

NMÍ 21-01

Greining á innri gerð slitlaga með X-ray tomography

Mars 2021



Nýsköpunarmiðstöð
Íslands



Contents

Myndaskrá.....	i
Inngangur	1
3D X-ray computer tomography - þrívíddarskanni.....	2
Tvívíð greining	3
Þrívíðar greiningar	4
Sýni C-1-7.....	5
Sýni C-1-8.....	5
Sýni C-1-22.....	5
Sýni H3-14.....	6
Greiningar.....	6
Tvívíð myndgreining	6
Þrívíð myndgreining	7
Sýni C-1-7.....	7
Sýni C-1-8.....	9
Sýni C-1-22.....	11
Sýni H3-14.....	14
Niðurstöður	15
Þakkarorð	16

Myndaskrá

Mynd 1. Sýni KJ2-20. Sýnið er um 2 x 5 cm.	3
Mynd 2 a og b. Sýni KJ2-20, myndgreining með MultiSpecWin64.....	4
Mynd 3. Sneiðmynd af malbikssýni sem útbúið var á NMÍ. Sýnið er um 1,2 cm á breidd.	4
Mynd 4. Sýni C-1-7. Kjarni sem er um 24 mm í þvermál og 35 mm á lengd.	5
Mynd 5. Sýni C-1-8. Kjarni sem er 54 mm í þvermál og 54 mm á lengd.	5
Mynd 6. Sýni C-1-22. Kjarni sem er um 45 mm í þvermál og 28 mm á lengd.	6
Mynd 7. Sýni H3-14. Kjarni sem er um 24 mm í þvermál og 36 mm á lengd.	6
Mynd 8. C-1-22. Sneiðmynd frá 3D greiningu..	7
Mynd 9. Sneiðmynd af sýni C-1-7.....	8
Mynd 10. Þrívíddarlíkan af sýni C-1-7 þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni.	9
Mynd 11. Sneiðmynd af sýni C-1-8. Upplausnin í greiningunni var 0.042 mm/voxel.	10
Mynd 12. Þrívíddarlíkan af sýni C-1-8 þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni.	10
Mynd 13. Sneiðmynd af sýni C-1-22. Þegar sýnið var borað afmyndaðist yfirborð sýnisins aðeins. Upplausnin í greiningunni var 0.041 mm/voxel. Skalinn á myndinni er 7 mm langur.	11
Mynd 14. Þrívíddarlíkan af sýni C-1-22 þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni.	12
Mynd 15. Sneiðmyndaröð af sýni C-1-22.	13
Mynd 16. Sneiðmynd af sýni H3-14. Upplausnin í greiningunni var 0.014 mm/voxel.	14
Mynd 17. Þrívíddarlíkan af sýni H3-14 þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni.	15



SKÝRSLA

Skýrsla nr: NMÍ 21-01

Dreifing:

Opin Lokuð Unnið fyrir:
Vegagerðina

Tengiliður verkkaupa:

Birkir Hrafn Jóakimsson/

Ólafur Sveinn Haraldsson

Heiti skýrslu: Greining á innri gerð slitlaga með X-ray tomography – fyrri áfangi	Útgáfutími: Mars 2021
Höfundur/-ar: Gísli Guðmundsson	Fjöldi síða: 16 bls.
Deild: Rb við Nýsköpunarmiðstöð Íslands	Verkefnastjóri: GG

Úrdráttur:

Alls voru fjögur sýni keyrð í þrívíddarskannanum og þar að auki eitt sýni greint með tvívíðri greiningu. Öll sýnin eru raunveruleg malbikssýni. Holrýmishluti þessara fjögurra malbikssýna var fundin með þrívíddargreiningu. Ekki er markmið þessa verkefnis að fjalla efnislega um niðurstöður greininganna, en þess má geta að holrýmishluti allra sýnanna reyndist frekar lágur eða á bilinu 0,11 til 0,24 %. Tvívíð greining á sambærilegu malbiksýni, gaf einnig lága holrým eða 0,2 %.

Þrívíðar sem og tvívíðar greiningar eins fjallað hefur verið um í þessari skýrslu eru aðeins framkvæmanlegar, eða a.m.k. töluvert auðveldari, á sýnum með þéttu fylliefni, þ.e. fylliefni með engu holrými. Malbik eins og það fjallað er um í þessari rannsókn er nánast undantekningarlaust gert úr þéttu, erlendu fylliefni. Íslenskt fylliefni með tiltölulega hátt holrýmishlutfall.

Næstu skrefum verkefnisins verða meta upplausn greininga á mismunandi stórum sýnum til þess að kanna hvort raunhæft sé að greina magn bindiefnis í malbiki. Þyngdarhluti bindiefnis er vanalega aðeins um 5 til 7 % og því þarf mikla upplausn í greiningum til þess að greina á milli bindiefnis og fylliefna. Greiningum á öðrum þáttum eins og aflögun malbiks, fasaskilssvæði og trefjum í malbiki verður haldið áfram.

3 lykilorð: Á íslensku

Á ensku

Malbik	Asphalt
Tvívíð myndgreining	Image analysis
Þrívíð myndgreining	3D X-ray tomography

Inngangur

Þrívíð greining á innri gerð malbiks eins og þetta verkefni byggist á, grundvallast á tækni þar sem hægt er að greina innri uppbyggingu efna eins og malbiks. Sambærilegar rannsóknir hafa ekki verið gerðar hér á landi, en erlendis eru slíkar rannsóknir nokkuð algengar, einkum í seinni tíð. Tæknin er tiltölulega ný af nálinni og er enn í þróun. Erlendar rannsóknir hafa sýnt fram á notagildi hennar, bæði á rannsóknarstofusýnum sem og raunverulegum sýnum af malbiki. Þessar rannsóknir geta veitt margs konar upplýsingar, svo sem um loftmagn og loftdreifingu í sýnum, innri örsprungur, áhrif íblöndunarefna á innri gerð, áhrif hitastigs á pökkun/þéttleika, dreifingu trefja, samband innri gerðar og endingar svo og sprungumyndun í tilraunastofusýnum í álagsprófunum, svo helstu dæmi séu nefnd um rannsóknir sem hafa verið gerðar erlendis á undanförunum árum.

Margar aðferðir eru í boði til að rannsaka innri gerð sýna og flestar þeirra byggjast á að brjóta upp viðkomandi sýni (e. destructive test method). 3D X-ray tomography eða þrívíð greining er aðferð sem hægt er að beita til þess að kanna innri gerð sýna án þess að spilla sýninu á nokkurn hátt. Þótt X-ray tomography greining hafi ekki áhrif á eiginleika viðkomandi sýnis, þá þarf að taka sýni af viðfangsefninu og fara með það í rannsóknarstofu til þess að rannsaka það með X-ray tomography.

X-tomography er vel þekkt aðferð og hefur verið mikið nýtt. Notkun og notagildi X-ray tomography í rannsóknum á innri gerð efna eins og t.d. malbiks er vannýttur og vanmetinn möguleiki. Þróun hugbúnaðar á undanförunum áratug hefur verið mikil sem gerir kleift að vinna með stór gagnasöfn og upplausn greininga hefur stórbatnað.

Innri gerð malbiks hefur afar lítið verið rannsökuð hér á landi. Mögulegt er að rannsaka innri gerð steinsteypu með smásjá, hvort heldur með víðsjá (5 til 50 x stækkun) eða bergfræðismásjá (30 til 600 x stækkun) eða í mun meiri stækkun í rafeindasmásjá og með möguleika á efnagreiningum. Þessum rannsóknaraðferðum hefur ekki verið beitt að neinu ráði hér á landi. Erfitt er að útbúa sýni til þess að skoða malbik í ljóssmásjá og því hefur, svo höfundur viti til, engri smásjárgreiningu verið beitt við skemmdagreiningu á malbiki hér á landi. Svo dæmi sé tekið er tiltölulega auðvelt að framkvæma slíka greiningu á steinsteypu. Slík greining eru þó aðeins framkvæmanleg á tiltölulega afmörkuðum sýnum í tvívíðu rúmi. Tiltölulega erfitt er að útbúa sýni af malbiki fyrir slíka greiningu. Þess má þó geta að höfundur þessarar skýrslu gerði forathugun á innri gerð malbikssýna með smásjárgreiningu fyrir 25 árum síðan¹. Niðurstöður hennar voru þær að gerlegt sé að útbúa sýni fyrir smásjárgreiningu ef ákveðnu verklagi er fylgt. Smásjárgreiningu á malbikssýni með bergfræðismásjá er síðan hægt að gera á sambærilegan hátt og smásjárgreiningu á steinsteypu.

