



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2024 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning, MINA

Virkning av historisk kullbrenning på jordsmonn og tilvekst i furuskog i Nord-Østerdalen

The effect of historic charcoal production on soil
properties and productivity in pine forests in
Northern Østerdalen

Magnus Barnes Eng

Skogfag

Forord

Denne masteroppgaven er avslutningen og kulminasjonen av fire års studier på Ås. Arbeidet med masteroppgaven, både i felt, på lab og på lesesalen, har vært lærerikt, krevende og givende. Oppgaven min står i gjeld til Asbjørn Ryens historiske arbeid, boka *Kølbrenning, kølkjøring og bosetting fra Narjordet mot Drevsjø* (2020). Mens arbeidet hans er rettet mot den historiske utviklingen i kullbrenninga, og hvordan bosetting fulgte i kjølvannet av dette, fokuserer denne oppgaven på den skogøkologiske effekten av kullbrenning. Takket være arbeidet hans har jeg kunnet knytte historien til Nord-Østerdalen til den internasjonale forskningen på milebunner. Forskning på milebunner er forholdsvis nytt: Raab et al. (2022) skriver at inntil for 10 år siden fikk milebunner nesten ingen oppmerksomhet blant økologer og jordforskere. Likevel er det ikke gjort noen studier på jordsmonn og økologi på milebunner i Norge før denne oppgaven. Mitt håp er at oppgaven kan anspreke forskere i Norge til å vurdere hvilken betydning kullbrenning har hatt på skoglandskapet.

En stor takk rettes til Asbjørn Ryen for hjelpen med oppgaven. I tillegg til det omfattende arkivarbeidet og de arkeologiske undersøkelsene som ligger til grunn for boka, har han kommet med viktige opplysninger om kullbrenning og ledsaget meg i felt. Takk også til Magne Sandtrøen fra Statsforvalteren i Innlandet, som har gitt økonomisk støtte til prosjektet som masteroppgaven inngår i. Takk til Line Tau Strand, som har hjulpet med behandling av jordprøvene. Videre takk til veilederne mine, som har vært til uvurderlig hjelp til feltarbeid, statistikk og skriving. En siste takk rettes til Skogbrukerforeningen NMBU og masterstudentene på skogbrukerlesesalen.

Sammendrag

Skogene i Nord-Østerdalen er forringet som følge av intens utnyttelse av skogressursene i førindustriell tid. Mye tømmer gikk til å produsere trekull til Røros kobberverk, og denne aktiviteten har etterlatt tydelige spor i landskapet. Jordsmonnet som er kraftig forstyrret av kullbrenningsaktiviteten, kalt en milebunn, er blant annet preget av store mengder kullpartikler i jorda. Denne oppgaven undersøkte hvordan jordegenskaper og tilvekst på milebunner skiller seg fra området rundt. Historiske undersøkelser har gjort det mulig å identifisere milebunner med ulike aldre, og denne oppgaven er trolig den første som sammenligner milebunner langs en tidsgradient. Jeg målte pH og C:N-forhold i O-sjiktet, bonitet og grunnflate på 36 milebunner og kontrollflater, med alder siden kullbrenning mellom 372 og 172 år. Videre målte jeg veddensitet og grunnstoffinnhold i veden på et mindre utvalg flater. Resultatene viser en økning i pH på milebunnene, som forklares med tilførsel av aske. pH-økningen i O-sjiktet har vedvart i lang tid, som kan skyldes en varig økning i basemetningsgraden. Boniteten var lavere på milebunnene, som kan skyldes at trærne er mer tørkeutsatt. På den annen side var grunnflaten høyere på milebunnene, som tyder på bedre foryngelsesforhold. Ingen effekt av kullbrenning på veddensitet og grunnstoffinnhold i veden ble funnet. Det var ikke mulig å påvise at alder hadde en effekt på virkningen av kullbrenning, men resultatene antyder at foryngelsesforholdene blir bedre over tid. For å undersøke alderseffekten bør datagrunnlaget inkludere like mange flater for hver alder siden kullbrenning, og inkludere flere lokaliteter. Resultatene forteller at milebunner har endrede jordegenskaper og vekstforhold sammenlignet med nærliggende områder. Det gjenstår ennå å undersøke hvilken effekt kullbrenning har hatt på større romlig skala.

