



Greining á innri gerð slitlaga með X-ray tomography

Seinni áfangi / Mars 2022

Dr. Gísli Guðmundsson



Efnisskrá

| | |
|---|----|
| Inngangur..... | 1 |
| 3D X-ray computer tomography - þrívíddarskanni..... | 2 |
| Sýnin | 3 |
| Sýni 1 | 4 |
| Sýni 2 | 4 |
| Sýni 3 | 5 |
| Sýni 4 | 5 |
| Sýni 5 | 6 |
| Sýni 6 | 6 |
| Sýni P-2 | 7 |
| Þrívíð myndgreining á sýnum | 8 |
| Sýni 1 – Kaldblandað malbik..... | 8 |
| Sýni 2 – Venjulegt malbik | 12 |
| Sýni 3 | 15 |
| Sýni 4 | 17 |
| Sýni 5 | 20 |
| Sýni 6 | 22 |
| Sýni P-2 | 25 |
| Niðurstöður | 28 |
| Þakkarorð | 28 |

Myndaskrá

| | |
|--|----|
| Mynd 1. Sýni 1..... | 4 |
| Mynd 2. Sýni 2..... | 5 |
| Mynd 3. Sýni 3..... | 5 |
| Mynd 4. Sýni 4..... | 6 |
| Mynd 5. Sýni 5..... | 6 |
| Mynd 6. Sýni 6..... | 7 |
| Mynd 7. Sýni P-2, eftir hjólfaraprófun..... | 7 |
| Mynd 8. Sýni 1. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu. | 9 |
| Mynd 9. Sýni 1. X-ray binary sneiðmyndir af sýninu..... | 10 |
| Mynd 10. Sýni 1 – sneiðar 200 og 600 (af 11,85 – 35,5 mm) sem gráskala og binary sneiðmyndir.. ... | 11 |
| Mynd 11. Hluti af mynd 10 í meiri stækkun. | 12 |
| Mynd 12. Sýni 2. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu. | 13 |
| Mynd 13. Binary sneiðmyndir af sýni 2..... | 14 |
| Mynd 14. Sýni 2 – sneiðmyndir af sneið 200 sem gráskala og binary sneiðmyndir..... | 15 |



| | |
|---|----|
| Mynd 15. Sýni 3. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu | 16 |
| Mynd 16. Binary sneiðmyndir af sýni 3, sneiðar 300 til 650. | 17 |
| Mynd 17. Sýni 4. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu. | 18 |
| Mynd 18. Binary sneiðmyndir af sýni 4. | 19 |
| Mynd 19. Sýni 5. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu | 20 |
| Mynd 20. Binary sneiðmyndir af sýni 5. | 21 |
| Mynd 21. Sýni 6. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu. | 22 |
| Mynd 22. Binary sneiðmyndir af sýni 6, sneiðar 50 til 1000. | 24 |
| Mynd 23. Sneið 850 í bæði gráskala og binary í meiri stækkun en á myndum 21 og 22. | 25 |
| Mynd 24. Sýni P-2. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu | 26 |
| Mynd 25. Sýni 6. X-ray gráskala sneiðmyndir af 16,5 og 22,0 mm dýpi..... | 27 |

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 í tilraunum á rannsóknarstofum 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 álagspröfunum, 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 efna eins og malbiks 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 stórbátnað.

Önnur greiningaraðferð er að nota s.k. hringhraðall (e. synchrotron - large particle accelerators) við að safna myndum af innri gerð, en slíkt tæki er ekki til hér á landi, a.m.k. ekki fyrir svona rannsóknir. Gera má ráð fyrir að svona greiningar séu tiltölulega dýrar.

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 (> 1000 x stækkun) og með möguleikum 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 smásjargreiningu 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. Þess má þó geta að höfundur þessarar skýrslu gerði forathugun á innri gerð malbikssýna með smásjargreiningu fyrir 25 árum síðan¹. Niðurstöður hennar voru þær að gerlegt sé að útbúa sýni fyrir smásjargreiningu ef ákveðnu verklagi er fylgt. Smásjargreiningu á malbikssýni með bergfræðismásjá er síðan hægt að gera á sambærilegan hátt og smásjargreiningu 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

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



malbiksslitlögum. Til þess að ná settum markmiðum verður innri gerð malbikssýna rannsókuð, 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, 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 X-ray tæki NMÍ nú Tæknisetur sem stóð til að nota við greiningarnar var bæði bilað stóran hluta af bæði fyrri og seinni áföngum. Í þessum áfanga var gripið til þess ráðs að fá sýnin sem til stóð að rannsaka keyrð í sambærilegu X-ray tæki hjá eðlisfræðideild Háskólans í Helsinki (e. University of Helsinki, Department of Physics) í Finnlandi.

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 tölu 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 (fasaskilssvæði) 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 mismunandi slitlagsgerða. Sé sýni tekið af bindingi við neðri lög, hvort heldur er um malbik eða steinsteypu að ræða, er hægt að greina ásýnd viðloðunarinnar milli þessara tveggja mismunandi laga.

Sambærilegar rannsóknir hafa ekki verið gerðar hér á landi. Það stafar af því að tæknin 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 rútínúmælingar eru nokkuð algengar, einkum á síðasta áratug, eftir verulega þróun á hugbúnaði. Þetta eru rannsóknir/mælingar á loftmagni og loftdreifingu í sýnum, innri örprungum, 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 sýnaklefan. Í þessari rannsókn er miðað við að lengd sýna sé ekki meiri en um 6 cm.

Eins og áður getur voru sýnin sent til Finnlands. Tækið sem var notað við X-ray greiningar er Phoenix nanotom eða sambærilegt tæki sem er í eigu Tæknseturs. Sýnin voru keyrð á 110 kV hröðunarspennu (sýni 1 var keyrt á 100 kV og sýni 2 á 140 kV). Straumurinn var 250 μ A (sýni 2 með 200 μ A straum). Sýnin voru keyrð í 116 mínútur (sýni 2 var keyrt í 70 mínútur). X-ray sían sem var notuð í hverju skanni var 1 mm Cu (sýni 2 með 1 mm Cu og 0,1 mm W síu).

Niðurstöður úr X-ray greiningum sem safn af gráskala myndum, ein skrá per greiningu voru sendar óunninar til landsins með tölvupósti. Tölvuvinnsla var framkvæmd í „open source“ forritinu ImageJ.

Sýnin

Í töflu 1 eru gefnar upplýsingar um sýnin sem voru rannsökuð í þessum áfanga. Upplýsingarnar lúta að hvaðan sýnin koma og einkennandi þáttum, stærð sýna sem voru keyrð í X-ray greiningu, X-ray skráar stærð og upplausn á greiningunni.

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. Öll sýnin sem voru rannsökuð í þessum áfanga voru boruð með vatnskældum bor.

Tafla 1. Sýni sem voru send til Finnlands fyrir X-ray greiningu. Vegagerðin sá um að útvega sýni nr. 1 til 6, en þau koma frá sama malbiks framleiðanda. Sýni P-2 var útbúið hjá NMÍ nú Tæknisetur.

| Nr | Sýni | Staðsetning | Upplýsingar | Stærð sýnis (P*L, mm) | X-ray skrá, stærð, sneiðar | Pixel size eftir X-ray greiningu, micron |
|-----|--|-------------|-------------------|-----------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | Kaldblandað malbik | | Yfirborð skemmt | 50,9 * 38,5 | 1141 pixels*1141 pixels, 913 sneiðar | 59,25 |
| 2 | Vatnsleysustrandarvegur Grindavíkurvegur | V73//8054 B | | 53,0 * 45,5 | 1142 pixels*1142 pixels, 1000 sneiðar | 54,00 |
| 3 | Þingvallaverur Kaldadalsvegur Grafningsvegur | V111//808A | 7,7 % holrýmd | 52,8 * 34 | 1142 pixels*1142 pixels, 1000 sneiðar | 59,25 |
| 4 | Vatnsleysustrandarvegur Grindavíkurvegur | V81//8054D | Skemmt yfirborð | 52,8 * 44 | 1142 pixels*1142 pixels, 1020 sneiðar | 59,25 |
| 5 | Þingvallavegur Kaldadalsvegur Grafningsvegur | V111//8080A | 4,8 % holrýmd | 53 * 36,6 | 1142 pixels*1142 pixels, 1000 sneiðar | 25,00 |
| 6 | Þingvallavegur Kaldadalsvegur Grafningsvegur | V112//88 | 11,9 % holrýmd | 60,7 * 33,6 | 1142 pixels*1142 pixels, 1000 sneiðar | 25,00 |
| P-2 | Hjólfarasýni | | Sýni útbúið á NMÍ | 52 * 51 | 1142 pixels*1142 pixels, 1000 sneiðar | 55,00 |

Sýni 1

Malbikið er s.k. kaldblandað malbik. Á Mynd 1 má sjá sýnið sem sent var í greiningu. Sýnið er um 51 mm í þvermál og um 38,5 mm á hæð. Yfirborð sýnisins er nokkuð skemmt eða illa pakkað. Malbikið er gert að hluta til með íslenskum fylliefnum eða a.m.k. fylliefnum með loftbólum.



Mynd 1. Sýni 1. Kaldblandað malbik. Sýnið er 50,9 mm í þvermál og um 38,5 mm á hæð. Yfirborð sýnisins er skemmt. Örin vísar til yfirborðs.

Sýni 2

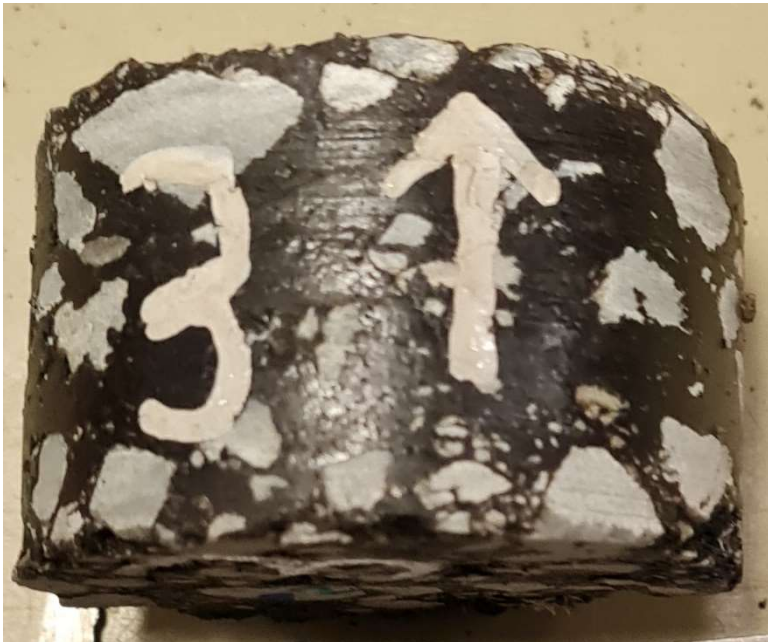
Malbikið er venjulegt malbik gert með þéttum innfluttum fylliefnum. Á Mynd 2 má sjá sýnið sem sent var í greiningu. Sýnið er 53 mm í þvermál og um 45,5 mm á hæð.



Mynd 2. Sýni 2. Sýnið er 53 mm í þvermál og um 45,5 mm á hæð. Örin vísar til yfirborðs.

Sýni 3

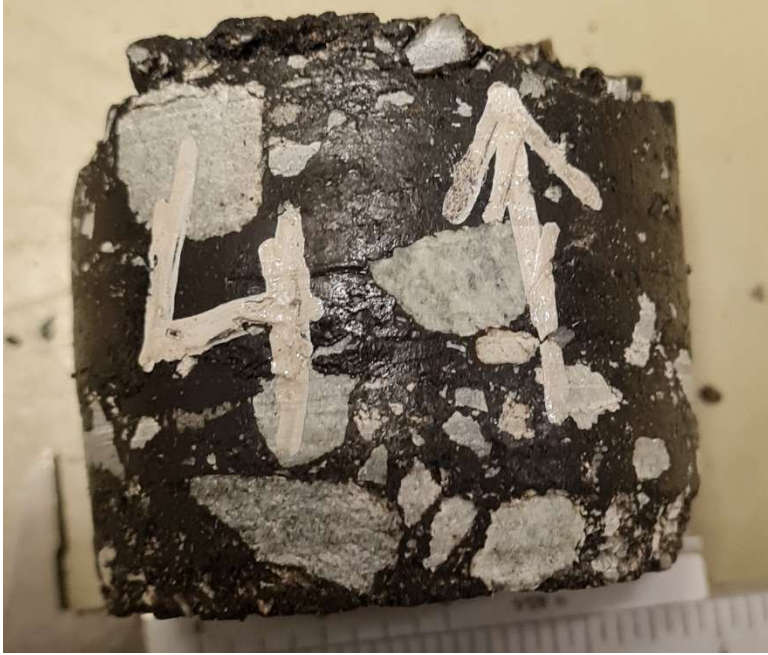
Malbikið er gert með þéttum innfluttum fylliefnum, stefnt var að því að holrýmd í malbikinu væri 7,7 %. Á Mynd 3 má sjá sýnið sem sent var í greiningu. Sýnið er 52,8 mm í þvermál og um 34 mm á hæð.