Algengt er að skemmdir sem myndast í malbiki byrja með því að sprungur myndast í malbiki, vatn nær að þrengja sér inn í sprungurnar og þegar það frýs þenst það út og veldur skaða, sem smátt og smátt skemmir malbikið. Sprungumyndun í malbiki er auðvelt að greina með X-ray tomography og því væri á tiltölulega auðveldan hátt hægt að fylgjast með því hvort sprungumyndun í malbiki sé að nálgast hættumörk.

Markmið verkefnisins er tvískipt: annars vegar að ná fullu valdi á tækninni sem þarf að beita, og hins vegar að kanna hagnýtt notagildi mæliaðferðarinnar (3D X-ray computer tomography) á sýnum af malbiksslitlögum. Til þess að ná settum markmiðum verður innri gerð malbikssýna rannsökuð, þ.e. samsetning þeirra sem og greining og mat á skemmdaferlum eins og sprungumyndun og ástand á bindingi (fasaskilssvæði) milli fylliefna og bindiefnis. Einnig verður unnt að kanna aðra þætti sem tengjast ekki sprungumyndun beint, eins og t.d. aflögun malbiks undir álagi (skrið), dreifingu á fínefni,

¹ Gísli Guðmundsson, 1997. Innri gerð slitlaga – smásjárgreining – lokaskýrsla. BUSL E-18, 13 bls.



viðloðun milli fylliefnis og biks, viðloðun milli nýs og gamals malbiks, íblöndun steinefna í malbik, og svo mætti leng telja. Sem dæmi um önnur atriði sem mætti skoða er hvernig yfirborð malbiks slitnar undan mismunandi dekkjategundum. Þessu tengt mætti einnig bera saman hvernig yfirborð malbiks slitnar að sumarlagi og að vetrarlagi, þ.e.a.s. annars vegar þegar sumardekk eru í notkun og hins vegar þegar nagladekk eru í notkun.

Malbik er blanda, aðallega af þremur þáttum, fylliefni/steinefni (93-95 %), bindiefni/bik (5-7 %) (hvorttveggja þyngdarhlutföll) og holrými/lofti (1-3 %) (rúmmálshlutfall), auk íauka eins og t.d. trefja. Góð viðloðun milli fylliefna og biks er lykilatriði fyrir malbiksgerð. Þegar malbik er hannað og fylliefni valin til malbiksgerðar er viðloðunin eitt lykilatriði sem skoðað er. Trefjar sem íaukar eru notaðir til að hindra aðskilnað milli biks og fylliefna í heitu malbiki. Viðloðunarefni eru notuð til að styrkja viðloðun milli biks og fylliefna. Nauðsynlegt er að malbik innihaldi ákveðið loftmagn eða holrými. Um þessa eiginleika er hægt að afla upplýsinga með hjálp X-ray computer tomography. Í þessum áfanga var aðaláherslan lögð á að ná fullu valdi á tækninni.

Verkið hefur ekki gengið áfallalaust því tækið var bilað stóran hluta styrktímabilsins. Gert var við tækið þegar bilanir komu upp, en bilanirnar hafa verið margþættar og erfiðar. Enn er ekki búið að gera endanlega við tækið, sem er ónothæft sem stendur. Nú er gert ráð fyrir að tækið verði komið í fullt gagn um miðjan mars 2021.

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá

3D X-ray computer tomography - þrívíddarskanni

X-ray computer tomography eða þrívíddarskanni er tækni þar sem hægt er að greina mismunandi fasa og uppbyggingu þeirra í föstum sýnum eins og t.d. malbiki. Með því að skanna sýni er hægt að endurgera í tölvu þrívíddarlíkan af uppbyggingu viðkomandi sýna. Aðferðin byggir á því að sýni er komið fyrir í sýnisklefa og sýnið er skannað með háorkugeislun í 360 gráður yfir endilangt sýnið. Nema nema síðan endurkast geislunarinnar og út frá mismunandi gleypni mismunandi efnisþátta er byggð upp mynd af sýninu. Röðum af tvívíðum myndum (sneiðmyndum) er safnað og úr þeim er gert þrívíddarlíkan af yfirborði og innri byggingu viðkomandi sýnis. Líkanið er byggt upp af þrívíðum gráskala pixelum, (voxels) þar sem gráskalagildi hverrar einingar ræðst af rúmpýngd og massatölu viðkomandi efnis.

Með þrívíddargreiningu á innri byggingu malbiks opnast möguleiki á að greina samsetningu viðkomandi sýnis, þ.e. hlutfallslegt magn fylliefna, biks og lofts. Einnig er mögulegt að kanna innri gerð bindiefna, holrýmnd sem loftbólur (magn, lögun og dreifingu), sprungur og sprungumyndun (míkrósprungur - makrósprungur), viðloðun milli bindiefna og fylliefna (fasaskilsvæði) og magn og dreifingu trefja. Þannig er hægt að afla upplýsinga og auka þekkingu um þessi efni og innbyrðis samspil þeirra. Auk þess er mögulegt að kanna áhrif innri gerðar efnisins á hina ýmsu efniseiginleika slitlaganna. Sé sýni tekið af bindingi við neðri lög, hvort heldur er um malbik eða steinsteypu að ræða, er hægt að greina á sýnd viðloðunarinnar milli þessara tveggja mismunandi laga.

Sambærilegar rannsóknir hafa ekki verið gerðar hér á landi. Það stafar af því að tækni er tiltölulega ný af nálinni og er enn í þróun. Þó hefur 3D computer tomography tæki verið til staðar á NMÍ í töluverðan tíma. Erlendar rannsóknir hafa sýnt fram á notagildi tækninnar á bæði rannsóknarstofusýnum sem og raunverulegum sýnum af malbiki og slíkar rannsóknir og/eða rútinumælingar eru nokkuð algengar, einkum á síðasta áratug, eftir verulega þróun á hugbúnaði. Þetta eru rannsóknir/mælingar á loftmagni og loftdreifingu í sýnum, innri örsprungum, áhrifum íblöndunarefna á innri gerð, áhrifum hitastigs á



pökkun/þéttleika, dreifingu trefja, samband á milli innri gerðar og endingar, sprungumyndun í tilraunastofusýnum í álagsprófunum, svo helstu dæmi séu nefnd um rannsóknir sem hafa verið gerðar erlendis á undanförunum árum.

Næmni greiningarinnar er háð sýnastærðinni og þéttleika sýnisins, en einnig greiningartímanum. Best er að hafa sýnið sem minnst. Forathuganir á NMÍ á malbikskjarna með um 3 cm þvermál og um 2-3 cm lengd gáfu mjög góðar niðurstöður. Raunhæft ætti að vera að greina kjarna með 5 cm þvermál. Sýnalengdin er ekki eins takmarkandi þáttur eins og þvermálið, en þó þarf sýnið að rúmast inn í sýnaklefann. Í þessari rannsókn er miðað við að lengd sýna sé ekki meiri en um 6 cm.