Abstract

The forests of Northern Østerdalen in Central Norway are deteriorated as a result of intensive exploitation in pre-industrial times. Large amounts of timber were used to produce charcoal for the Røros copperworks, and this activity has left clear impressions on the landscape. The soil which is greatly disturbed by the charcoaling, called a charcoal hearth, is marked by large amounts of charcoal in the soil. This thesis researched how soil properties and forest productivity on charcoal hearths differ from the surrounding area. Historical research has made it possible to identify charcoal hearths of different ages, and this thesis is presumably the first to compare charcoal hearths along a gradient of time. I measured pH and C:N-ratio in the O-horizon, site index and basal area on 36 charcoal hearths and control plots, with an age since charcoaling between 372 and 172 years. Further, I measured wood density and wood chemical concentration on a smaller sample of plots. The results show an increase in pH on charcoal hearths, which can be explained by the liming effect of ash. The increase in pH in the O-horizon has persisted over a long time, which might be caused by lasting increase in base saturation. The site index was lower on the charcoal hearths, perhaps as a result of dryer conditions. The basal area, on the other hand, was greater on the charcoal hearths, indicating better conditions for regeneration. No effect of charcoaling was found on wood density or wood chemical concentration. Although an age-dependent effect could not be demonstrated, the results indicate improving regeneration conditions with age. To study the effect of age, the data should ideally include equal numbers of plots for each age since charcoaling, and include more sites. The results show that charcoal hearths have differing soil properties and growth conditions, compared to surrounding areas. There still remains to research what effect charcoaling has had on greater spatial scale.

Innhold

Forord.....	i
Sammendrag.....	ii
Abstract.....	iii
Innledning.....	1
Materiale og metode.....	6
Områdebeskrivelse.....	6
Valg av lokaliteter og flater.....	6
Vegetasjonsbeskrivelse og tremålinger.....	9
Jordprøver.....	10
Laboratoriearbeid.....	11
Statistisk analyse.....	15
Resultater.....	17
Målinger på prøveflaten: pH, C:N-forhold, bonitet og grunnflate.....	17
Målinger på vedprøver.....	20
Kullmengde og kullagtykkelse.....	20
Elektronmikroskopi av kullpartikler.....	21
Diskusjon.....	23
Kullmengde på milebunner.....	31
Resultatenes bidrag til skogforvaltning og forskning.....	32
Konklusjon.....	35
Referanser.....	35
Vedlegg.....	42

Innledning

Skogene i Nord-Østerdalen er svært forringet som følge av intens utnyttelse av skogressursene fra midten av 1600-tallet til ca. 1900. Røros Kobberverk hadde fra 1645 stort behov for trekull til å smelte malm. I 1646 fikk kobberverket privilegier som er kjent som «circumferensen»: innenfor en sirkel med 45 km radius fikk kobberverket rettighet til skog og arbeidskraft. Historiske kilder forteller at området rundt Røros var avskoget bare 25 år etter opprettelsen av smeltehytta (Prøsch-Danielsen & Sørensen, 2010). Senere, i 1683, fikk kobberverket rett til «å forsyne seg av skog uten geografisk begrensning» (Ryen, 2020), fordi det ikke kunne dekke tømmerbehovet innenfor circumferensen. «Etter som skogen ble nedhogd i stadig større omkrets fra bergstaden, var kobberverket hele tida på jakt etter nye områder for kølbrenning.» På grunn av lange avstander fra smeltehytta på Røros til skogen, ble nye smeltehytter opprettet lengre unna Røros.

