliserande mineral kalcit (Kc). (Källa: Lina Lindgren, LTU, juli 2020)



Figur 5. Mineralen pyrit (Py), FeS_2 , omgiven av neutraliserande silikater, kvarts (Qtz) och biotit (Bi). (Källa: Lina Lindgren, LTU, juli 2020).

6 Ytprov 2015 i jämförelse med prov av borrhax 2019-2020

Totalsvavelhalterna på de prover som togs på ytan av SGU 2015 uppvisar en tämligen god överensstämmelse med de borrhaxprover som togs i tunnelfronterna 10-30 meter under ytan, 2019-2020. Detta visar på att en noggrann inledande kartering pekar på var eventuella fördjupade utredningar och provtagningar behöver utföras. Tabell 3 redovisar medelhalten av totalsvavel i jämförelse mellan de två undersökningarna.

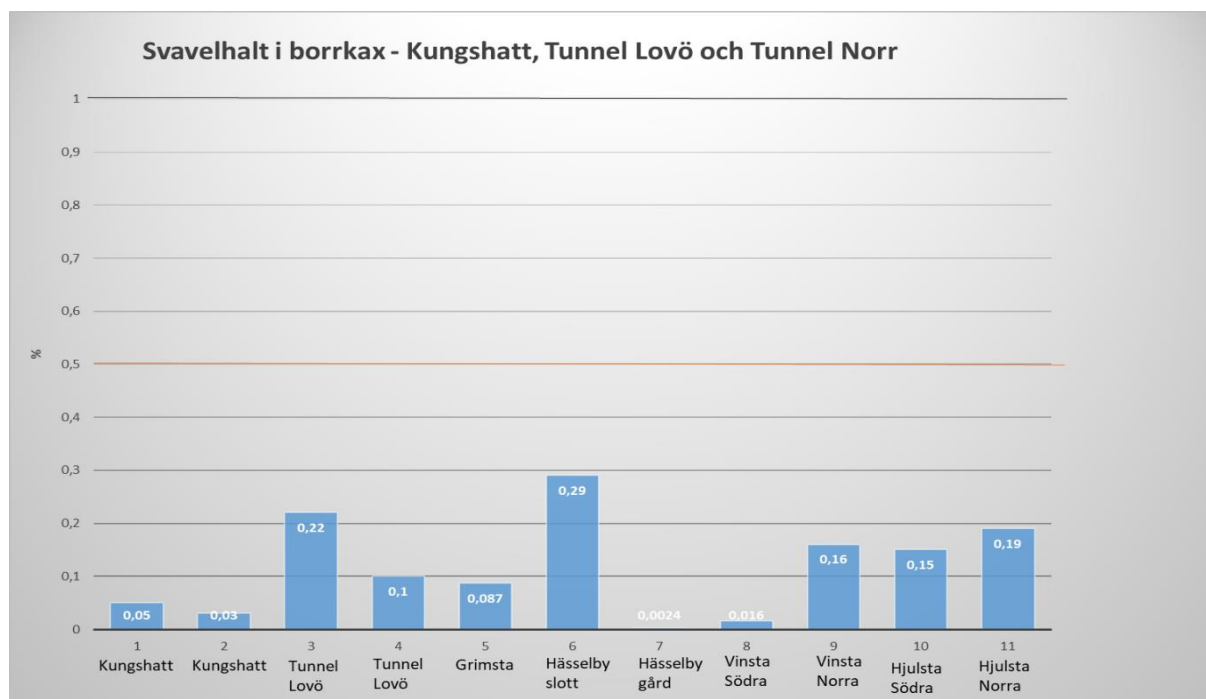
Tabell 3. Medelhalt i % av totalsvavel

Område (Projekt inom E4 Förbifart Stockholm)	SGU 2015 (n=24)*	Borrhax 2019-2020 (n=29)
Norr	0,05	0,12
Lövön	0,034	0,08
Söder	0,94	0,82

*) 4 prov vid Häggvik inte medräknat, ej tunnel. Går inte att jämföra med provtagning 2019-2020.

En geologisk kartering ger sålunda en "områdesindikation" på risk för förhöjd förekomst av sulfidmineral. Sulfidmineralernas exakta lägen och koncentration är dock svårare att fastställa.

Stapeldiagrammet i figur 5 visar ett utdrag av totalsvavelhalterna i några borrhax från tunneln under Kungshatt och norrut. Medelhalten av totalsvavel ligger på ca 0,1%.



Figur 5. Utdrag; Resultat av totalsvavelhalter (%) på borrhaxprover från Kungshatt och norrut.