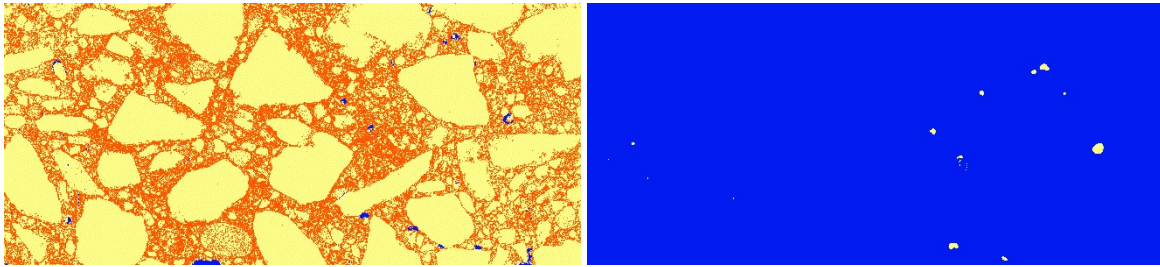
Tvívíð greining

Í tengslum við þennan áfanga var ákveðið að gera myndgreiningu sambærilega smásjárgreiningu á malbikssýni. Í stað þess að vinna með myndir teknar í smásjá við 32 til 200x stækkun, var sýni skannað með hágæðamyndskanna. Malbiksýnið, KJ2-20, var fengið hjá Vegagerðinni. Hluti sýnisins var unninn niður og um 2 x 5 cm stórt sýni var skannað. Á Mynd 1 má sjá þann hluta af sýninu sem unnið var með. Upplausn myndarinnar sem unnið var með er 0.0033 mm/px sem er tiltölulega mikil upplausn og um 10 sinnum meiri upplausn en fæst með 3D tomography tækinu, sjá síðar. Hægt er að fá töluvert meiri upplausn með smásjárgreiningu, en það kallar á mun meiri undirbúningsvinnu bæði í meðhöndlun sýnis og við myndgreiningu.



Mynd 1. Sýni KJ2-20. Sýnið er um 2 x 5 cm.

Myndin var síðan meðhöndluð með myndgreini og forritinu MultiSpecWIN64. Á Mynd 2a má sjá afrakstur myndgreiningar þar sem reynt var að aðskilja fylliefni, bik og loft. Erfitt reyndist að greina á milli fylliefna og bika. Auðveldara reyndist flokka bik og fylliefni saman og greina síðan loftmagnið frá biki og fylliefni, sjá Mynd 2b. Í sneiðinni reyndist loftmagnið vera 0,2 %.



a. Niðurstöður af myndgreiningu á sýni sem sýnt er á mynd1, þar sem reynt hefur verið að gera greinarmun á fylliefni (gult), biki (appelsínugult) og holrými (blátt)

b. Niðurstöður af myndgreiningu á sýni sem sýnt er á mynd 1, þar sem holrými hefur verið aðskilið frá fylliefni og bik

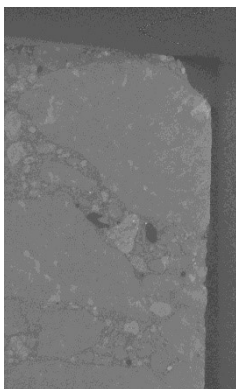
Mynd 2 a og b. Sýni KJ2-20, myndgreining með MultiSpecWin64.

Svo framarlega sem holrýmishluti fylliefna sé lágur, þannig að holrými í fylliefnum hafi ekki áhrif á niðurstöður greiningarinnar, er tiltölulega fljótlegt að greina loftmagn í malbikssýnum í tvívíðu plani. Slíkt sýni þarf tiltölulega litla meðhöndlun. Sýnið er sagað niður í hæfilega stærð (innan við 10 x 10 cm) og a.m.k. um 1 cm á þykkt. Yfirborðið sem á að skanna, þarf að slípa í áföngum með stigvaxandi fínleika á slípimassa.

Þrívíðar greiningar

Erfiðlega gekk að útbúa óskemmd malbikssýni til greiningar. Í þessari rannsókn var miðað við að öll sýni sem unnið væri með væru borkjarnar, en í sjálfu sér er það ekki nauðsynlegt greiningarinnar vegna. Malbik er viðkvæmt, ef það ofhitnar getur það aflagast sem getur haft áhrif á innri gerð sýnisins. Æskilegast er að taka nógu stór sýni, a.m.k. 5 cm í þvermál, svo hægt sé að bora kjarnana með vatnskældum kjarnabor. Þar sem sýnastærðin hefur áhrif á gæði greininganna og engin reynsla er af þrívíðum malbiksgreiningum var byrjað með tiltölulega litla kjarna eða um 24 mm í þvermál. Kjarnarnir voru boraðir í súluborvél með loftkældum demantsbor. Nokkurn tíma tók til að finna heppilegustu útfærslu af verklagi og tegund af bor. Þegar réttu verklagi var náð voru þrjú kjarnar boraðir með 24 mm bor. Síðan var einn kjarni með 45 mm þvermál boraður með sama verklagi. Sýnið ofhitnaði og yfirborð þess aflagaðist aðeins. Að lokum var einn kjarni boraður með 54 mm þvermáli og vatnskælingu.

Byrjað var á því að forprófa malbikssýni sem var útbúið á NMÍ, sjá Mynd 3. Sýnið var borkjarni með 2,4 cm þvermál og um 2.1 cm á lengd. Þrívíð myndgreining var aðeins keyrð á ¼ hluta sýnisins. Markmið með keyrslunni var til að fá tilfinningu fyrir tækinu og þeim möguleikum sem eru í boði. Engar eiginlegar greiningar voru gerðar á gögnunum.



Mynd 3. Sneiðmynd af malbikssýni sem útbúið var á NMÍ. Sýnið er um 1,2 cm á breidd.



Fjögur malbikssýni voru síðan rannsökuð með þrívíddarskannanum, sýni C-1-7, C-1-8, C-1-22 og H3-14. Sýnin voru fengin hjá Vegagerðinni, og voru borkjarnar úr nýlögðu malbiki. Öll sýnin voru boruð úr sama vegakaflanum þar sem kröfur um holrýmd malbiks voru ekki uppfylltar. Kjarnarnir voru 10 cm í þvermál og um 10 til 12 cm langir. Sýnin sem voru keyrð í þrívíddarskannanum voru kjarnar boraðir úr sýnunum frá Vegagerðinni, tveir með 24 mm þvermál, einn með 45 mm þvermál og enn einn með 54 mm þvermál.

Sýni C-1-7

24 mm kjarni var boraður með kjarnabor með demantsborkrónu. Borinn var ekki kældur, en engu að síður gekk ágætlega að bora kjarnann. Svo er að sjá sem engar skemmdir hafi orðið á kjarnanum við borunina Mynd 4.



Mynd 4. Sýni C-1-7. Kjarni sem er um 24 mm í þvermál og 35 mm á lengd.

Sýni C-1-8

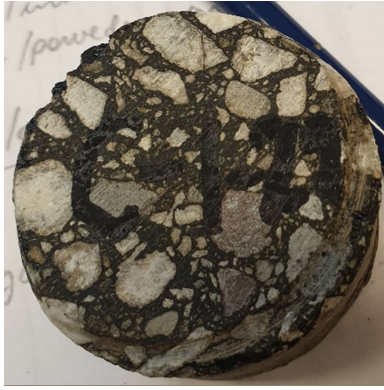
54 mm kjarni var boraður með kjarnabor með demantsborkrónu. Borinn var kældur með vatni og ágætlega gekk að bora, Mynd 5.



Mynd 5. Sýni C-1-8. Kjarni sem er 54 mm í þvermál og 54 mm á lengd.

Sýni C-1-22

45 mm kjarni var boraður með kjarnabor með demantsborkrónu. Borinn var ekki kældur og illa gekk að bora. Kjarninn hitnaði of mikið á jöðrunum og yfirborðið afmyndaðist aðeins, sjá Mynd 13.



Mynd 6. Sýni C-1-22. Kjarni sem er um 45 mm í þvermál og 28 mm á lengd.

Sýni H3-14

24 mm kjarni var boraður með kjarnabor með demantsborkrónu. Borinn var ekki kældur, en samt gekk ágætlega að bora kjarnann og svo er að sjá að engar skemmdir hafi orðið á honum við borunina, sjá Mynd 7.



Mynd 7. Sýni H3-14. Kjarni sem er um 24 mm í þvermál og 36 mm á lengd.