Pollenanalyser fra innsjøsedimenter nær Røros viser at avskogingen fortsatte i lang tid etter opprettelsen av smeltehytta (Prøsch-Danielsen & Sørensen, 2010). Endret lokalklima etter hogst, mangel på frø, beitetrykk og lokal forurensning fra smeltehyttene kan forklare den dårlige reetableringen av skogen (Nygaard, 2023). Nedgangen i andelen trepollen fortsatte frem til slutten av 1800-tallet, som kan skyldes at forbruket av lokalt tømmer ble erstattet av importert kull på den tiden (Prøsch-Danielsen & Sørensen, 2010). Andelen trepollen har økt siden da, som vitner om en gjenvekst av skogen. Likevel er skoggrensen ennå mange steder redusert med opp til 140 høydemeter, og tidligere grovvokst furuskog er vokst til med bjørkeskog (Ryen, 2020).

På starten av 1900-tallet var Nord-Østerdalen regnet som skogreisningsområde som følge av overutnyttelse tilknyttet gruvedriften (Nygaard, 2023). Omfattende skogreisningstiltak ble iverksatt, som planting og såing. Gran var hovedtreslaget under skogreisningen, men også furu og utenlandske treslag som vrifuru og lerkearter ble satt ut. Noen av bestandene som ble etablert i denne tiden har vært fulgt opp av det som i dag er NIBIO og NMBU, og de kan gi verdifull informasjon om produksjonspotensialet i området, men også om begrensninger for veksten (Nygaard, 2023). NIBIOs skogressurskart SR16 viser at stående volum og treantall (dbh > 10 cm) i høyereliggende skog i Nord-Østerdalen (> 700 moh.) er relativt lave. Stående volum er i størrelsesorden 3-6 m³/daa, mens alle forsøksfeltene for furu i høyereliggende skog i området har stående volum på >20 m³/daa (Nygaard, 2023).

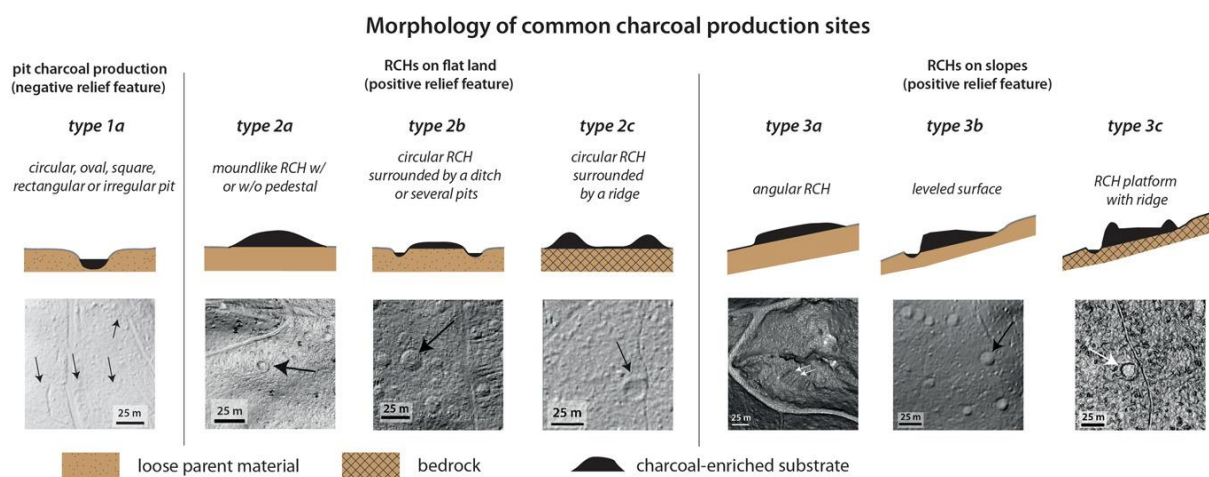
Den relativt lave produktiviteten kan skyldes varige endringer i skogøkologiske forhold som følge av menneskelig aktivitet. Tidligere arealbruk kan påvirke jordsmonnets fysiske og kjemiske egenskaper i lang tid etter at aktiviteten opphørte. I tillegg kan tidligere arealbruk ha betydning for økosystemstrukturer og -prosesser utover det jordsmonnet som er direkte berørt (Schneider et al., 2022). Dette kalles på engelsk «land use legacy». Trekullproduksjon er et eksempel på en arealbruk som historisk har hatt en sterk påvirkning på skogene i Nord-Østerdalen, og det kan ha en effekt ennå i dag, lenge etter at aktiviteten opphørte.