7 Diskussion om provtagningsmetodik och analysresultat

Genom att bland annat studera berggrundskartor i ett inledande skede går det att förutsäga egenskaperna hos bergmaterialet kopplat till svavelinnehåll. Ortognejserna klassas i samtliga fall (i de fall där ABA- och NAG-analyser utförts) som icke syrabildande. Det kan konstateras utifrån dessa analyser att paragnejsen är den enda bergarten som potentiellt kan utgöra risk för syrabildning men samtidigt visar analyserna att det även här finns undantag.

Oavsett halter av totalsvavel i Förbifart Stockholms bergmaterial har ytterligare undersökningar utförts av alla prover för att skaffa en heltäckande kunskap. Undersökningarna inleddes med statistiska metoder, ABA-tester och NAGpH.

Resultatet av ABA-testerna är tyvärr inte helt tillförlitliga. Beroende på utvärderingsmetod är resultatet direkt motstridigt om man jämför svaren mellan NNP och NPR. Se kap. 5.2. En orsak kan vara att materialet visar hög heterogenitet, både mellan provmaterialen och inom ett material. Det kan konstateras att representativ provtagning är mycket viktigt för att predikteringen ska vara representativ för den bergmassa som tas ut under produktion. Det divergerande resultatet understryker vikten av representativ provtagning under produktion och vid krossning av exempelvis ballastmaterial.

ABA-testerna ger heller inget svar på om materialet på sikt är försurande för omgivningen med eventuell metallutlakning som följd. ABA-testerna tenderar även att underskatta förmågan hos bergmaterialet att neutralisera syran eftersom testet inte omfattas av andra neutraliserande mineral som t ex silikater (biotit) som finns i berget. Silikatvittringen är dock en mycket långsam process och förmågan att neutralisera ska inte överskattas.

NAGpH-test ger kompletterande information om förurningspotentialen men kan tyvärr också ge ett missvisande svar vid analys av bergmaterial där cementinjektering förekommer. Cementen neutraliserar materialet och dess verkliga förurningspotential kan inte bestämmas helt säkert och därmed överskattas den buffrande förmågan.

Fuktkammartest (HCT) är en dynamisk process och speglar bättre den verkliga förurningspotentialen och utlakningen över tid. Tyvärr är metoden dyrbar och resultat för utvärdering tar mycket lång tid varför fuktkammartestet inte passar särskilt bra då tunneldrivningen är i full produktion.

Fuktkammartestet av bergmaterial från Tunnel Söder indikerar att ingen förurning eller utlakning har skett under 46 veckor som materialet utsatts för fukt och syre. En delförklaring till att ingen utlakning skett i fuktkammartestet kan vara att materialet innehåller neutraliserande silikater och att pyriten (järnsulfiden) delvis är omgiven av neutraliserande kalcit. Så kan fallet vara med det prov som har den högsta totalhalten av svavel, samtidigt som pH-värdet har minskat minst av samtliga prov.

En förklaring till det höga pH-värdet i början av fuktkammartestet kan vara att proverna är kontaminerade med cementrester och sprängrester som sedan sköljs bort under de första veckorna.

Utlakning från bergmaterial är beroende av den tillgängliga specifika ytan, dvs den yta som exponeras med vatten och syre. Ju finkornigare material desto större blir den specifika ytan. Provmaterial på laboratorium är mycket finkornigt och analyser utförs under optimala omgivningsförhållanden för urlakning. Det medför att provanalyserna bedöms ha ett viktat resultat mot högre urlakningskapacitet och således högre förurningspotential jämfört med grövre material som används inom bygg- och anläggningsbranschen.

8 Utvärdering och slutsatser

Analyserna av bergmaterialet från Förbifart Stockholm visar att neutraliserande mineral dominerar. Med all säkerhet finns bra buffrande och neutraliserande förmåga på

bergmaterial på sträckan från och med Kungshatt via Lovön, Hässelby/Vinsta, Hjulsta, Akalla och fram till Häggvik, vilket omfattar merparten av allt berg i Förbifart Stockholm. Tunnelberget visar också i dessa områden på bergarten ortognejs som inte är syraproducerande (se bilaga 1). Det hade varit tillräckligt med inledande geologisk kartering kompletterat med analys på totalsvavel i vissa områden för att bekräfta sammansättningen av bergarterna.

Vid totalsvavelhalter omkring 0,5% och upp mot 1% visar ABA-testerna osäker zon eller syraproducerande resultat beroende på om utvärdering sker med NPR eller NNP.