Greiningar

Tvívið myndgreining

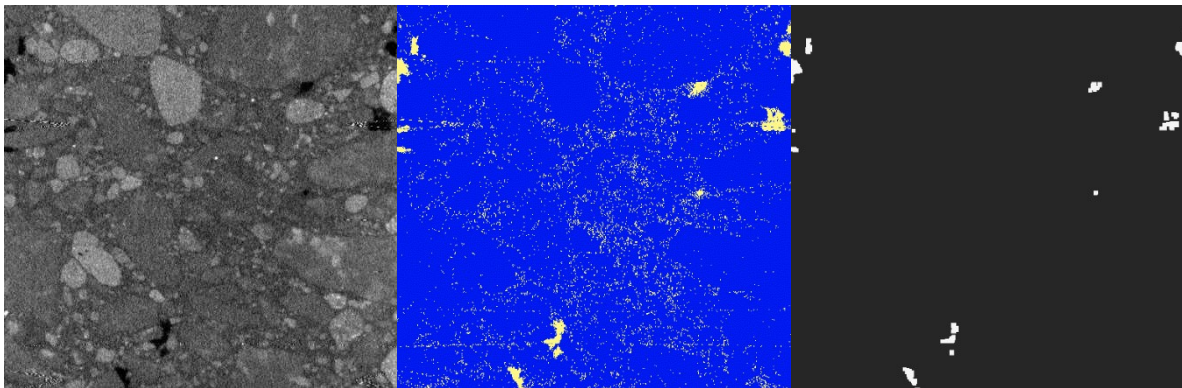
Þar sem þrívíðar myndgreiningar eru nokkuð þungar í tölvuvinnslu var fyrst skoðað með tvívíðum greiningum hvernig best væri að meðhöndla stakar tölvumyndir fyrir myndgreiningu og auðvelda þannig þrívíðu greininguna. Meðhöndlun myndanna var svipuð og lýst er hér að ofan fyrir sýnið sem skannað með myndskanna, nema hér var unnið með myndir úr tomography skönnuninni. Markmið þessarar greiningar var að finna heppilegar optískar síur til að draga fram eiginleika viðkomandi sýna.

Á Mynd 8 má sjá dæmi um tvívíða myndgreiningu. Mynd 8a er sneiðmynd af sýni C-1-22. Mynd 8b sýnir sneiðmyndina sem hefur verið meðhöndluð með MuntiSpecWin64 forritinu. Um er að ræða tvíundamynd (e. binary-) þar sem fylliefni og bik hafa verið flokkuð saman (blá) og holrými aðskilið frá föstum fösum (gult). Eins og sjá má er mikið um smágerð holrými sem dreifast um bikið. Dreifing þessara smágerðu holrýma er nokkuð ójöfn, mest er af þeim um miðja mynd og minna til hliðanna. Myndgreining af Mynd 8b gefur um 4,8 % holrými.

Með því að keyra röð af dialate/erode síum var hægt að eyða smáum holrýmum. Mynd 8c sýnir tvíundamynd þar sem holrýmin birtast sem ljós fasi og afgangurinn af sýninu, þ.e. bindiefni og fylliefni, sem dökkur fasi. Myndgreining af Mynd 8c gefur um 0,73 % holrými.



Athyglisvert er að sjá að ljósi fasinn (smáir ljósir blettir á mynd Mynd 8b) virðist dreifa sér á fasaskilsvæði milli fylliefna og biks. Ástæða þess að blettirnir eru algengastir um mitt sýnið er væntanlega sú að sýnið er sívalningur, sem einhverra hluta vegna veldur því að þessir fasablettir sjást betur þar sem sýnið er þykkast. Mögulega er hægt að leiðrétta þessa misdreifingu þegar greiningin á sér stað. Hafa ber í huga að upplausnin í myndunum er tiltölulega lítil. Svona smáir fasablettir koma einnig fram við myndgreiningu á myndum með meiri upplausn. Erfitt að segja hvort þarna sé um raunveruleg holrými sé að ræða. Eitthvað af þessu smáu „holrýmum“ stafa af göllum í myndunum sem urðu við greininguna. Gallarnir í þessum myndum koma fram sem nær láréttir ferlar. Sú staðreynd að smásæja holrýmið er algengara í bikinu en fylliefnunum, bendir til þess að um raunverulegt holrými sé að ræða, a.m.k að einhverju leyti.



a. Sneiðmynd af C-1-22

b. Tviundamynd (e. binary-) sem sýnir annars vegar bik og fylliefni og hins vegar holrými

c. Binary mynd þar sem búið er að hreinsa mynd b af smáu holrými

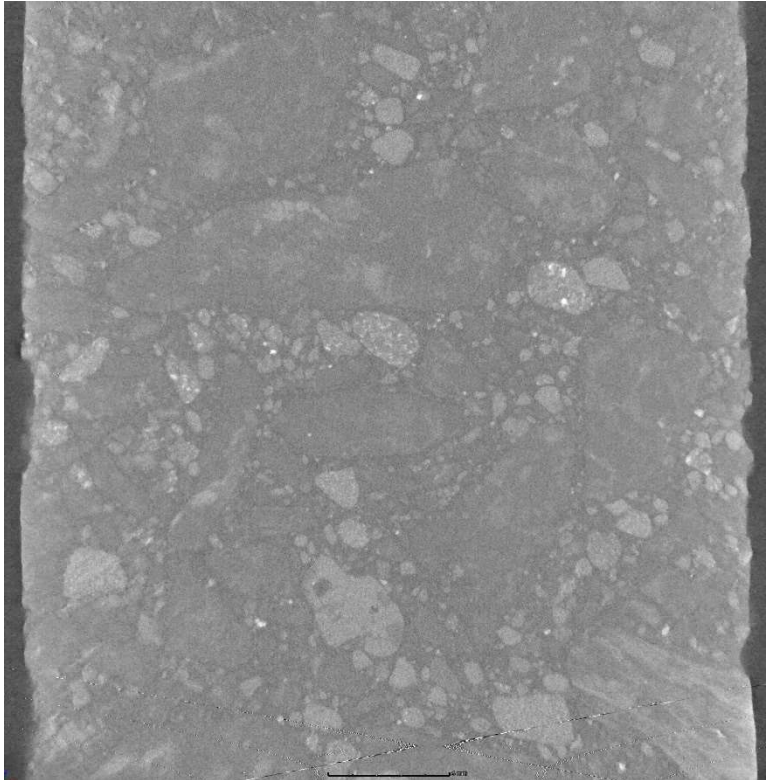
Mynd 8. C-1-22. Sneiðmynd frá 3D greiningu, greining með MultiSpecWin64 án meðhöndlunar sýnir alls 4,8 % holrými og greining eftir meðhöndlun með röð af optískum síum (e. filters) alls 0,73 % holrými. Sérhver mynd er 21,4 x 26,6 mm að stærð eða um 441 mm².

Þrívíð myndgreining

Viðkomandi sýni er skannað í tækinu með orkumiklum geisla og merkið frá geislanum er skráð þegar geislinn hefur farið í gegnum sýnið. Við skönnunina er sýninu snúið í heilring og þetta er endurtekið eftir endilöngu sýninu. Gögnum er safnað og byggt upp þrívíddarlíkan af sýninu. Eftir að greiningu er lokið er gögnunum breytt yfir í þrívíðar gráskalamyndir af sýninu. Úrvinnsla fer síðan fram á gráskalamyndunum. Hún felst í því að meðhöndla gögnin þannig að sem best upplausn fáið og greining á þeim þætti/þáttum sem sóst er eftir.