Mynd 3. Sýni 3. Sýnið er 52,8 mm í þvermál og um 34 mm á hæð. Örin vísar til yfirborðs.

Sýni 4

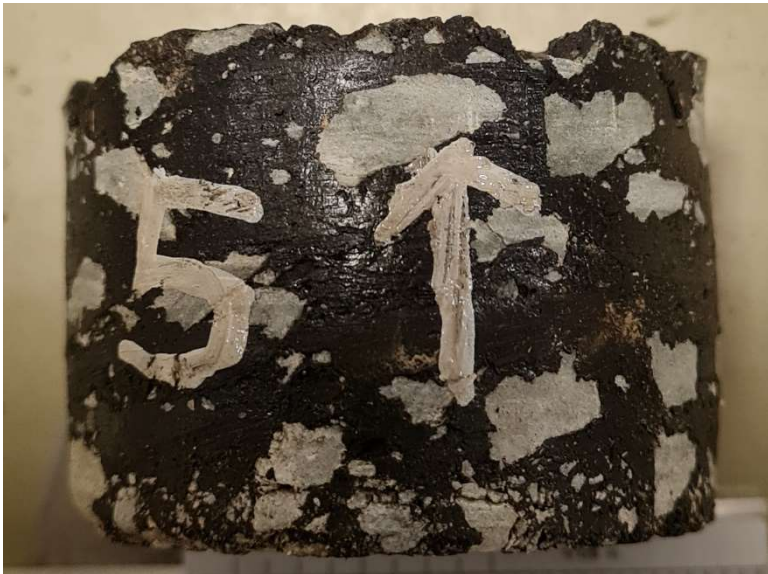
Malbikið er gert með þéttum innfluttum fylliefnum. Á Mynd 4 má sjá sýnið sem sent var í greiningu. Sýnið er með skemmt eða illa pakkað yfirborð. Sýnið er 52,8 mm í þvermál og um 44 mm á hæð.



Mynd 4. Sýni 4. Sýnið er 52,8 mm í þvermál og um 44 mm á hæð. Örin vísar til yfirborðs. Yfirborð sýnisins er greinilega skemmt.

Sýni 5

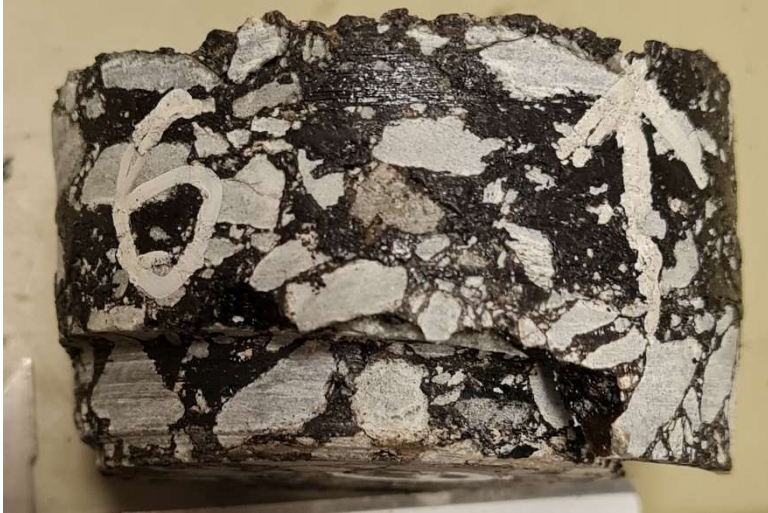
Malbikið er gert með þéttum innfluttum fylliefnum stefnt var að því að holrýmd í malbikinu væri 4,8 %. Á Mynd 5 má sjá sýnið sem sent var í greiningu. Sýnið er 53 mm í þvermál og um 36,6 mm á hæð.



Mynd 5. Sýni 5. Sýnið er 53 mm í þvermál og um 36,3 mm á hæð. Örin vísar til yfirborðs.

Sýni 6

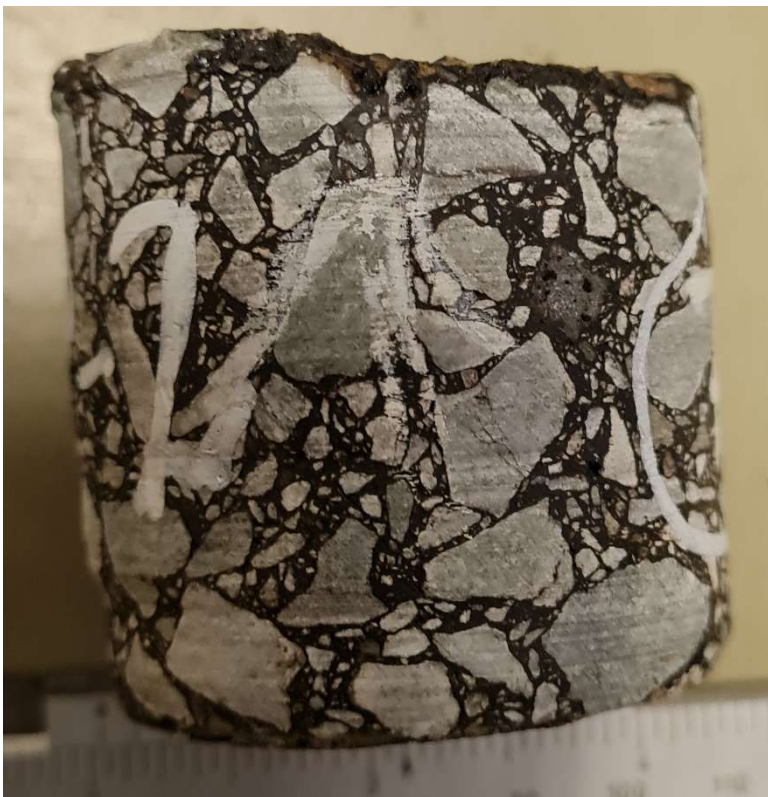
Malbikið er gert með þéttum innfluttum fylliefnum stefnt var að því að holrýmd í malbikinu væri 11,9 %. Á Mynd 6 má sjá sýnið sem sent var í greiningu. Sýnið er 60,7 mm í þvermál og um 33,6 mm á hæð.



Mynd 6. Sýni 6. Sýnið er 60,7 mm í þvermál og um 36,3 mm á hæð. Örin vísar til yfirborðs.

Sýni P-2

Sýni P-2 var útbúið á rannsóknarstofu NMÍ, nú Tæknisetur. Malbiksflakinn, sem sýnið var tekið úr, hafði áður verið prófaður í hjólfaraprófunartæki. Sýnið sem unnið var með í X-ray greiningunni var tekið þannig að hluti kjarnans var af svæðinu sem var hluti af hjólfarinu og hluti af kjarnanum var utan hjólfarsins. Malbikið er gert með þéttum innfluttum fylliefnum. Á Mynd 7. má sjá sýnið sem sent var í greiningu, sjá má að u.þ.b. helmingur kjarnans er meira pakkaður en hinn helmingurinn. Sýnið er um 52 mm í þvermál og um 51 mm á hæð.



Mynd 7. Sýni P-2, eftir hjólfaraprófun. Sýnið er 52 mm í þvermál og um 51 mm á hæð. Örin vísar til yfirborðs.



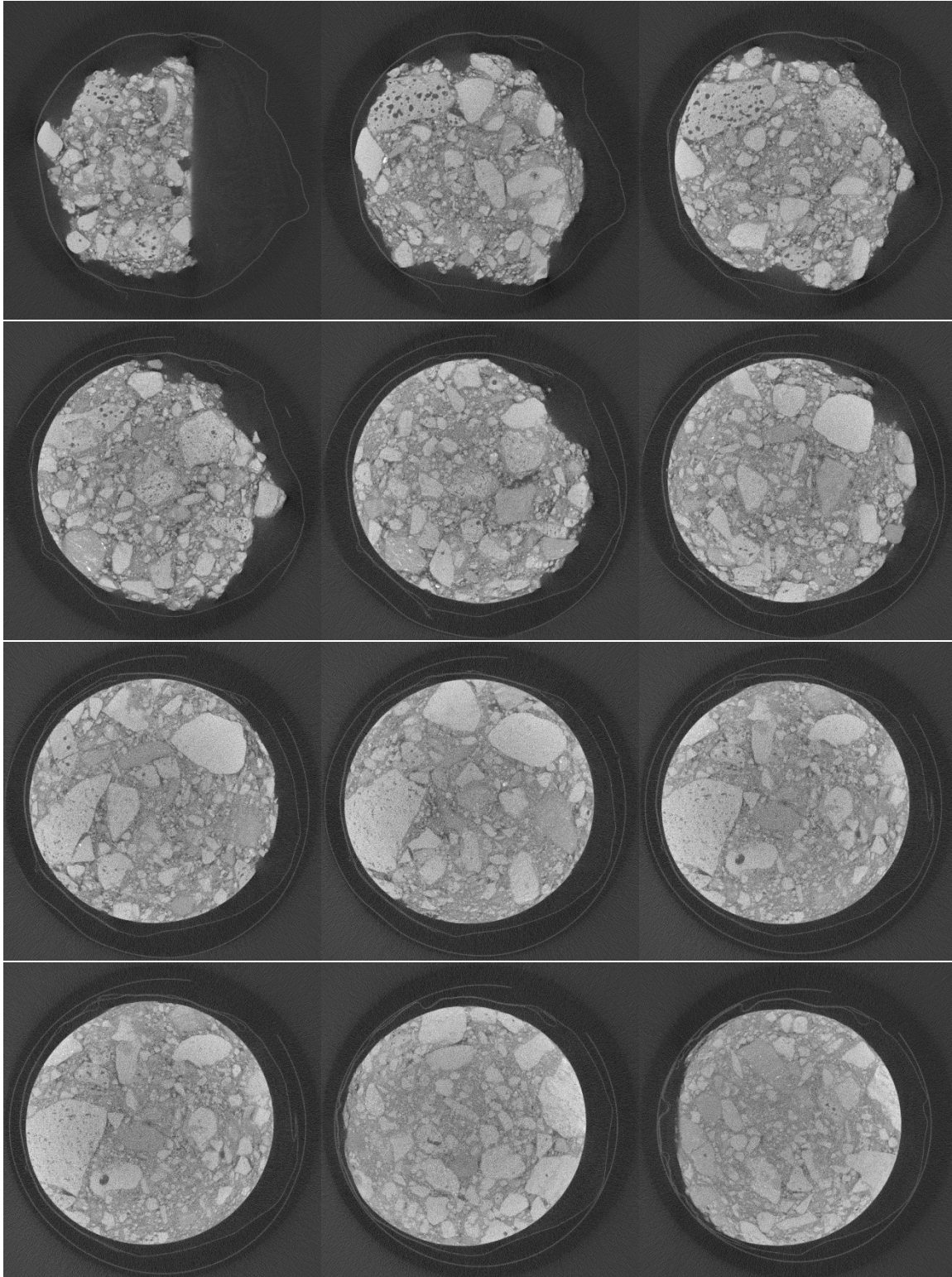
Þrívíð myndgreining á sýnum

Viðkomandi sýni er skannað í X-ray tæki með orkumiklum geisla og merkið frá geislanum er skráð þegar geislinn hefur farið í gegnum sýnið. Við skönnunina er sýninu snúið í heilhring og þetta er endurtekið eftir endilöngu sýninu með örstuttu millibili. 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. Einnig er gráskala myndunum breytt í binary myndir. Binary ferlið eða breytingin felst í því að meðhöndla gögnin þannig að sem best upplausn fáiast og greining á þeim þætti/þáttum sem sóst er eftir. Við binary breytinguna verður gráskala mynd breytt þannig að holrými verða svört og fylliefni og bindiefni hvít.

Sýni 1 – Kaldblandað malbik

X-ray keyrslan var gerð á öllum kjarnanum og er upplausnin 59,25 micron per pixel (voxel). Sýnið var keyrt í 116 mínútur. Greiningarskráin samanstóð af 913 x-y sneiðmyndum eða um 54 mm (912*0,05925 mm) í stefnu lengdaráss (Z-ás). Þar sem sýnið er aðeins 38,5 mm á lengd er töluvert af tómun myndum í greiningar skránni.