Totalsvavelhalter över 1% (3 av 29 prover) visar på potentiellt försurande ämnen både vid utvärdering av NNP och NPR. Tunnelberget visar här på bergarten paragnejs som kan vara syraproducerande. Se bilaga 1.

De fuktkammartester, som bättre motsvarar lakning över tid vad gäller risken för försurning, har utförts på material från Tunnel Söder med totalsvavelhalterna (0,43%, 0,71% och 1,09%). Resultatet från dessa tester uppvisar ingen försurning och inte heller utlakning av metaller.

De slutsatser som kan dras är följande:

- Inledningsvis måste alltid geologisk kartering utföras. Den geologiska karteringen får styra vilka analyser som ska utföras.
- I identifierade områden med sulfidförande bergarter (t ex paragnejs) tas prov på halten av totalsvavel med ytprov. Halten i bergmaterialet kan sedan ge en indikation på om kompletterande undersökningar ska utföras t ex uttag av borrhärdar.
- Kompletterande analyser utförs med de tillgängliga tester som vi har idag dvs ABA och NAGpH-tester. I tidiga skeden av projektet, bör fuktkammartest och optisk mikroskopering genomföras vilket ger en säkrare utvärdering av typ av bergmaterial och därmed egenskaperna.
- Fuktkammartest och optisk mikroskopering bör då genomföras på berg med svavelhalter över 1% för att få ett bättre beslutsunderlag för eventuella åtgärder. Vid osäker prediktion på berget kan dessa tester även behöva utföras på berg med svavelhalter under 1% för att få en säkrare hantering.

Att enbart klassa berget på totalsvavelhalten för hantering och eventuella åtgärder är ingen säker metod.

9 E4 Förbifart Stockholm; Förutsättningar vid hantering av bergmassor

9.1. Klassning enligt Mark- och Miljödomstolen

Förbifart Stockholms bergmassor utgör inte ett avfall utan klassas som biprodukt enligt miljödom i Mark- och miljödomstolen, 2014-12-17, Mål nr M 3346-11.

”De bergmassor som inte används inom projektet utgör en biprodukt enligt 15 kap. 1 § andra stycket miljöbalken och att de därmed inte utgör avfall.”

Domstolen anger följande skäl till sitt ställningstagande:

- Bergmassorna ska användas i andra bygg- och anläggningsprojekt.
- Bergmassorna kan användas direkt utan någon annan bearbetning än den bearbetning som är normal i industriell praxis.
- Bergmassorna kommer att fortsätta att användas på ett sätt som är hälso- och miljömässigt godtagbart och som inte strider mot lag eller annan författning.

9.2. Inriktning vid hantering av bergmassor

Förbifart Stockholms inställning för att hantera berget har utgjorts av nedanstående punkter:

- Uttaget bergmaterial är en resurs.
- Huvudsaklig inriktning: Allt berg ska återanvändas.
- Deponering ska undvikas.
- Om berg med förhöjda svavelhalter identifieras och påträffas ska en riskvärdering göras. Om den sammansatta mineralogin utgör en risk:
 - Finns det användningsområden utan förbättringsåtgärder där det kan användas.
 - Finns det användningsområden där bergmaterialet kan användas efter förbättringsåtgärder.

10 E4 Förbifart Stockholm; Hantering av bergmassor

Med den erfarenhet och kunskap som erhållits genom provtagning och analyser av bergmassorna på Förbifart Stockholm konstateras att bergmassorna inte ger upphov till surt lakvatten. Det gäller först och främst bergmassor från och med Kungshatt och norrut, som till stor del består av den icke-försurande bergarten ortognejs. Det innebär att dessa massor kan hanteras och har hanterats som vanligt utan åtgärder före användning.

Vid totalsvavelhalter på bergmassor upp till 1% med bergarten paragnejs, dvs söder om Kungshatt och söderut mot Skärholmen, har Förbifart Stockholm utfört kompletterande provtagning med fuktkammartest samt mineralogiska studier. Dessa bergmassor bedöms efter analysvaren kunna användas utan åtgärder t ex som ballast i vägbyggen under förutsättning att massorna också uppfyller de tekniska kraven¹⁰.

Bergmassor med svavelhalter över 1% bör enligt försiktighetsprincipen hanteras med förbättringsåtgärder eller begränsas i användningen såvida inte utvärderingen av dynamiska tester t ex fuktkammartest och mineralogiska analyser visar på annat, vilket bergmassorna från Förbifart Stockholm gjorde.

De förbättringsåtgärder som kan vara aktuella är att avskilja finmaterialet vid krossning på mottagningsanläggningen och hantera detta för sig. Berg med låg svavelhalt och bra buffrande förmåga eller annat neutraliserande material kan därefter tillsättas. Massorna kan därefter användas som vanligt. I berg från tunnlarna kan också noteras att det redan finns neutraliserande förmåga i och med att en stor andel cement från injekteringen följer med bergmassorna vid utlastning.