Sýni C-1-7

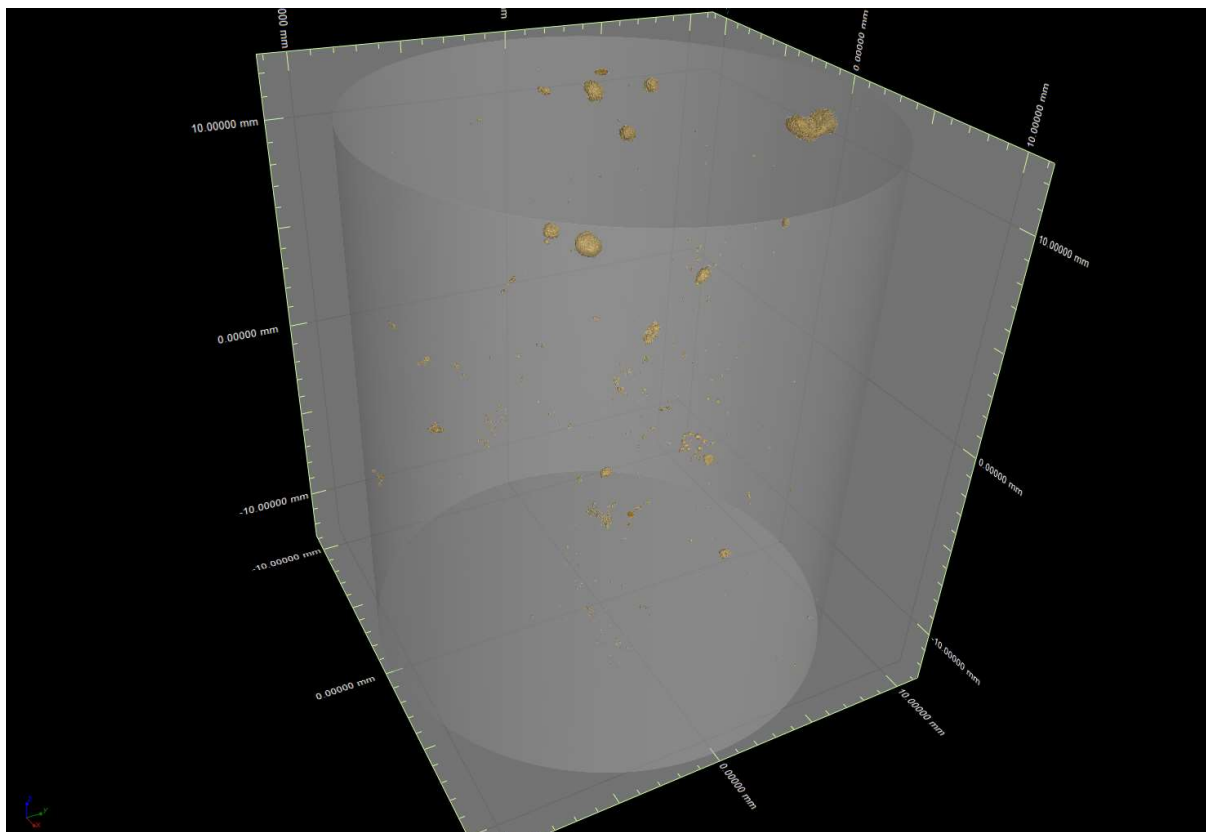
Sýnið var greint í þrívíddarskannanum með 0,014 mm/voxel upplausn. Þessari upplausn var hægt að ná með tiltölulega stuttir keyrslu í tækinu vegna þess að sýnið var aðeins 24 mm í þvermál. Dæmi um sneiðmynd úr greiningunni er sýnd á Mynd 9.



Mynd 9. Sneiðmynd af sýni C-1-7. Upplausnin í greiningunni var 0.014 mm/voxel. Skalinn á myndinni er 4 mm langur.

Eins og sjá má á Mynd 9 er ekkert holrými til staðar í viðkomandi sneiðmynd. Einnig má sjá mismunandi fylliefni, en erfitt er að greina á milli biks og samlitra fylliefna. Neðarlega á myndinni má sjá galla í myndinni. Þeir stafa af biluðum nemum. Vonir standa til að hægt verði að gera við þessa nema.

Á Mynd 10 má sjá þrívíddarlíkan af öllu sýninu þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni.

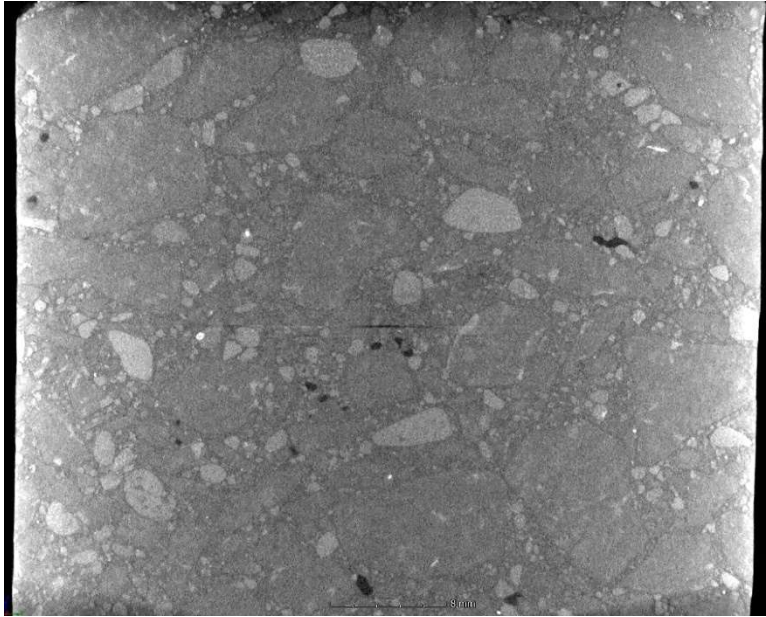


Mynd 10. Þrívíddarlíkan af sýni C-1-7 þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni. Rúmmál sívalningsins er 21021,57 mm³ og rúmmál holrýmis er 4,21 mm³ eða aðeins um 0,2 %.

Sýnið sem skannað var reyndist vera um 21 cm³ og holrýmishluti þess var aðeins 0,2 %.

Sýni C-1-8

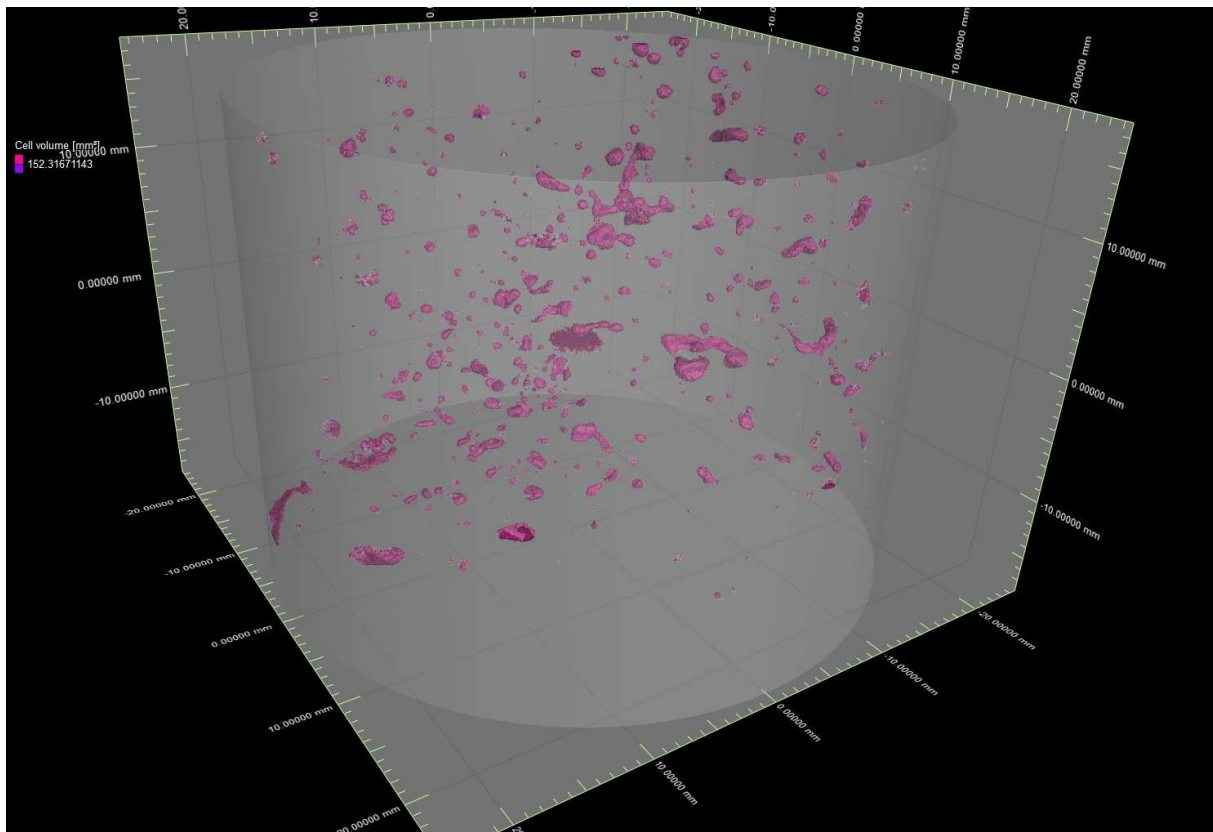
Sýnið var greint í þrívíddarskannanum með 0,042 mm/voxel upplausn. Upplausnin er ekki eins góð og fékkst þegar sýni C-1-7 var greint. Sökum þess að sýni C-1-8 er stærra en sýni C-1-7 var niðurstaðan að þetta væri ásættanleg upplausn. Betri upplausn má fá með lengri keyrslu. Dæmi um sneiðmynd úr greiningunni er sýnd á Mynd 9.