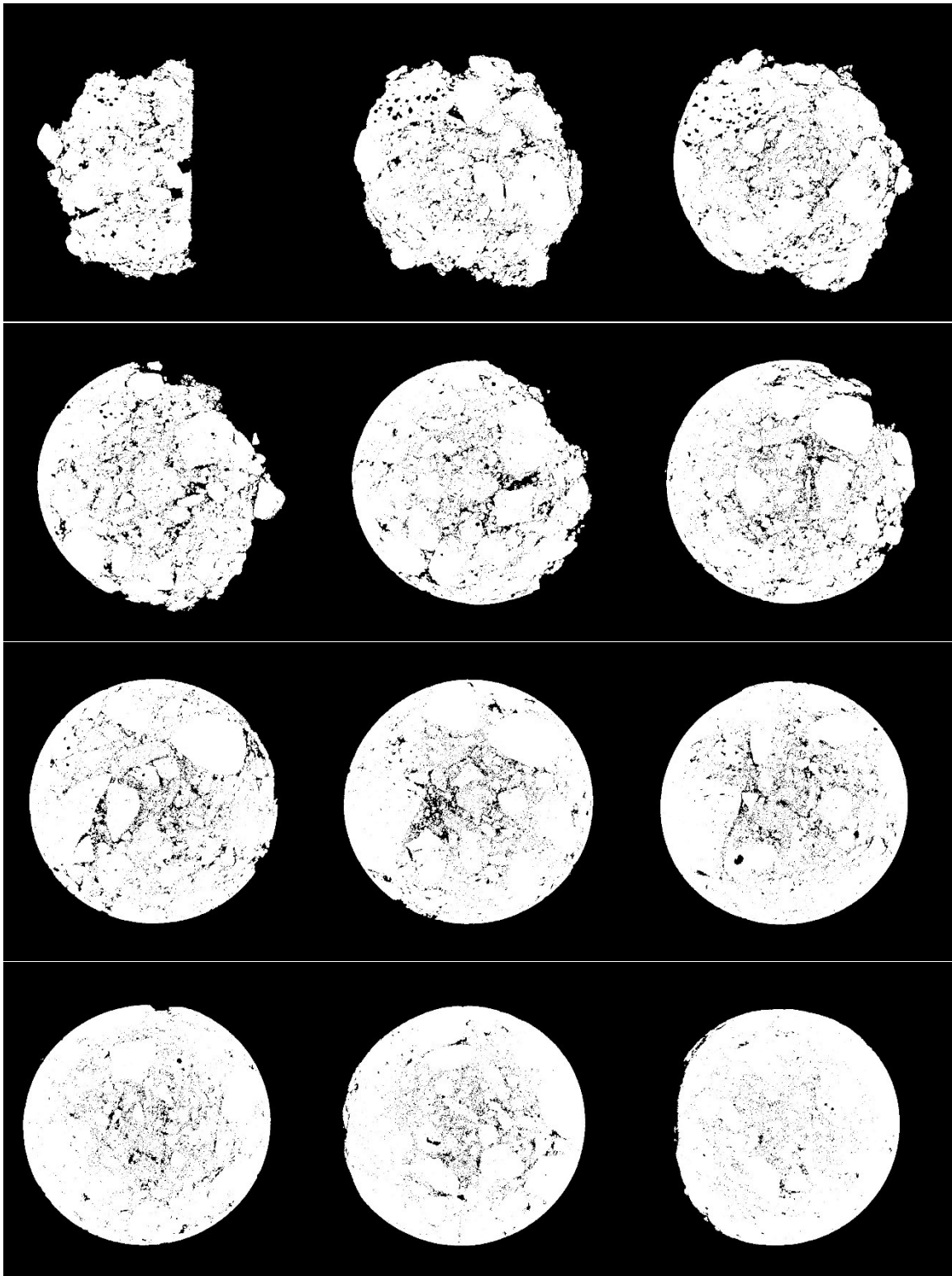
Mynd 8 sýnir 12 x-y sneiðar í gráskala með um 2,96 mm millibili. Yfirborð kjarnans er skemmt og botninn á kjarnanum hallar þannig að skönnun af óskemmdu sýni nær yfir tiltölulega lítinn hluta kjarnans. Malbikið er tiltölulega opið eða illa pakkað. Einnig má sjá að fylliefni malbiksins eru blöðrótt og eru því að væntanleg a.m.k. að hluta til íslensk.



Mynd 8. Sýni 1. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu frá yfirborði og inn í sýnið frá vinstri til hægri og niður. 50 pixels eða um 2962 micron eru á milli samliggjandi sneiða. Sneiðarnar ná frá u.þ.b. yfirborði niður á 23,7 mm dýpi og kjarninn er um 52,7 mm í þvermál. Hvert pixel (voxel) er 59,25 micron.

Á Mynd 9 má sjá binary mynd af Mynd 8. Á sérhverri sneið er holrými dökkt og bik og fylliefni ljóst. Þar sem holrými er til staðar í fylliefnum var ekki farið í að framkvæma magnbundna greiningu á holrými. Á svona myndum er mjög erfitt að greina á milli fylliefna og bika. Hins vegar er ljóst að tiltölulega mikið

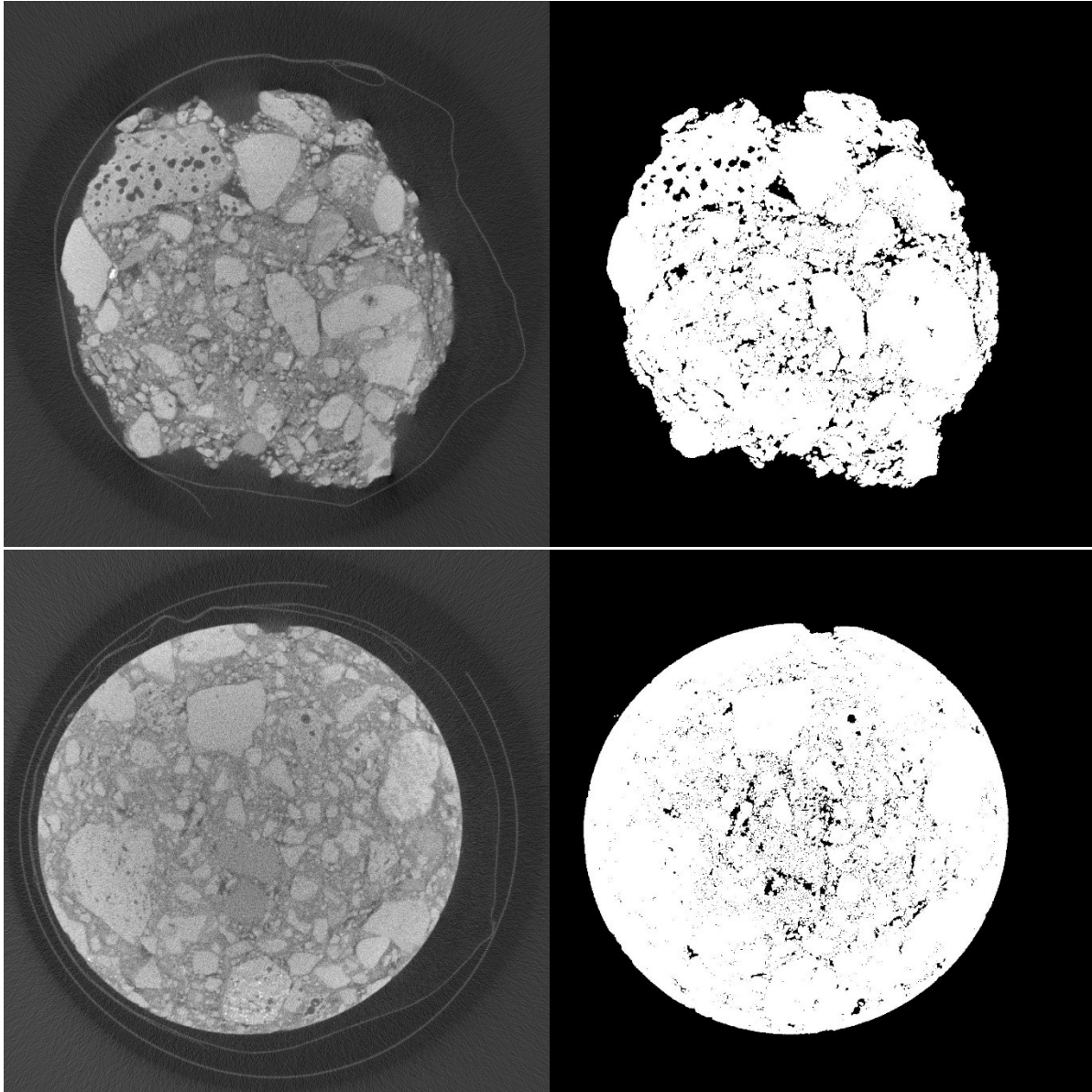
holrými er til staðar í bikinu. Grunsamlegt er hve mikið holrýmið virðist vera fyrir miðjum hvekkar sneiðar. Gæti benti til þess að greiningin sé gölluð eða X-ray tækið sé bilað.



Mynd 9. Sýni 1. X-ray binay sneiðmyndir af sýninu frá yfirborði og niður eftir sýninu, sömu myndir og eru sýndar á mynd 8. Dökku svæðin á myndinni eru holrými, bæði í bindiefninu sem og fylliefnum.

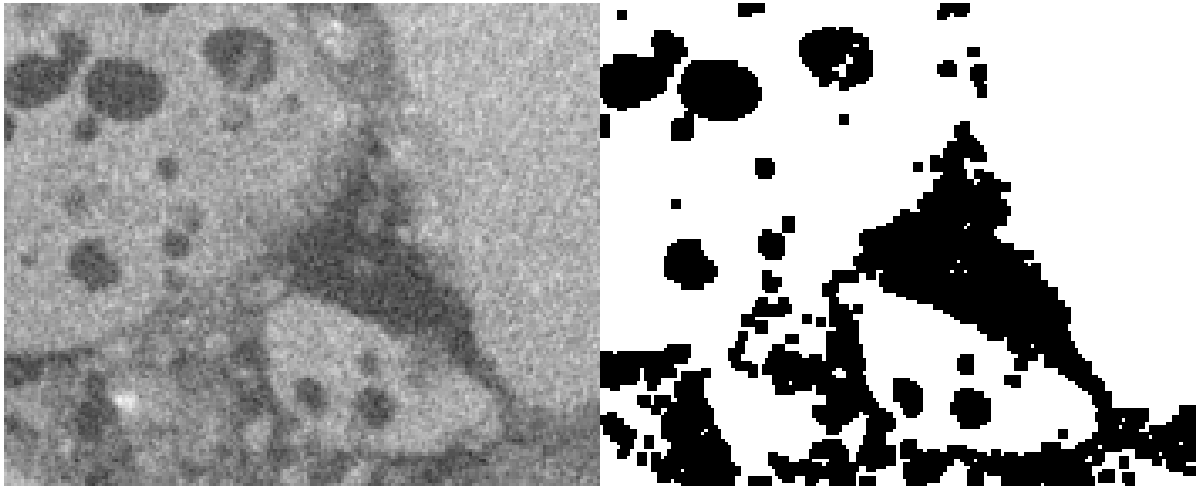
Á Mynd 10 má sjá sneið 200 sem tekin er í skemmda hluta yfirborðsins og sneið 600 sem er tekin innar í sýninu í meiri stækkun. Eins og sjá má eru fylliefni til staðar með hollrými og tiltölulega mikið af holrými

tilstaðar í bindiefni. Upplausnin í myndunum er ekki nægilega mikil til þess að greina bikið frá smáu fylliefni.



Mynd 10. Sýni 1 – sneiðar 200 og 600 (af 11,85 – 35,5 mm) sem gráskala og binary sneiðmyndir. Sama upplausn og á myndum 8 og 9. Dökk svæði á myndinni er holrými.

Á Mynd 11 má sjá hluta af sneið 200 í töluvert meiri stækkun, báðar myndirnar eru 177 x 143 pixels eða 10,49 x 8,47 mm. Myndin til vinstri er gráskalamynd en myndin til hægri er binary mynd þar sem holrými eru svört og annað er hvítt. Eins og sjá má á myndunum er töluvert af holrými í fylliefninu, en einnig má sjá að holrýmið er greinilega ofmetið í binary ferlinu. Alls greindist 29,3 % holrými á þessari mynd. Greina má stór fylliefni auðveldlega frá bikinu en mjög erfitt er að greina á milli bindiefnis og fínna fylliefnakorna.