Förbifart Stockholm har sålt bergmassorna från tunnlarna till olika entreprenörer och levererat materialet till deras krossanläggningar. Losshållet berg på ytentreprenaderna, som är totalentreprenader, har tillfallit berörda entreprenörer enligt kontrakt.

Cirka 84% (nov. 2021) av allt tunnelberg på Förbifart Stockholm är utsprängt och har transporterats till olika mottagningsanläggningar i regionen. Allt berg söder om Kungshatt till Skärholmen är uttaget och hanterat på krossanläggning för vidare användning i olika byggprojekt. Merparten av kvarstående tunnelberg att spränga ut återfinns på Lovön. Inget berg från Förbifart Stockholm har förorsakat försurning och utlakning av metaller i närmiljön.

¹⁰ SS-EN13242. Ballast för obundna och hydrauliskt bundna material till väg och anläggningsbyggande

11 Forskning och utveckling

För att få en vetenskaplig bakgrund till de metoder som använts har Förbifart Stockholm i samarbete med Luleå Tekniska Universitet (LTU) detaljstuderat sulfidmineral i stickprov från bergmaterial från Tunnel Söder. Detta har resulterat i ett ex-jobb av civ.ing. Lina Lindgren i juli 2020 med titeln: *"Utvärdering av predikteringsmetoder för sulfidförande berg med fokus på berg som används i konstruktioner"*.

I detta examensarbete har 10 bergmaterial från Tunnel Söder studerats med syfte att undersöka och diskutera olika predikteringsmetoder (t ex ABA-test) och hur dessa kan tillämpas och tolkas för sulfidförande berg. Resultatet visar att de ger mycket osäkra bedömningar av det studerade materialet.

Utvärderingen i rapporten kan sammanfattas med följande ord:

"Det finns behov att vidare undersöka vad det är som gör att predikteringsmetoderna ger det resultat de ger och vidare hur detta kan tolkas. Statiska predikteringstester visar inte heller någon tidsaspekt som är viktigt att betrakta vid prediktering av material. Kinetiska test (dynamiska), som fuktkammartest visar hur utlakningen varierar med tiden."

"Hur provtagningen av materialet utförs har också en stor påverkan på resultatet, det är därför viktigt att fortsatt utreda hur en representativ provtagning kan utföras, och hur olika provtagningsmetoder påverkar analysresultaten."

"Genom att kombinera information om den mineralogiska sammansättningen, som kan fastställas under en kortare tidsperiod, med kunskap om mineralens reaktivitet i en specifik miljö, styrande parametrar för sulfidoxidation och neutraliserande mineral kan utlakningssammansättningen predikteras".

"Det är viktigt att undersöka vad som faktiskt kommer lakas ut från bergmaterialet snarare än vad som finns i bergmaterialet, då det är utlakningen som kommer medföra riskerna. Detta kan bland annat göras genom kinetiska (dynamiska) laktester och modellering."

"Vid prediktering är det viktigt att beakta tidsaspekten, detta kommer påverka vilka analysmetoder som kan tillämpas och omfattningen av predikteringen."

Bergmaterial från Tunnel Söder har undersökts med avseende på den mineralogiska sammansättningen och genom dynamiska tester som beaktar tidsaspekten. Resultatet har presenterats tidigare i denna rapport och vi kan konstatera att ingen förurning eller utlakning skett över tid.

Det som saknas för bygg- och anläggningsbranschen är tillförlitliga och snabba predikteringsmetoder som också är anpassade för den verksamhet som bedrivs. Trafikverket har därför startat en serie forsknings- och innovationsprojekt (FoI) för att utveckla predikteringsmetoder och användbara redskap i alla faser från planering till produktion. Bland annat har två doktorandprojekt startat i samarbete med Luleå Tekniska Universitet som ska bidra till att fylla kunskapsluckorna om prediktering av sulfidförande bergmaterials möjliga miljöpåverkan/omgivningspåverkan.

12 Källa

- AMIRA (2002). ARD Test Handbook, Project P387A Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage. AMIRA International Limited, May 2002.
- Dold, B. (2017). Acid rock drainage prediction: A critical review. Journal of Geochemical Exploration, 172, 120–132.
- Förbifart Stockholm – Bergartsgeokemi. En bergartsgeokemisk undersökning av de dominerande bergarterna utefter Förbifart Stockholms sträckning - Anders Hallberg, Torbjörn Bergman, Sveriges geologiska undersökning, Uppsala augusti 2015, SGU Dnr 35-1875/2014.