Mynd 11. Sneiðmynd af sýni C-1-8. Upplausnin í greiningunni var 0.042 mm/voxel. Skalinn á myndinni er 8 mm langur.

Eins og sjá má á Mynd 11 eru holrými til staðar á viðkomandi sneiðmynd, þau koma fram sem dökk, ílöng til hringlaga, svæði. Einnig má sjá mismunandi fylliefni, en erfitt er að greina á milli biks og samlitra fylliefna. Sjá má móta fyrir láréttu striki um mitt sýnið. Þetta er galli sem stafa af biluðum nemum, eins og áður er getið.

Á Mynd 12 má sjá þrívíddarlíkan af öllu sýninu þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni.



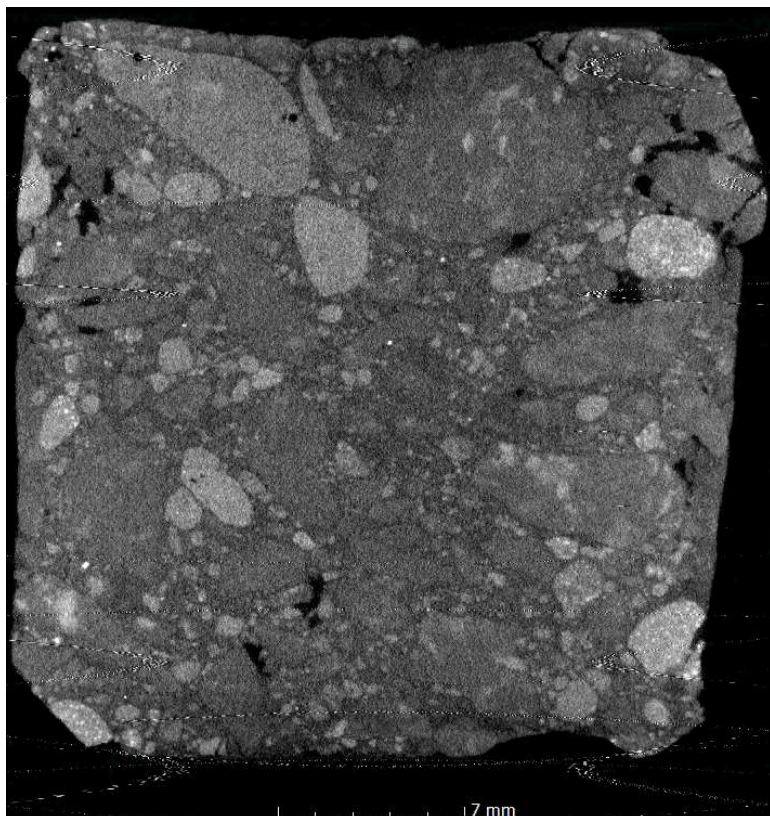
Mynd 12. Þrívíddarlíkan af sýni C-1-8 þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni. Rúmmál sívalningsins er 63331,56 mm³ og rúmmál holrýmis er 152,32 mm³ eða aðeins um 0,24 %.



Sýnið sem var skannað reyndist vera um 63 cm³ og holrýmishluti þess var aðeins 0,24 %.

Sýni C-1-22

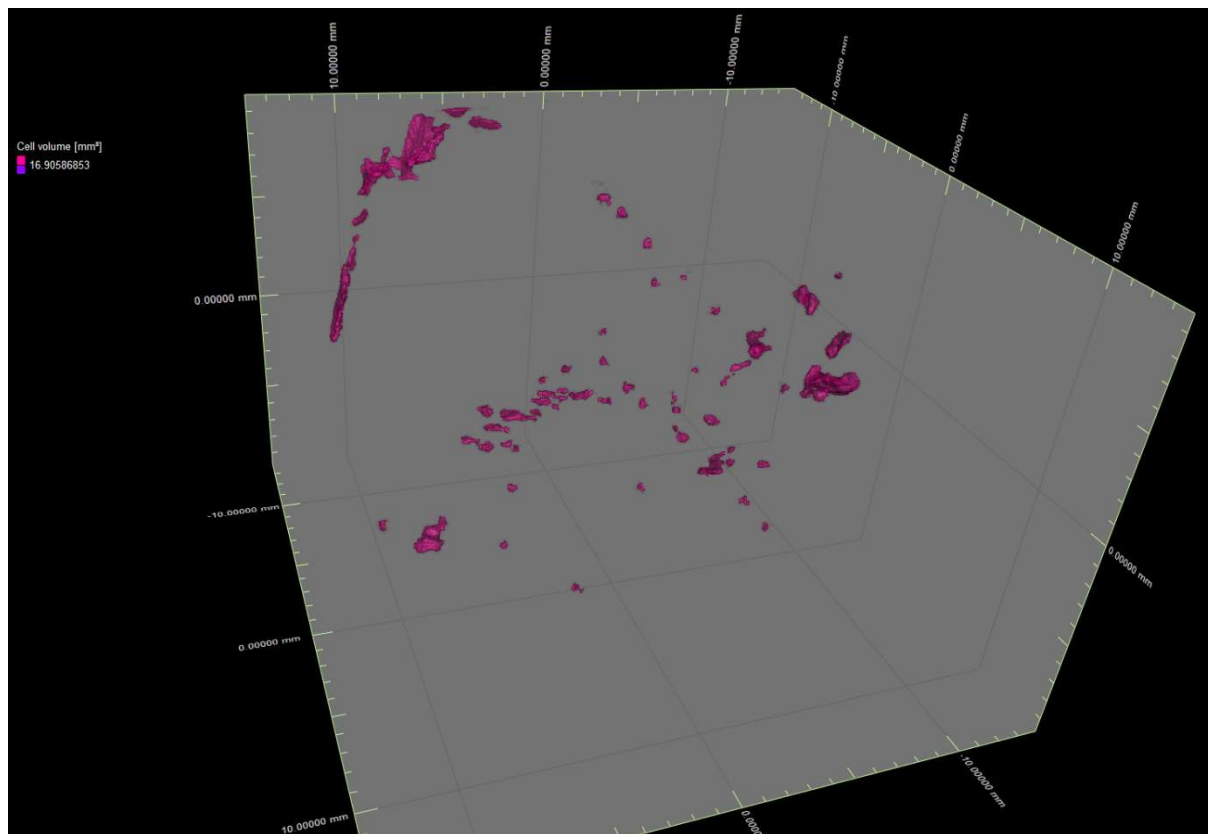
Sýnið var greint í þrívíddarskanninum með 0,042 mm/voxel upplausn. Upplausnin er ekki eins góð og fékkst þegar sýni C-1-7 var greint. Sökum þess að sýni C-1-22 er stærra en sýni C-1-7 var niðurstaðan að þetta væri ásættanleg upplausn. Betri upplausn má fá með lengri keyrslu. Dæmi um sneiðmynd úr greiningunni er sýnd á Mynd 13.



Mynd 13. Sneiðmynd af sýni C-1-22. Þegar sýnið var borað afmyndaðist yfirborð sýnisins aðeins. Upplausnin í greiningunni var 0.041 mm/voxel. Skalin á myndinni er 7 mm langur. Sýnið var ekki kælt þegar kjarninn var boraður. Eins og sjá má hefur sýni skaðast við borunina, sýnið hitnaði og yfirborð þess hefur aflagast og mögulega hafa sprungur myndast út frá jöðrunum.

Á Mynd 13 má sjá að holrými eru til staðar á viðkomandi sneiðmynd, þau koma fram sem dökk, ílög til hringlaga, svæði. Einnig má sjá mismunandi fylliefni, en erfitt er að greina á milli biki og samlitra fylliefna. Sjá má lárétt strik um allt sýnið. Þetta eru gallar í sneiðmyndinni sem stafa af biluðum nemum, eins og áður er getið.