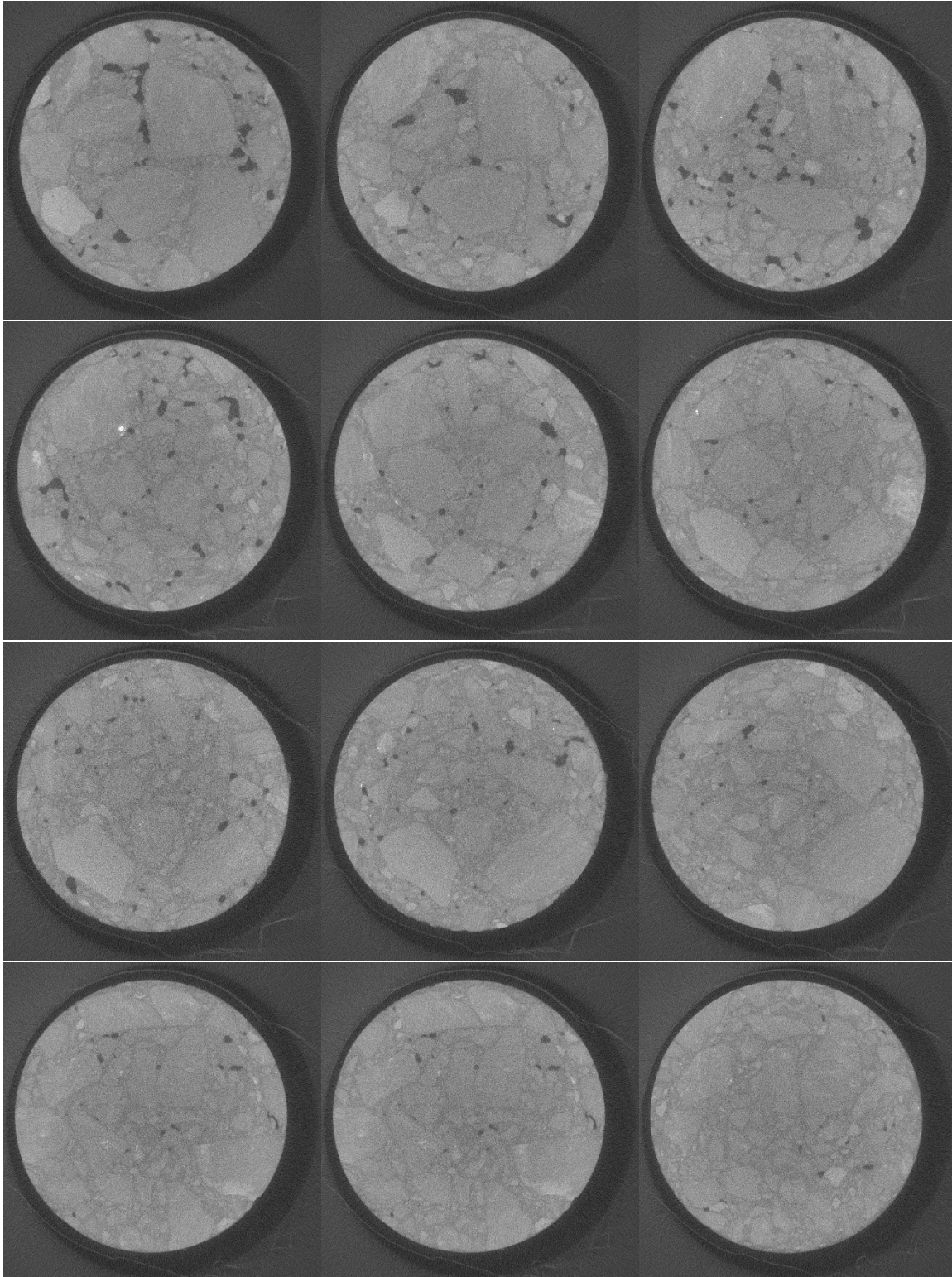


Mynd 11. Hluti af mynd 10 í meiri stækkun. Myndin er 177 x 143 pixels eða 10,49. x 8,47 mm að stærð. Dökku svæði myndarinnar eru holrými. Fylliefnið í malbikinu er með holrými (íslensk) og svo er holrými í bikinu. Alls greindist 29,3 % holrými á myndinni en greinlega hefur holrýmið verið ofmetið í binary ferlinu. Greina má stór fylliefni auðveldlega frá bikinu en erfitt er að greina smá fylliefni frá bikinu.

Sýni 2

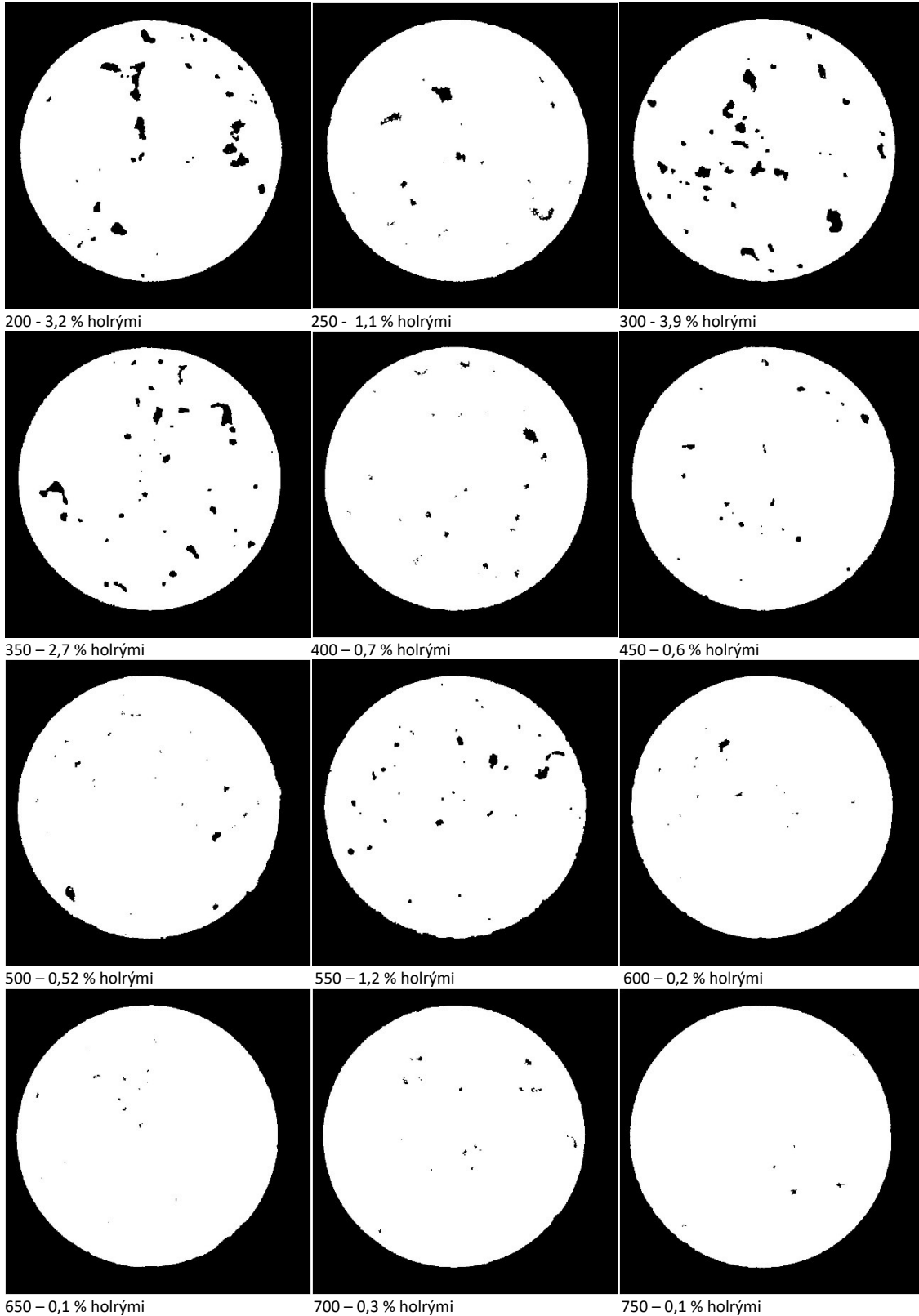
X-ray keyrslan var gerð á öllum kjarnanum og er upplausnin 54 micron per pixel (voxel). Sýnið var keyrt í 70 mínútur. Greiningarskráin samanstóð af 1000 x-y sneiðmyndum eða um 54 mm (999*0,054 mm) í stefnu lengdaráss (Z-ás). Þar sem sýnið er um 53 mm á lengd.

Mynd 12 sýnir 12 x-y sneiðar í gráskala frá um 10 mm dýpi (sneið 200) með um 2,7 mm millibili. Í efstu sneiðunum er malbikið tiltölulega opið eða illa pakkað, en eftir því sem neðar dregur þéttist malbikið.



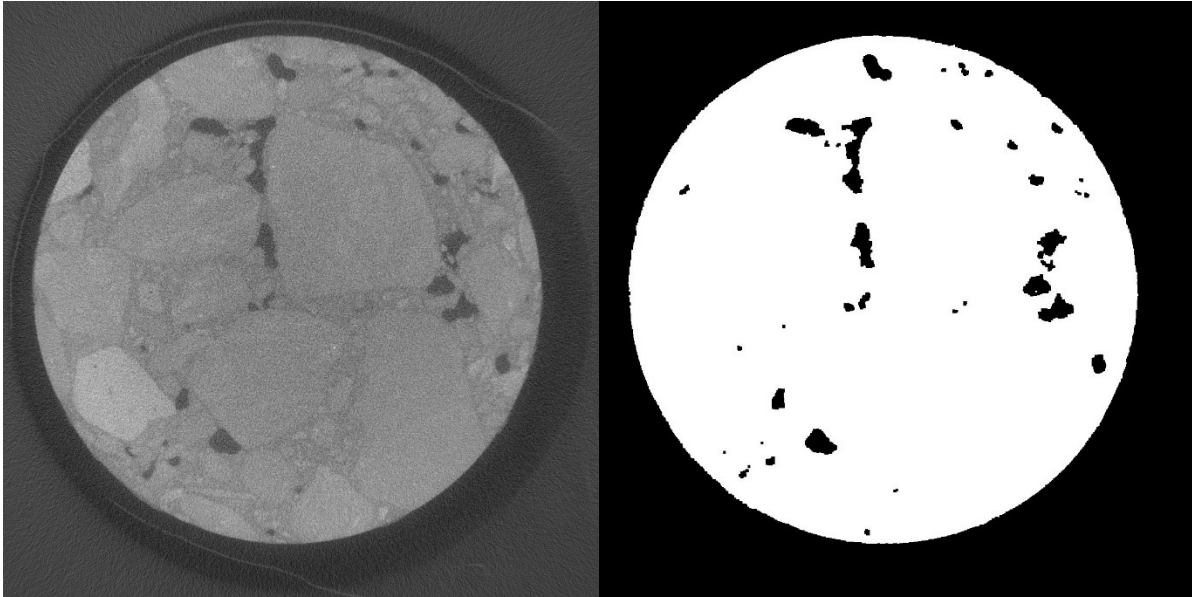
Mynd 12. Sýni 2. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu frá yfirborði og niður eftir sýninu frá vinstri til hægri og niður, sneiðar 200 til 750, 50 micron á milli sneiða.

Á Mynd 13 er sýndar viðeigandi binary myndir. Myndirnar voru meðhöndlaðar með dilate/erode síjum. Holrýmishluti var reiknaður fyrir hverja mynd fyrir sig og er gildið gefið fyrir neðan hverja sneiðmynd. Holrýmishlutinn var á bilinu frá 3,9 til 0,1 % með meðaltal um 1,2 %. Holrýmið er mest við yfirborð og lækkar ört innar í sýninu. Þar sem að fylliefnin virðast vera mjög þétt, þá er holrýmið allt í bindiefninu



Mynd 13. Binary sneiðmyndir af sýni 2. Fyrir neðan hverja mynd er gefin númer á sneið og holrýmishluti sýnis.

Upplausnin í greiningunni bíður ekki upp á greiningu á magni fylliefna og bindiefnis sjá Mynd 14 af sneið 200.