- PM Hantering av sulfidmineraliseringar i infrastruktur projekt – Inledande försök med provtagningsmetodik av borrhax i byggfasen - Magnus Hallberg, TRV, Fredrik Nylén, TRV, Karl-Johan Lorents, TRV, 2020-04-14.
- SS-EN 15875:2011 Karaktärisering av avfall – Statisk test för bestämning av syrabildnings- och neutraliseringspotential i sulfidhaltigt avfall.
- Utvärdering av predikteringsmetoder för sulfidförande berg med fokus på berg som används i konstruktioner – Examensarbete av Lina Lindgren, Civilingenjör, Naturresursteknik, Luleå tekniska universitet (LTU), juli 2020.

<http://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1454481/FULLTEXT02.pdf>

Bilaga 1

Provtagning och analyser har utförts av AFRY på uppdrag av Trafikverket, Förbifart Stockholm.

Tabell A. Sammanställning av analyser av totalsvavel, ABA-tester, NAGpH samt bergartskartering.

N = Norr, L = Lovö, K = Kungshatt, S = Söder

			Totalsvavel				ABA			NAG	ABA
			Analys, metod			Medel**					
			Sweco*	ALS	ALS						
Prov ID	DP	Bergart	%	S-IR08	ME-MS61	S	NP	AP***	NPR	NAGpH	NNP
S401N	N	Granit omvandlad		0,02	0,03	0,03	6,00	0,30	17,60	7,8	5
504S	N	Ortognejs		0,17	0,18	0,18	9,00	4,10	2,22	8,4	5
S402N	N	Ortognejs		0,35	0,36	0,36	12,00	10,00	1,18	7,1	2
505S	N	Ortognejs		0,02	0,03	0,03	9,00	0,3	56,67	7,8	8
J401S	N	Ortognejs		0,01	0,02	0,02	17,00	0,3	115,33	8,2	17
1N	N	Omvandlad granit	0,0024			0,002	-	-	-	-	
2N	N	Ortognejs?	0,15			0,15	-	-	-	-	
3N	N	Ortognejs	0,16			0,16	-	-	-	-	
4N	N	Ortognejs (epsyenit?)	0,19			0,19	-	-	-	-	
5N	N	Ortognejs	0,29			0,29	-	-	-	-	
6N	N	Ortognejs (meta-granitoid	0,087			0,09	-	-	-	-	
7N	N	Ortognejs, pegmatit	0,016			0,02	-	-	-	-	
372-001	L	Ortognejs		0,13	0,13	0,13	9,00	3,40	2,71	8,3	6
302-001	L			0,03	0,04	0,04	14,00	0,3	92,00	8,5	14
303-001	L			0,01	0,02	0,02	10,00	0,3	65,33	9,1	10
301-001	L	Syenit?		0,01	0,02	0,02	16,00	0,3	103,33	9,1	15
313-01	L			0,22	0,21	0,22	8,00	5,90	1,30	6,4	2
312-01	L	Ortognejs		0,1	0,13	0,12	4,00	2,50	1,70	8,2	2
201 N	K	Ortognejs		0,05	0,03	0,04	5,00	1,60	2,90	8,6	3
202 N	K			0,03	0,03	0,03	4,00	0,30	12,80	8,0	4
Prov 1	S	Ortognejs	0,35	0,29		0,32	4,00	7,50	0,50	-	-4
Prov 2	S	Paragnejs (mylonit)	1,3	1,38		1,34	4,00	40,60	0,10	-	-37
Prov 3	S	Paragnejs (grafit)	0,83	1,25		1,04	10,00	36,30	0,30	-	-27
Prov 4	S	Paragnejs (grafit)	0,75	0,57		0,66	6,00	15,90	0,40	-	-10
Prov 5	S	Paragnejs	2,4	1,86		2,13	7,00	55,60	0,10	-	-49
Prov 6	S	Paragnejs (grafit)	0,59	0,54		0,57	4,00	15,30	0,20	-	-12
Prov 7	S	Granit, kraftigt omvandlad	0,078	0,11		0,09	27,00	2,20	12,50	-	25
202N	S	Paragnejs		0,43	0,43	0,43	44,00	10,60	4,09	11,2	33
213N	S	Paragnejs		0,99	0,89	0,94	22,00	29,40	0,76	7,6	-7

Trafikverket, Sundbyberg. Besöksadress: Esplanaden 3A.
Telefon: 0771-921 921, Texttelefon: 020-600 650
www.trafikverket.se