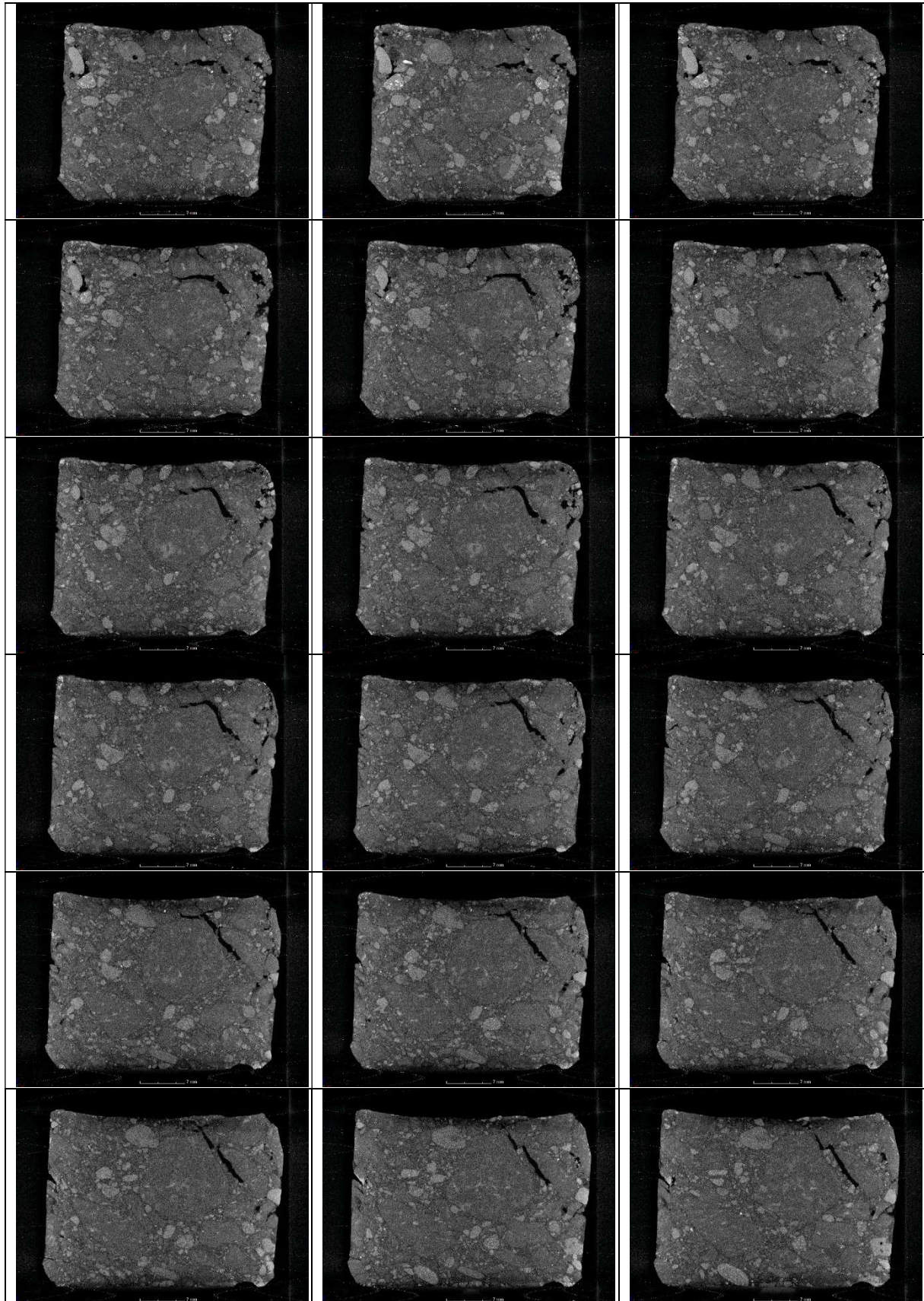
Á Mynd 14 má sjá þrívíddarlíkan af öllu sýninu þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni.



Mynd 14. Þrívíddarlíkan af sýni C-1-22 þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni. Rúmmál sívalningsins er 15760.03 mm³ og rúmmál holrýmis er 16.91 mm³ eða aðeins um 0,11 %.

Þar sem yfirborð sýnisins skaðaðist í boruninni sem og jaðrar þess voru þessir hlutar ekki teknir með í myndgreiningunni. Því var í myndgreiningunni aðeins unnið með hluta af sýninu eða um 16 cm³ rúmmál. Myndgreining gaf um 16,906 mm³ af holrými eða aðeins um 0,11 %.

Mynd 15 sýnir röð sneiðmynda af sýni C-1-22. Fyrsti ramminn er tekinn um 8 mm frá jaðrinum og síðan koma 17 rammar með 0,235 mm millibili. Eins og sjá má er holrýmið á þessu dýptarbili að mestu bundið við eitt, tiltölulega stórt, holrými í efri hluta sýnisins hægra megin. Svo virðist sem holrýmið tengist nærliggjandi fylliefnum og gæti bent til lélegrar viðloðunar milli fylliefnanna og biksins.

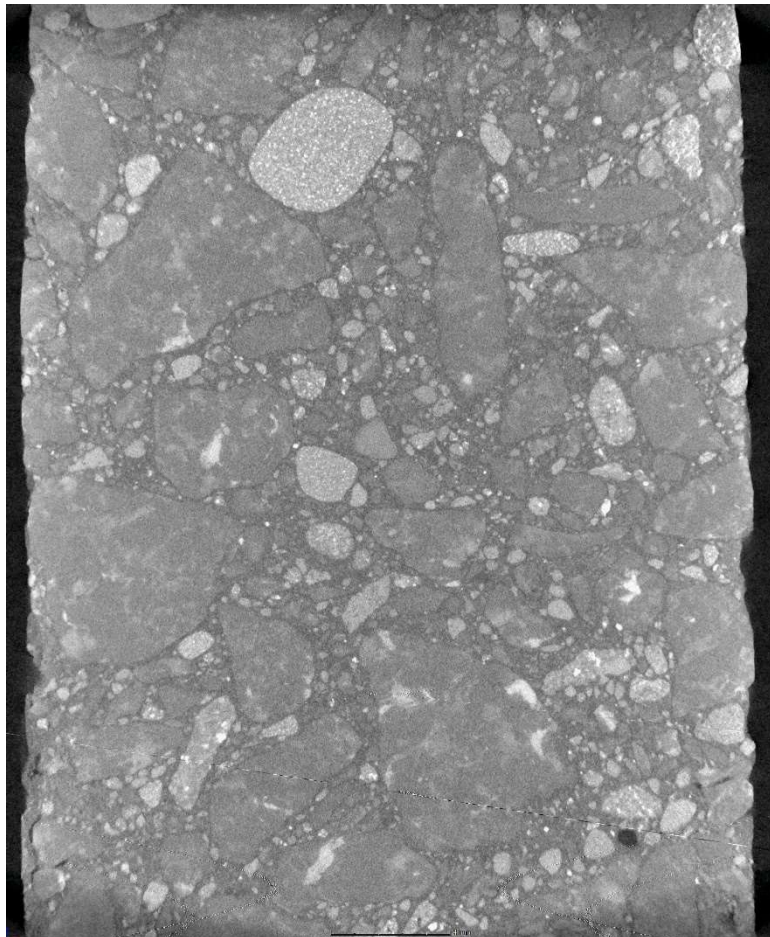


Mynd 15. Sneiðmyndaröð af sýni C-1-22. Fyrsti ramminn (efsta röð til vinstri) byrjar á um 8 mm dýpi frá ytri brún sýnis og um 4 mm inni í sýninu.