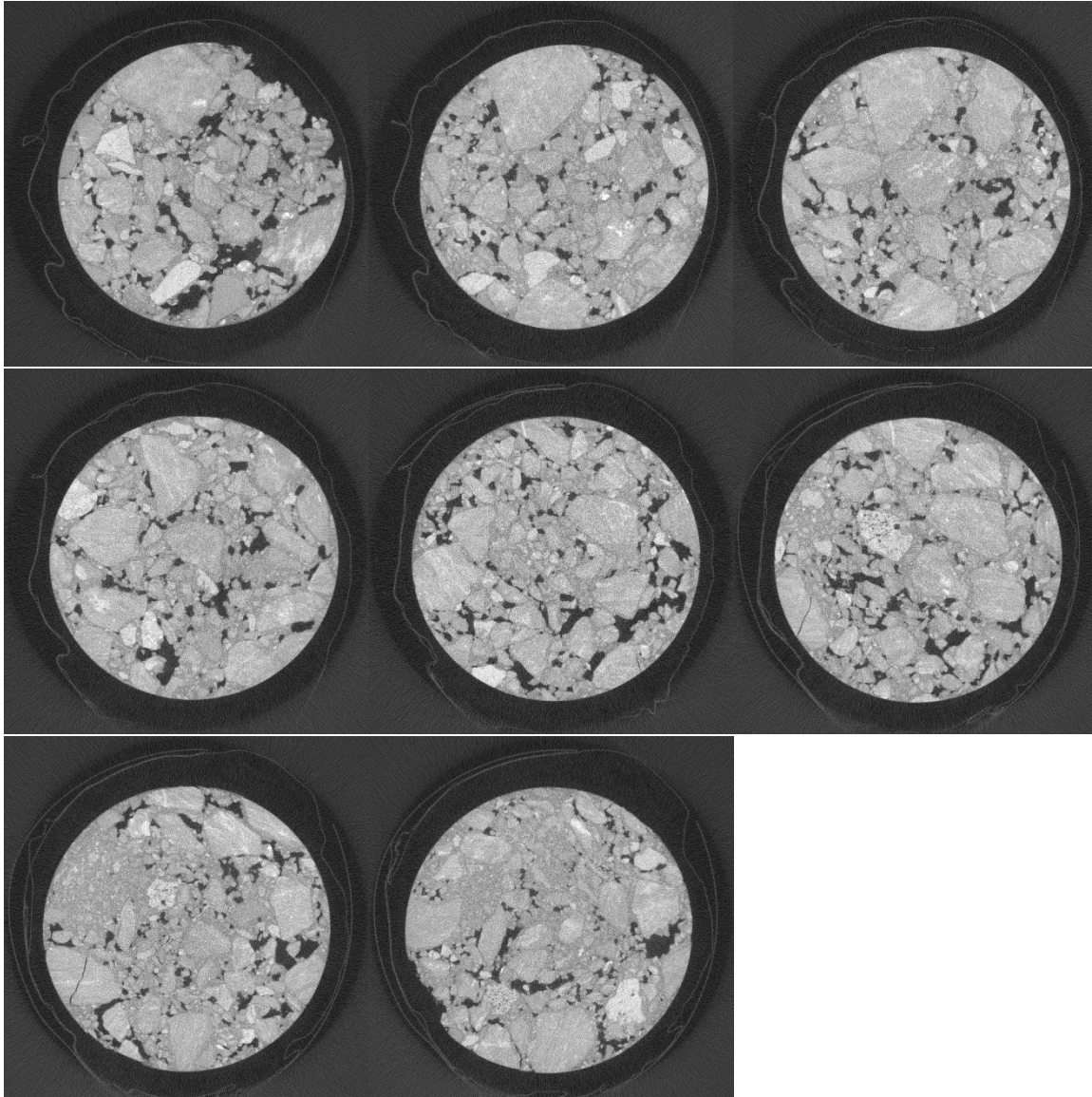


Mynd 14. Sýni 2 – sneiðmyndir af sneið 200 sem gráskala og binary sneiðmyndir. Sama upplausn og á myndum 12 og 13. Dökk svæði á myndinni er holrými.

Sýni 3

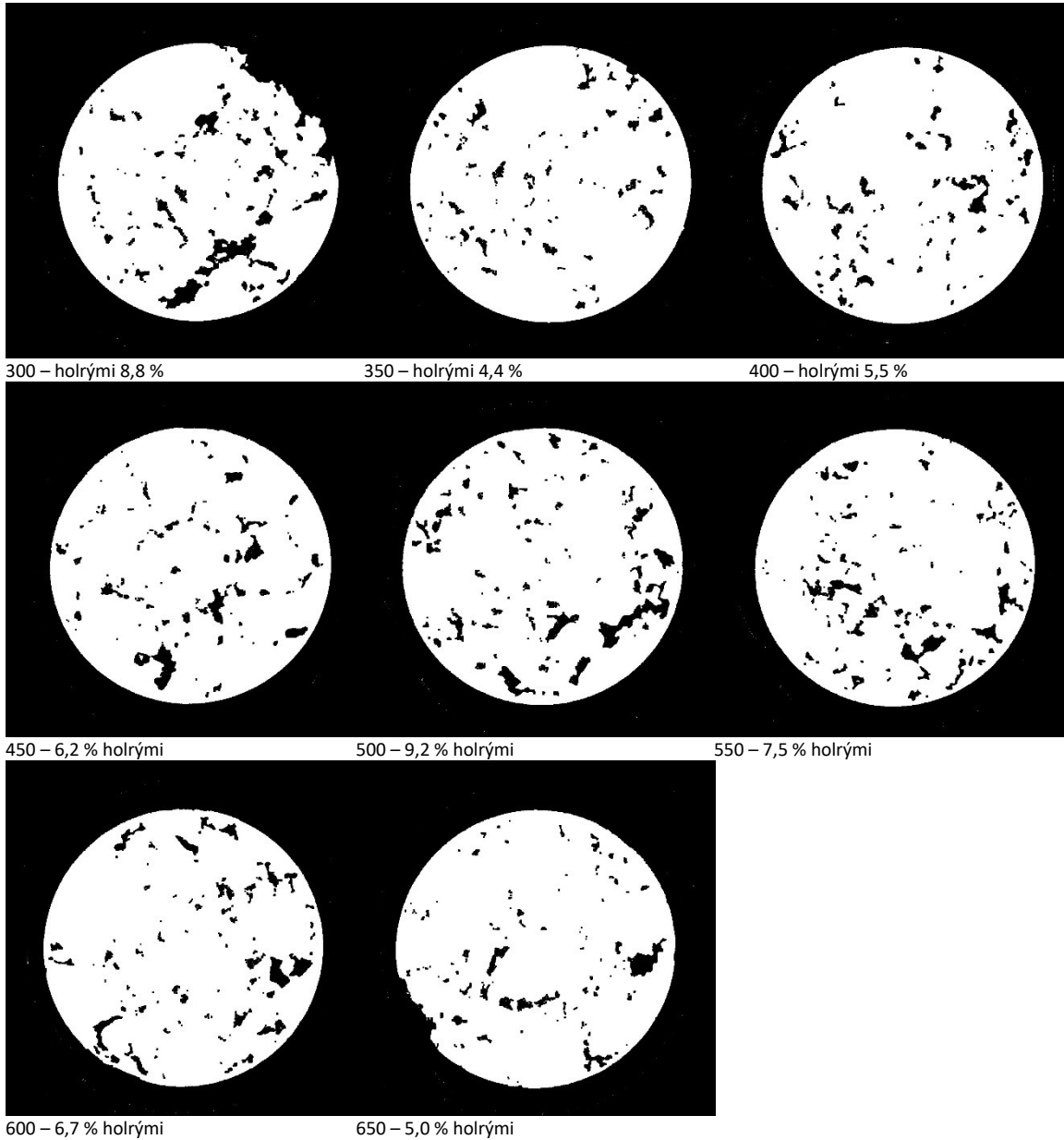
X-ray keyrslan var gerð á öllum kjarnanum og er upplausnin 59,25 micron per pixel (voxel). Sýnið var keyrt í 116 mínútur. Greiningarskráin samanstóð af 1000 x-y sneiðmyndum eða um 59,2 mm (999*0,05925 mm) í stefnu lengdaráss (Z-ás). Þar sem sýnið er um 34 mm á lengd þannig að töluvert af tómunum myndum í greiningar skránni.

Mynd 15 sýnir 8 x-y sneiðar í gráskala frá um 18 mm dýpi (sneið 300) með um 2,96 mm millibili. Holrýmishluti sýnisins virðist vera frekar hár. Á sneiðmyndunum má sjá að öllu jöfnu virðist holrýmið (loftið) dreifast nokkuð jafnt um sýnið, en á neðstu tveimur sneiðmyndunum má sjá tiltölulega stór svæði þar sem ekkert holrými er til staðar og fylliefni í bikinu eru smá.



Mynd 15. Sýni 3. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu frá yfirborði og niður eftir sýninu frá vinstri til hægri og niður. Sneiðar 300 til 650, 50 micron á milli sneiða.

Á Mynd 16 eru sýndar tilsvandi binary myndir fyrir sneiðar 300 til 650, sýnið er tiltölulega stutt og með skemmt yfirborð og hallandi botn. Myndirnar voru meðhöndlaðar með dilate/erode síjum. Holrýmishluti var reiknaður fyrir hverja mynd fyrir sig og er gildið gefið fyrir neðan hverja mynd. Holrýmishlutinn var á bilinu frá 9,2 til 4,4 % með meðaltal um 6,4 %. Holrýmið er mest við yfirborð, en lækkar með dýpi frá yfirborði. Þar sem að fylliefnin virðast vera mjög þétt, þá er holrýmið allt í bindiefninu. Samkvæmt framleiðanda var stefnt að því að hafa 7,7 % loft í sýninu.

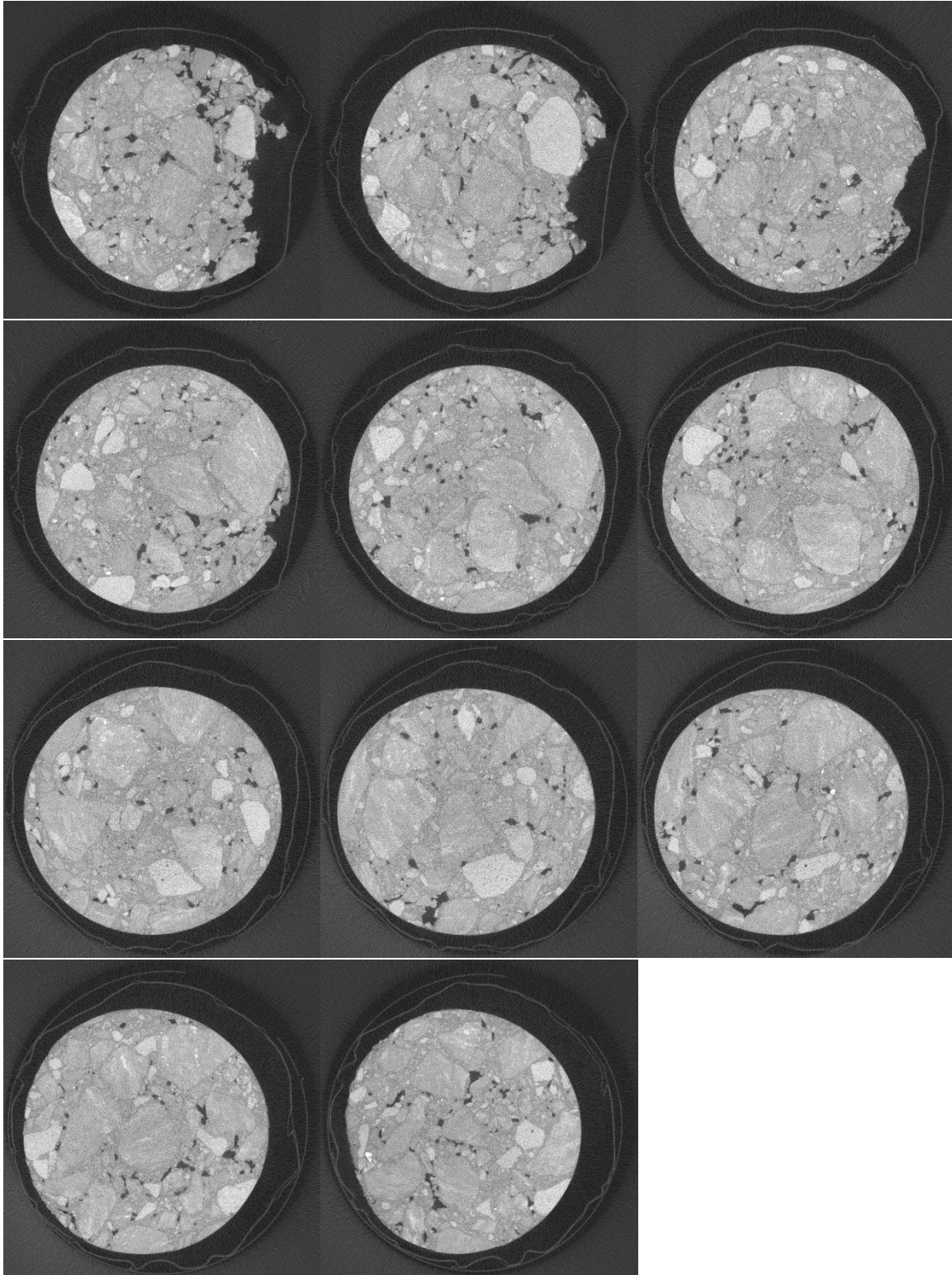


Mynd 16. Binary sneiðmyndir af sýni 3, sneiðar 300 til 650. Fyrir neðan hverja mynd er gefin númer á sneið og holrýmishluti sýnis.

Sýni 4

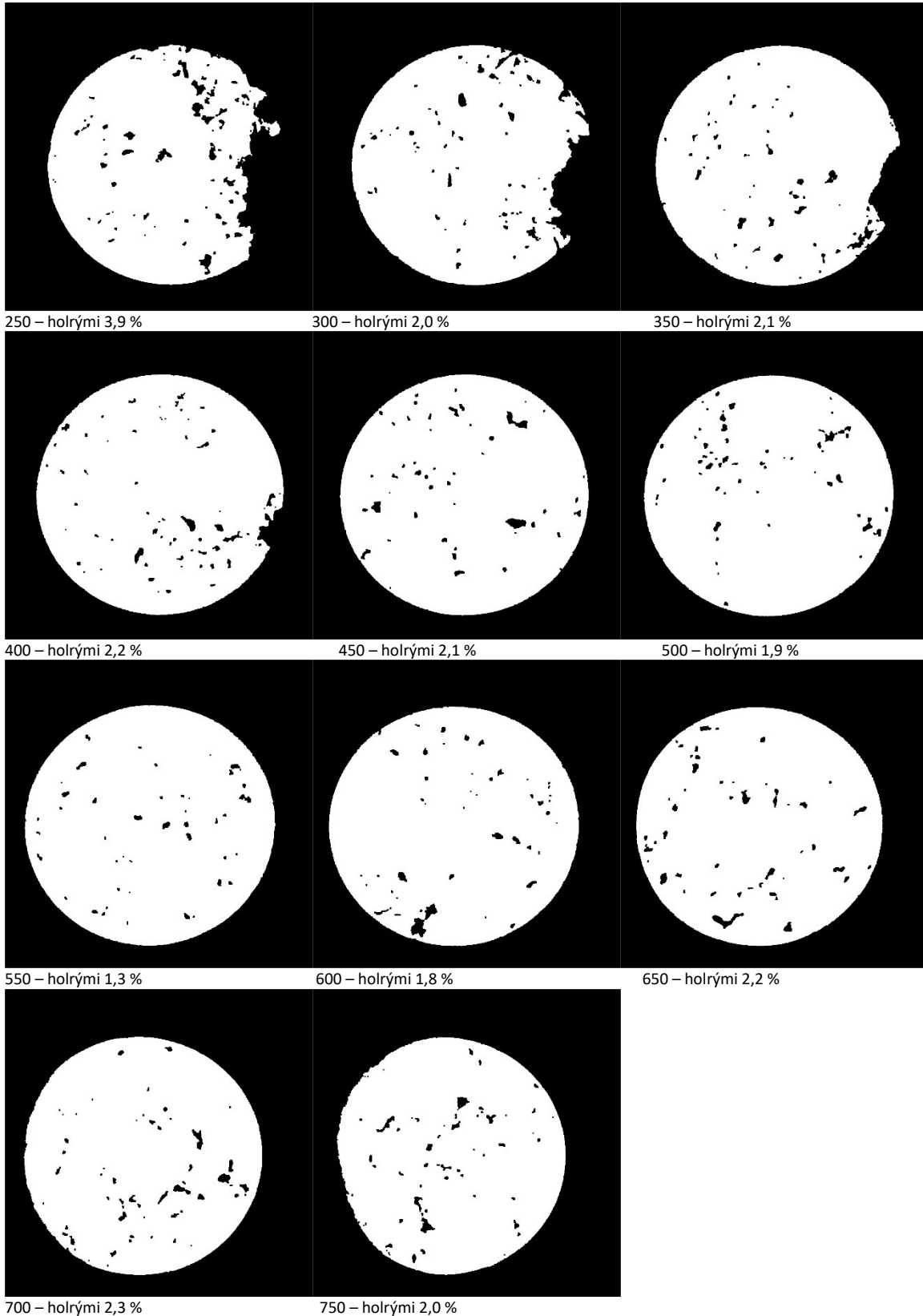
X-ray keyrslan var gerð á öllum kjarnanum og er upplausnin 59,25 micron per pixel (voxel). Sýnið var keyrt í 116 mínútur. Greiningarskrái samanstóð af 1020 x-y sneiðum eða um 60,4 mm (1019*0,05925 mm) í stefnu lengdaráss (Z-ás). Þar sem sýnið er um 44 mm á lengd þannig að töluvert af tónum myndum í greiningar skránni.

Mynd 17 sýnir 11 x-y gráskala sneiðmyndir 250 til 750 með um 2,96 mm millibili. Yfirborð kjarnans er skemmt og botninn á kjarnanum hallar þannig að greiningar á óskemmdu sýni spannar tiltölulega lítinn hluta kjarnans.



Mynd 17. Sýni 4. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu frá yfirborði og niður eftir sýninu frá vinstri til hægri og niður. Sneiðar 250 til 750, 50 micron á milli sneiða.

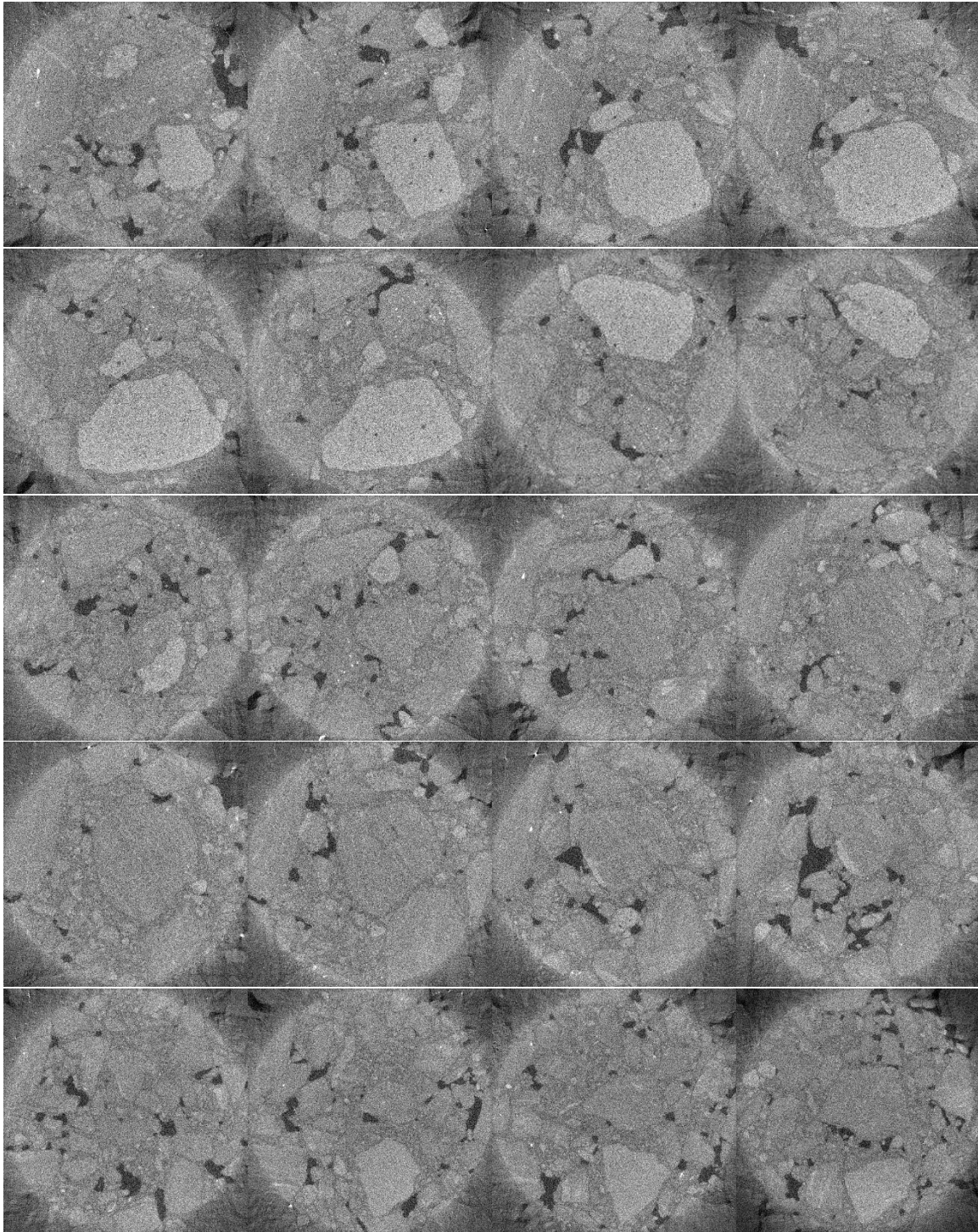
Á Mynd 18 eru sýndar viðeigandi binary sneiðmyndir. Myndirnar voru meðhöndlaðar með dilate/erode síjum. Holrýmishluti var reiknaður fyrir hverja mynd fyrir sig og er gildið gefið fyrir neðan hverja sneiðmynd. Holrýmishlutinn var á bilinu frá 3,9 til 0,1 % með meðaltal um 1,3 %. Þar sem að fylliefnin virðast vera mjög þétt, þá er holrýmið allt í bindiefninu.



Mynd 18. Binary sneiðmyndir af sýni 4, sneiðar 250 til 750. Fyrir neðan hverja mynd er gefin númer á sneið og holrýmishluti sýnis.

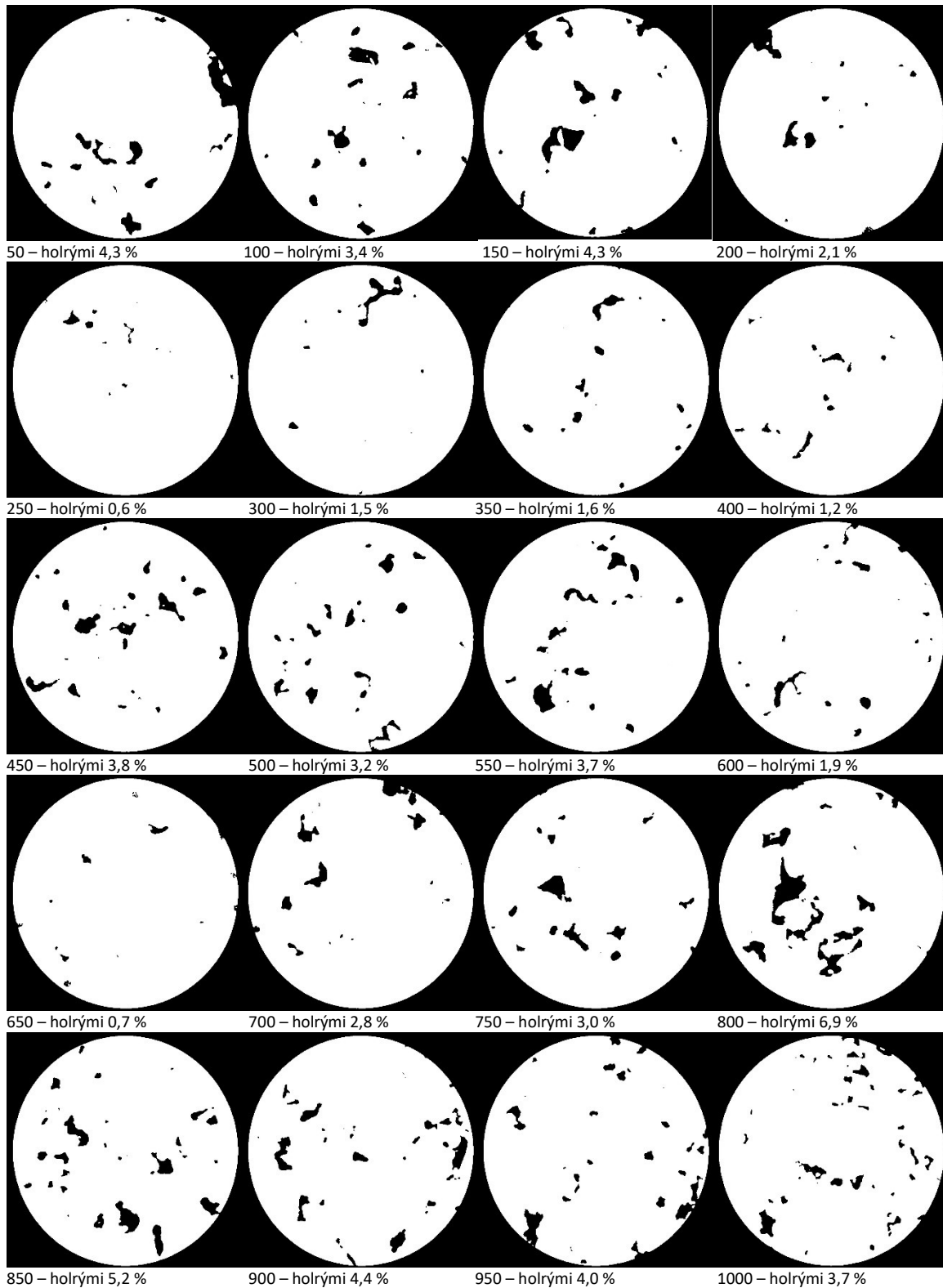
Sýni 5

Sýnið var greint í þrívíddarskannanum með 25 micron per voxel/pixel upplausn. Þessari upplausn var hægt að ná með skanna aðeins um helming sýnisins eða sívalning með um 27,9 mm í þvermál. Sýnið var keyrt eins og flest sýni í 116 mínútur. Dæmi um gráskala sneiðmynd úr greiningunni er sýnd á Mynd 19. Á myndinni má sjá hlutann sem var skannaður í meiri upplausn sem ljós gráan.



Mynd 19. Sýni 5. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu frá yfirborði og inn í sýnið frá vinstri til hægri og niður. Sneiðar 50 til 1000, 25 micron á milli sneiða.