Sýni H3-14

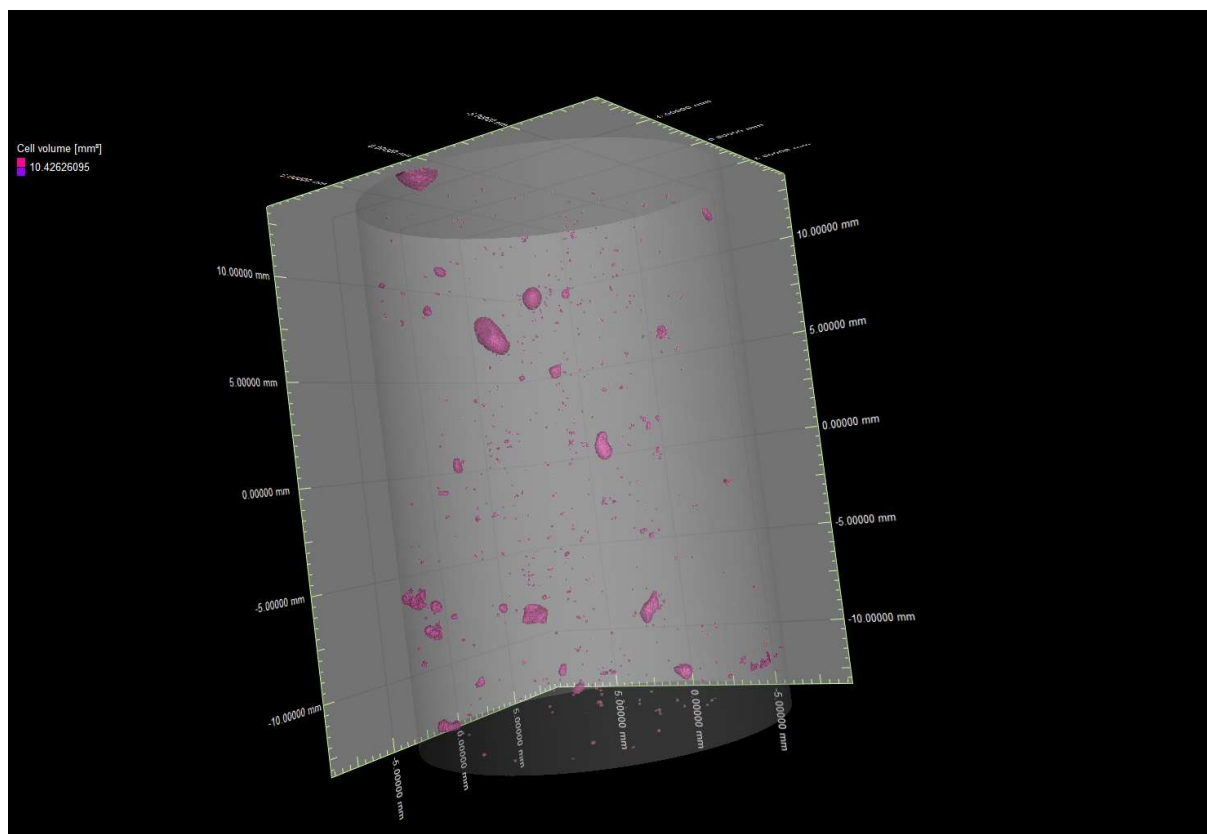
Sýnið var greint í þrívíddarskannanum með 0,014 mm/voxel upplausn. Þessi upplausn fékkst með tiltölulega stuttri keyrslu í tækinu vegna þess að sýnið var aðeins 24 mm í þvermál. Dæmi um sneiðmynd úr greiningunni er sýnd á Mynd 16.



Mynd 16. Sneiðmynd af sýni H3-14. Upplausnin í greiningunni var 0.014 mm/voxel. Skalinn á myndinni er 4 mm langur.

Eins og sjá má á Mynd 16 er tiltölulega lítið holrými er til staðar á viðkomandi sneiðmynd. Það má sjá eina hringlaga loftbólú í hægra hornin niðri. Einnig má sjá holrými í vinstri jaðri sýnisins, sem væntanlega hafa myndast þegar sýnið var borað. Einnig má sjá mismunandi fylliefni, en erfitt er að greina á milli biki og samlitra fylliefna.

Á Mynd 17 má sjá þrívíddarlíkan af öllu sýninu þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni.



Mynd 17. Þrívíddarlíkan af sýni H3-14 þar sem holrými hafa verið aðgreind frá biki og fylliefni. Rúmmál þess hluta sívalningsins sem myndgreiningin nær til er 6618,87 mm³ og þar af er rúmmál holrýmis 10.43 mm³ eða aðeins um 0,16 %.

Í myndgreiningunni var aðeins unnið með hluta af sýninu eða tæplega 7 cm³ rúmmál. Myndgreining sýndi um 10,43 mm³ af holrými eða aðeins um 0,16 %.

Niðurstöður

Erfiðlega gekk framán af að útbúa óskemmd sýni til greiningar. Á tímabilinu (2020) voru fimm sýni skönnuð og þrívíddarlíkan af fjórum þeirra byggt upp. Vegna bilana í þrívíddarskanninum (tomography tækinu) gekk verkið frekar hægt en markmið þessa áfanga náðust, þ.e. að ná tókum á malbiksgreiningum og sýnt var fram á að hægt er að nýta tæknina til þess að greina holrým d í malbikssýnum. Einnig er ljóst að með X-ray greiningu virðist vera tiltölulega auðvelt að greina einstaka fasa í malbiki, en upplausn greininganna virðist vera mjög háð sýnastærð. Í þessum áfanga var unnið með borkjarnasýni sem höfðu 24, 45 og 54 mm þvermál. 24 mm sýnin voru skönnuð með 0,014 mm/voxel upplausn og 45 og 54 mm sýnin voru skönnuð með 0,042 mm/voxel upplausn. Væntanlega er ekkert því til fyrirstöðu að skanna 54 mm kjarna með 0,014 mm/voxel upplausn, en greiningin tekur þá lengri tíma og tölvuvinnsla verður þyngri. Í slíkri keyrslu þarf að gæta þess sýnin hitni ekki. Ef malbik hitnar umfram herbergishita aflagast það auðveldlega.

Áður en sýni voru rannsökuð með þrívíddarskanninum, var eitt sýni skoðað í tvívíðu rúmi. Malbikssýni sem fengið var hjá Vegagerðinni var unnið niður í um 2 x 5 cm sneið. Sneiðin var um 1 cm á þykkt. Sneiðin var skönnuð í myndskanna með 0.0033 mm/px upplausn, slík upplausn er töluvert betri en fékkst með þrívíddarskanninum. Einnig voru einstakar myndir teknar úr þrívíða safninu og þær meðhöndlaðar með ýmis konar optískum síum. Tilgangurinn var að finna besta verklag til að draga fram þætti eins og pórustrúktúr, svo einfalda mætti vinnu við þrívíða safnið.



Alls voru fjögur sýni keyrð í þrívíddarskannanum og þar að auki eitt sýni greint með tvívíðri greiningu. Öll sýnin eru raunveruleg malbikssýni fengin hjá Vegagerðinni. Holrýmishluti þessara fjögurra malbikssýna var fundin með þrívíddargreiningu. Ekki er markmið þessa verkefnis að fjalla efnislega um niðurstöður greininganna, en þess má geta að holrýmishluti allra sýnanna reyndist frekar lágur eða á bilinu 0,11 til 0,24 %. Tvívíð greining á sambærilegu malbiksýni, sem var 2 x 5 cm að stærð, gaf 0,2 % holrýmnd.

Þrívíðar sem og tvívíðar greiningar eins fjallað hefur verið um í þessari skýrslu eru aðeins framkvæmanlegar, eða a.m.k. töluvert auðveldari, á sýnum með þétu fylliefni, þ.e. fylliefni með engu holrými. Slíkt efni finnst varla hér á landi. Malbik eins og það fjallað er um í þessari rannsókn er nánast undantekningarlaust gert úr þétu, erlendu fylliefni. Íslenskt fylliefni með tiltölulega mikið holrými er illnýtanlegt sem slitlagsefni.

Í næstu skrefum verkefnisins verður unnið að því að meta upplausn greininga á mismunandi stórum sýnum til þess að kanna hvort raunhæft sé að greina magn bindiefnis í malbiki. Þyngdarhluti bindiefnis er vanalega aðeins um 5 til 7 % og því þarf mikla upplausn í greiningum til þess að greina á milli bindiefnis og fylliefna. Greiningum á öðrum þáttum eins og aflögun malbiks, fasaskilssvæði og trefjum í malbiki verður haldið áfram.

Þakkarorð

Vegagerðinni er þakkað fyrir stuðning við þetta verk. Gissuri Örlygssyni er þökkuð aðstoð við tomography greiningarnar. Ásbirni Jóhannessyni er þökkuð aðstoð við skýrsluskrif.