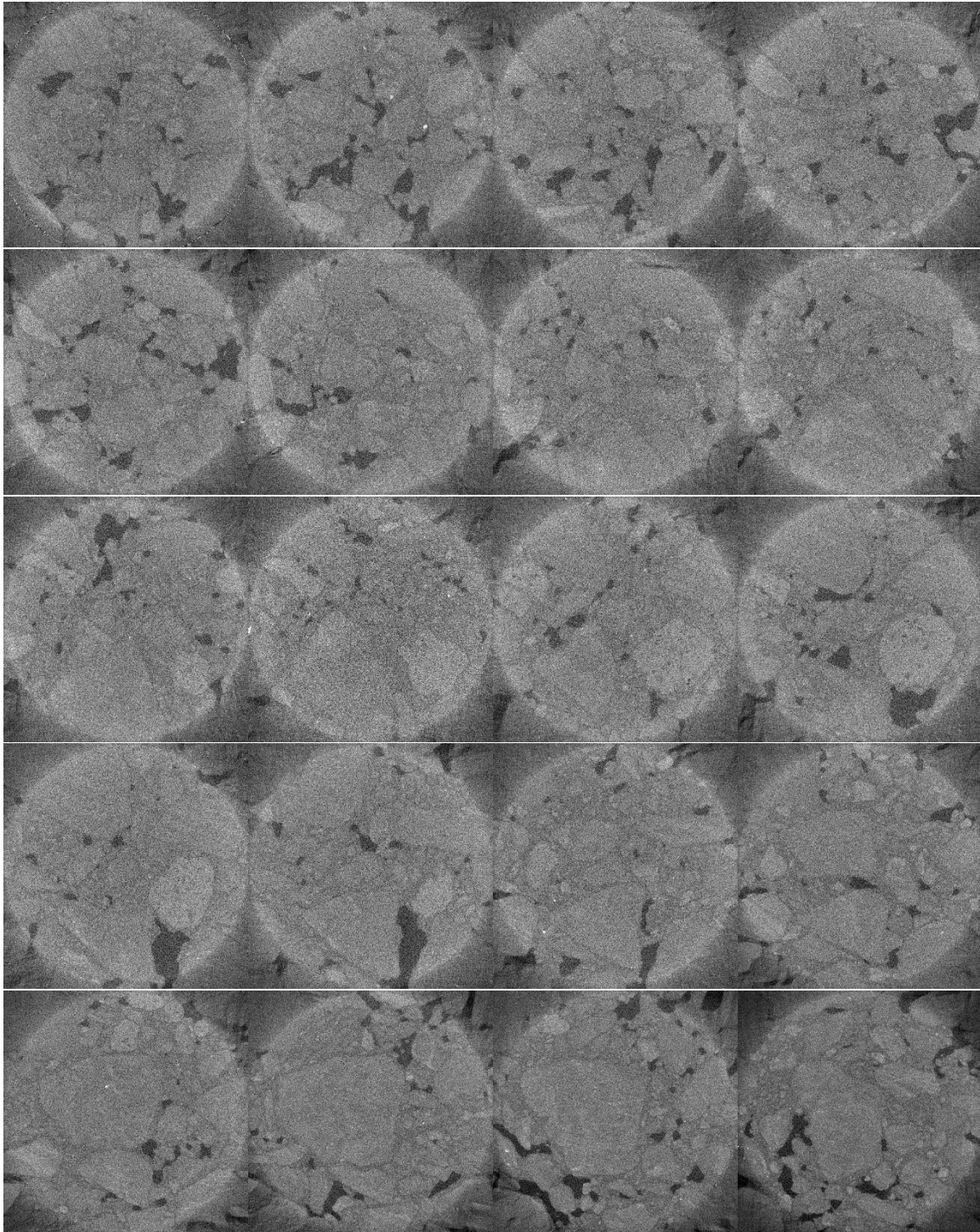
Á Mynd 20 eru sýndar viðeigandi binary sneiðmyndir. Myndirnar voru meðhöndlaðar með dilate/erode síjum. Holrýmishluti var reiknaður fyrir hverja mynd fyrir sig og er gildið gefið fyrir neðan hverja sneiðmynd. Loftmagnið í hverri sneið var frá 0,6 til 6,9 %. Loftmagnið virðist vera mest við yfirborð og botn sýnis, meðaltal 3,1 %. Miðað við upplýsingar frá framleiðanda þá átti loftmangið að vera 4,8 %.



Mynd 20. Binary sneiðmyndir af sýni 5, sneiðar 50 til 1000. Fyrir neðan hverja mynd er gefin númer á sneið og holrýmishluti sýnis.

Sýni 6

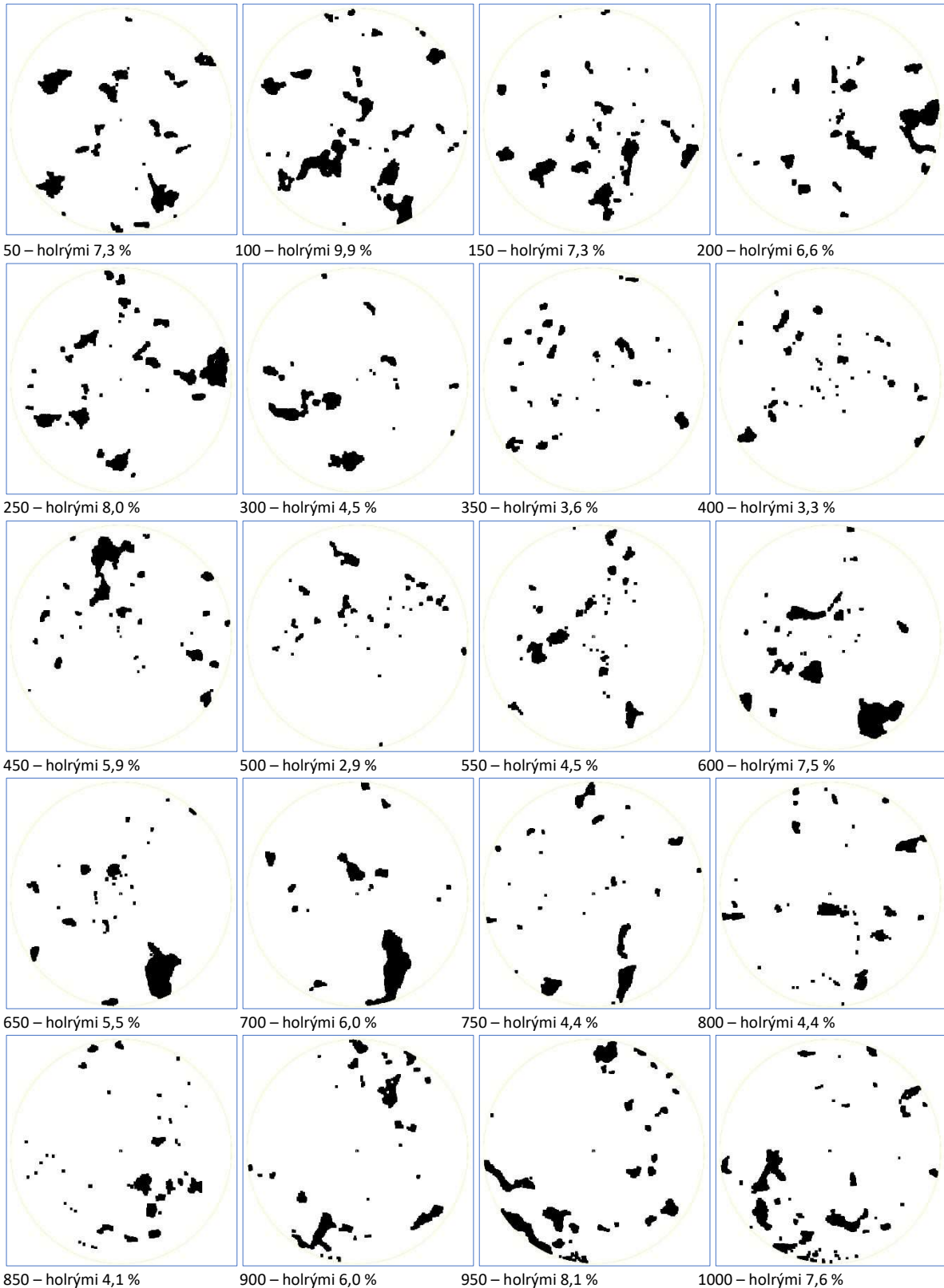
Sýnið var greint í þrívíddarskannanum með 25 micron per voxel/pixel upplausn. Þessari upplausn var hægt að ná með skanna aðeins um helming sýnisins eða sívalning með um 27,9 mm í þvermál. Sýnið var keyrt eins og flest sýni í 116 mínútur. Dæmi um gráskala sneiðmynd úr greiningunni er sýnd á Mynd 21. Á myndinni má sjá hlutann sem var skannaður í meiri upplausn sem ljós gráann.



Mynd 21. Sýni 6. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu frá yfirborði og inn í sýnið frá vinstri til hægri og niður. Sneiðar 50 til 1000, 25 micron á milli sneiða.

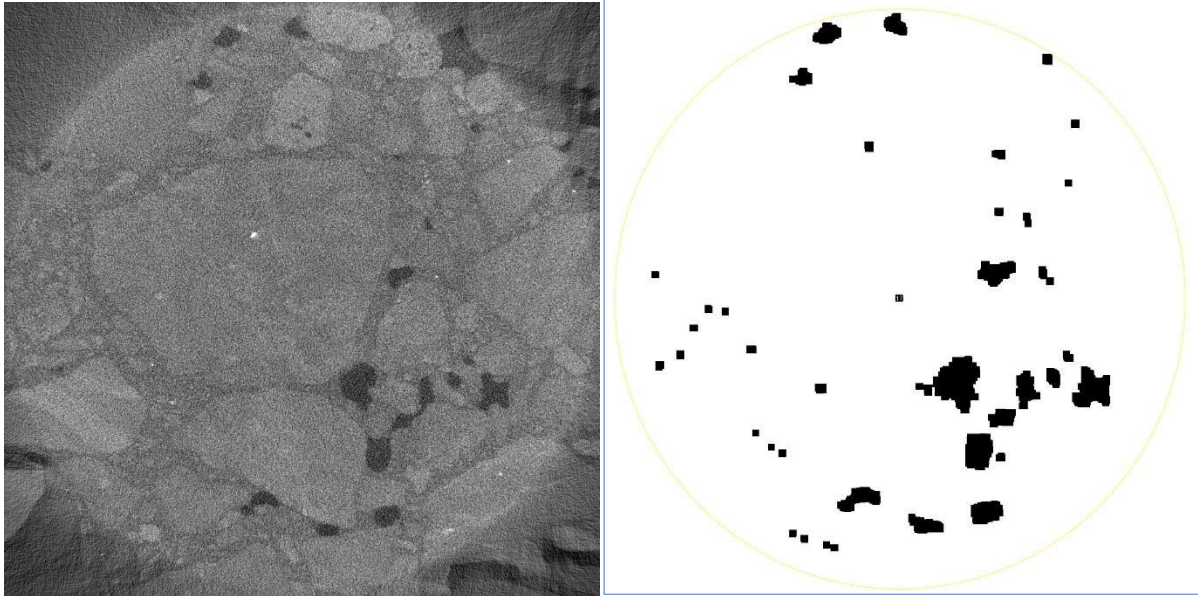


Á Mynd 22 eru sýndar viðeigandi binary sneiðmyndir. Erfitt var að meðhöndla skrána fyrir myndgreiningu vegna þess hve myndirnar voru „grainy“. Myndirnar voru meðhöndlaðar með dilate/erode síjum. Holrýmishluti var reiknaður fyrir hverja mynd fyrir sig og er gildið gefið fyrir neðan hverja sneiðmynd. Loftmagnið í hverri sneið var frá 2,9 til 9,9 %, en loftmagnið virðist vera mest við yfirborð og botn sýnis, meðaltalið reyndist vera um 5,9 %. Miðað við upplýsingar frá framleiðanda þá átti loftmangið að vera 11,9 %.



Mynd 22. Binary sneiðmyndir af sýni 6, sneiðar 50 til 1000. Fyrir neðan hverja mynd er gefin númer á sneið og holrýmishluti sýnis. Ath. gulur hringur sem sést illa afmarkar sýnið í sérhverri sneiðmynd.

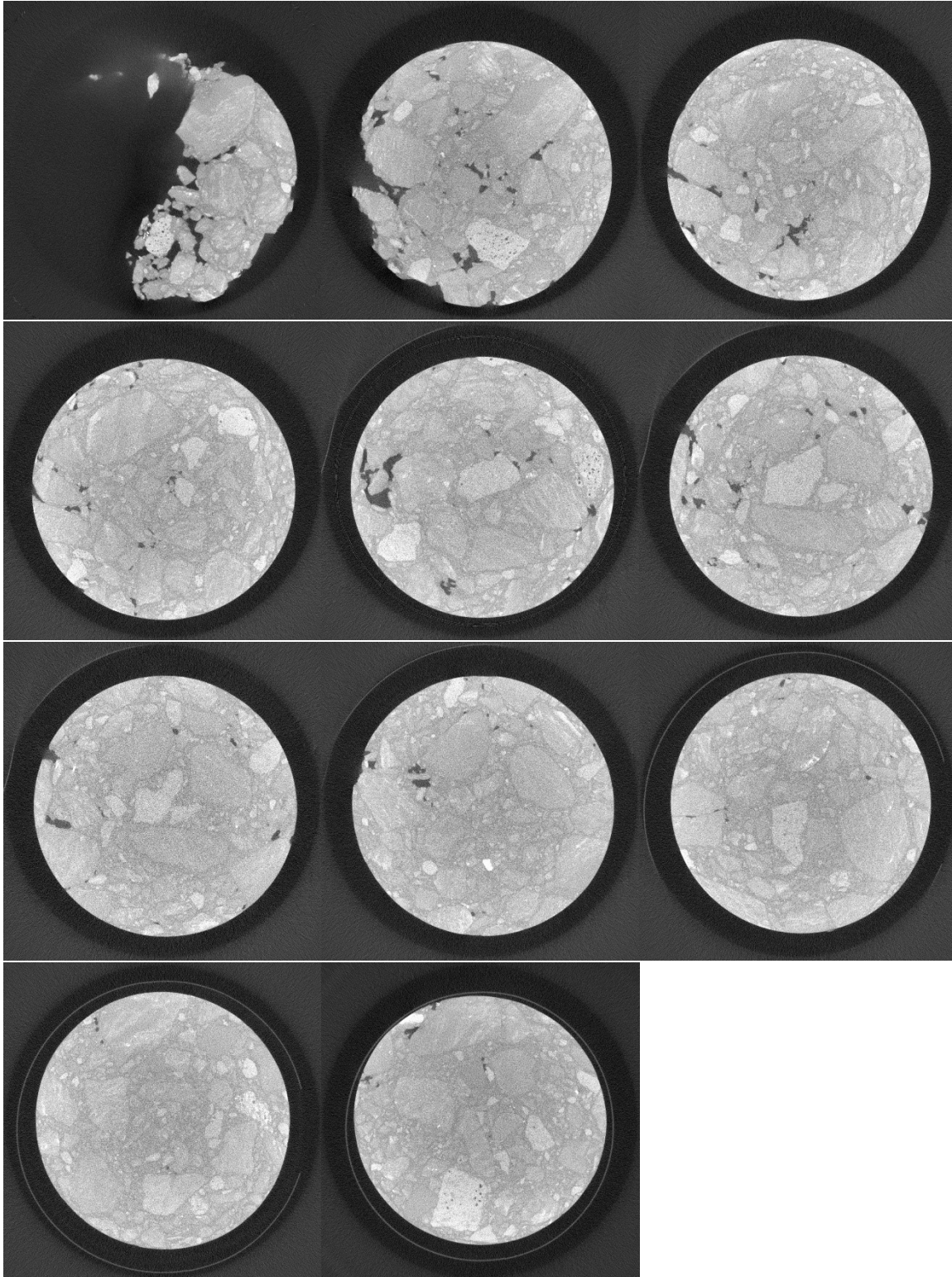
Á Mynd 23 má sjá sneið 850 í meiri stækkun bæði sem gráskala og binary mynd. Greinilega má sjá að í binary ferlinu þá eykst hluti holrýmið (svartur litur).



Mynd 23. Sneið 850 í bæði gráskala og binary í meiri stækkun en á myndum 21 og 22. Sjá má að í binary ferlinu hefur holrýmishlutinn verið ýktur, t.d. litlu dökku boxin á binary sneiðmyndinni til vinstri niðri eru ekki öll holrými.

Sýni P-2

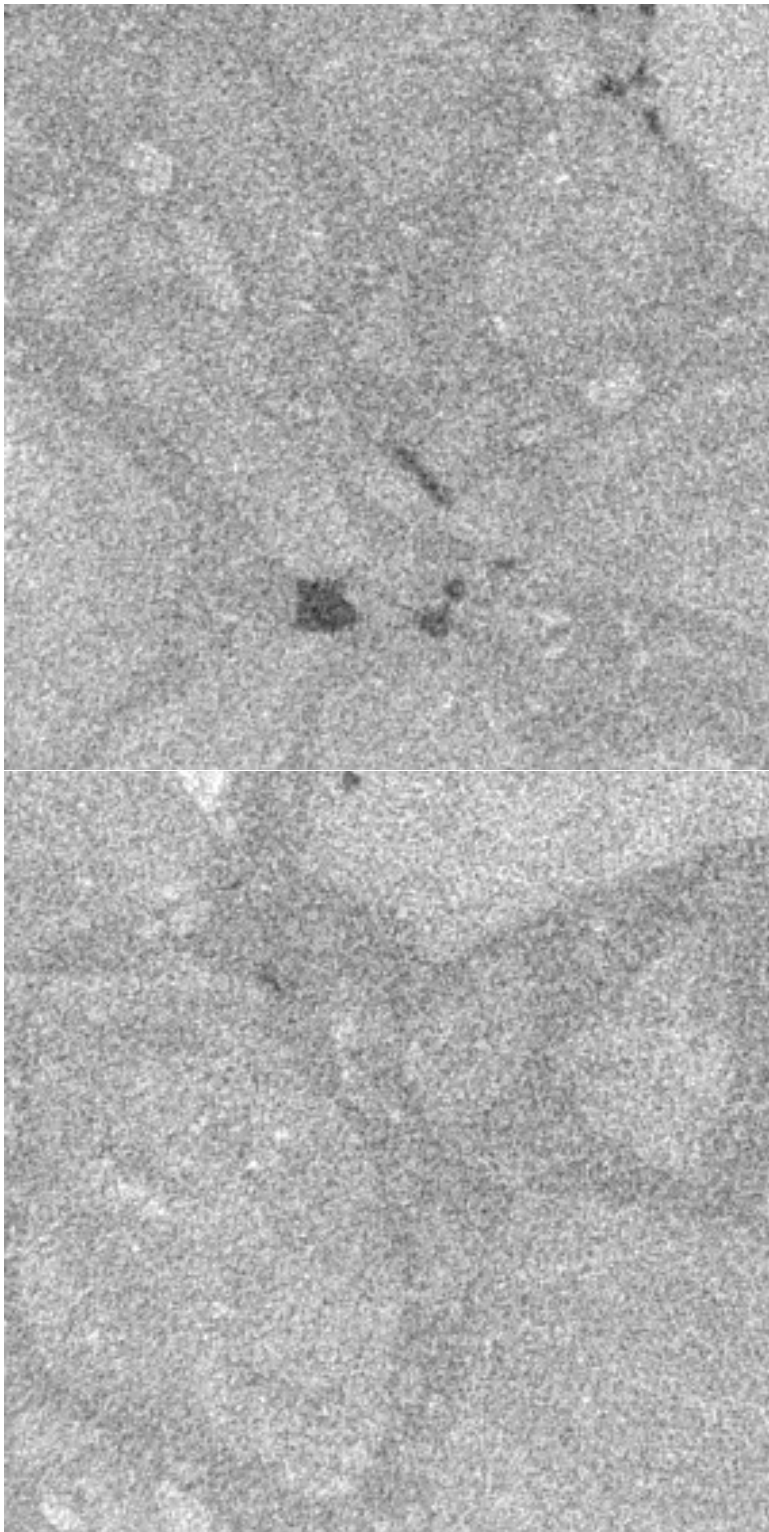
Malbikssýnið var útbúið á rannsóknarstofu NMÍ nú Tæknisetur. Sýnið var keyrt í s.k. hjólfaraprófi, sem hluta af annarri rannsókn. Kjarninn sem var rannsakaður með X-ray tækinu var boraður þannig að u.þ.b. helmingur sýnisins var hluti af hjólfari sem myndaðist í prófuninni þannig að sá hluti var pakkaður meira saman en sá hluti sem var utan þess, sjá Mynd 7. Munur á lengd milli meira og minna pakkaðs sýnis er 5 mm. Markmið með prófuninni var að kanna hvort X-ray greining, greindi mun á bindiefni á milli þessi hluta sem var undir hjólfarinu og þess hluta sem var fyrir utan það. Sýnið var greint í þrívíddarskannanum með 55 micron/pixel (voxel) upplausn. Þessari upplausn var hægt að ná með 116 mín keyrslu í tækinu vegna þess að sýnið var 52 cm í þvermál og um 51 cm á lengd. Dæmi um sneiðmyndir úr greiningunni er sýnd á Mynd 24. Á myndinni eru sýndar gráskala sneiðmyndir af 5,3; 9,6; 13,8; 16,5; 22,0; 26,3; 27,5; 30,3; 38,5; 44,0 og 49,5 mm dýpi. Á fyrstu sneiðinni sem er tekin af 5,3 mm dýpi má sjá hvar skilin milli hjólfarsins og svæðisins þar fyrir utan liggja. Í þeirri stækkun sem Mynd 24 er í er ekki að sjá mun á milli meira og minna pakkaðra svæða.



Mynd 24. Sýni P-2. X-ray gráskala sneiðmyndir af sýninu frá yfirborði og inn í sýnið frá vinstri til hægri og niður af 5,3; 9,6; 13,8; 16,5; 22,0; 26,3; 27,5; 30,3; 38,5; 44,0 og 49,5 mm dýpi. Þvermál um 52 mm. Skilin milli meira og minna pakkaðs sýnis liggja skáhalt upp/niður eftir hverri sneið s.b.r. fyrstu sneiðmyndina.

Á Mynd 25 má sjá mynd af skilunum milli meira og minna þjappaðs efnis í meiri stækkun á sneiðum 300 og 400, skilin milli meira og minna pakkaðs sýnis liggja eins og á mynd 24. Ekki er hægt að greina að bikið sé meira pakkað undir hjólfarinu, til þess er upplausnin ekki nægjanleg í X-ray greiningunni. Ef afmyndun vegna hjólfarsins er jafndreifð yfir lengd sýnisins og afmyndunin er 5 mm per 52 mm eða um

0,1 mm per mm. Upplausnin í myndunum er 55 micron per pixel, u.þ.b. 1 pixel (55 micron) per mm, þannig að upplausnin í greiningunni er ekki nægjanleg til þess að greina mun á milli meira og minna þjappaðs efnis, sem breytingu í þéttleika bindiefnisins.



*Mynd 25. Sýni 6. X-ray gráskala sneiðmyndir af 16,5 og 22,0 mm dýpi, sem liggja yfir mörkin milli svæða, mörkin liggja skáhalt gegnum myndirnar, sbr fyrstu sneiðmynd á mynd 24. Myndirnar eru 15,5*15,5 mm*

Niðurstöður

Á tímabilinu (2021-2022) voru sjö sýni skönnuð og þrívíddarlíkan af þeim öllum byggt upp. Í þessum áfanga var unnið með borkjarnasýni sem höfðu um 50-53 mm þvermál, eitt sýni var með um 61 mm þvermál. Lengd sýnanna var á bilinu frá 34 til 51 mm. Sýnin voru öll keyrð í 116 mínútur fyrir utan eitt sýni sem var keyrt í 70 mínútur. Eitt sýni var með 54 micron/pixel (voxel), eitt 55 micron/pixel (voxel), með þrjú sýni voru með 59,25 micron/pixel (voxel) og tvö sýni voru með 25 micron/pixel (voxel) upplausn. Fimm sýni voru öll keyrð í X-ray greiningunni en aðeins um helmingur af tveimur sýnum voru keyrð í X-ray greiningunni.

Helstu niðurstöður þessarar rannsóknar er að X-ray keyrsla gefur góða myndi af innri uppbyggingu malbikssýna. Einnig er ljóst að með X-ray greiningu virðist vera tiltölulega auðvelt að greina tiltölulega stór fylliefna korn í malbiki. Hægt er að skoða loft dreifingu í viðkomandi sýni. Þar sem fylliefni og holrými greinast mjög vel væri hægt að skoða hvort viðloðun sé góð eða slæm og í því sambandi hvernig ástand á fasaskilssvæðum væri. Svona greiningar greina ekki mun á fínu fylliefni og biki og þær greina ekki mun á aflögun á malbiki eins og á sér stað í hjólfaraprófi. Mjög erfitt yrði að framkvæma magnbundnar greiningar á áðurnefndum þáttum.

Hvað varðar magnbundnar greiningar þá virðist það vera tiltölulega auðvelt að greina holrýmishluta í malbiki. Greiningar með meiri upplausn virðast ekkert bæta greininguna, bæði er sýnið minna, en einnig verða myndirnar erfiðari í meðferð fyrir greiningu (gæti verið háð viðkomandi tæki). Í þessu sambandi ber þess að geta að smátt holrými getur verið ofmetið. Mögulega er X-ray tækið sem var notað gallað þannig að rúmmál af smáu holrýmið verður ofmetið.

Bæta mætti upplausn X-ray greininga þessu tæki með:

- Greina smærri sýni, s.b.r. fyrri áfanga.
- Keyra sýnin lengur – dýrari kostur, sérstaklega ef sýnin væru sambærilega stór og þau voru í þessari rannsókn.
- Nota aðra tækni þ.e. hringhraðal (e. synchrotron - large particle accelerators) til að safna myndum af innri gerð. Gæti verið frekar dýr aðferð.

Þakkarorð

Vegagerðinni er þakkað fyrir fjárstuðning við þetta verk. Heikki Y Suhonen hjá Háskólanum í Helsinki, er þökkuð aðstoð við tomography greiningarnar. Ásbirni Jóhannessyni er þökkuð aðstoð við skýrsluskrif.