Figur 1: Bilder fra trekullproduksjon i Tyskland (Raab et al., 2022). A og B: Tømmerstokker stablet i en kullmile, før den blir dekket av jord. C: Kullmilen mens den brenner. D: Høsting av kullbiter etter brenning.

Trekull ble produsert av furutømmer i kullmiler, en prosess kalt kullbrenning (Figur 1). Kullmilen brant med begrenset oksygentilgang over mange dager, slik at tømmeret ikke forbrant fullstendig, men ble forkullet (Ryen, 2020). Restene etter en kullmile, hvor jordsmonnet er blitt påvirket, vil heretter bli referert til som 'milebunn' (engelsk: relict charcoal hearths, eller charcoal kiln platforms). Andre termer på norsk, som 'kullbunn',

'kølabonn' eller 'kolbotn' er tidligere blitt brukt. En milering er grøften som ble gravd rundt kullmilen. Milebunnene kan lokaliseres i terrenget ved å studere terrengmodeller fra LiDAR-målinger (jf. Figur 2), og ved kullrestene som finnes i jorda (Johanis et al., 2022).



Figur 2: Illustrasjon av typiske former på milebunnen og hvordan de ser ut i en digital terrengmodell. Type 1a (kullgrop) og 2c (milebunn etter kullmile) er funnet i Norge av Risbol et al. (2013) (Hirsch et al., 2020).

Milebunner kan forekomme enkeltvis eller aggregert i klynger (Johanis et al., 2022). Grunnen til at milebunner forekommer aggregert er at et større skogområde ble hogget på en gang, slik at flere kullmiler kunne brennes samtidig, og at kullet skulle transporteres på kjerrevei. Schneider et al. (2022) har undersøkt forekomsten av milebunner nær et industriområde i Nord-Tyskland, og fant at de fleste milebunnene befant seg i grupper med høy tetthet. Tettheten til milebunner i et skogområde varierer, så andelen av skogarealet som består av milebunner er avhengig av hvilken skala man undersøker. I en region der milebunner i gjennomsnitt utgjorde 0,9% av skogarealet, kunne opptil 17,8% av et skogareal på 1 ha utgjøres av milebunner, mens opptil 5,4% av et skogareal på 25 ha var milebunner. Det betyr at milebunner kan utgjøre en stor andel av arealet i enkelte bestand i nærheten av industriområder.

Ryen (2020) har med grunnlag i Rørosmuseets protokoller over kullleveringer og Statsarkivene i Trondheim og Hamar beskrevet kullbrenning i Røros kobberverks historie. Beskrivelsene av kullbrenningsteknikken forteller hvordan jordsmonnet på milebunnen er forstyrret. Milebunnen ble opparbeidet ved å fjerne torvlaget, fordi denne bidro til fuktighet. Hvis jorda var for løs, ble den blandet med silt eller leire; hvis den var for fast, ble den blandet

med sand. Dette var for å regulere lufttilgangen, slik at kullbrenningen ga høyt kullutbytte av veden, samtidig som kullmilen ikke sto i fare for å slukke. Milebunnen ble gjerne dekket med rester av en tidligere kullmile, en blanding av «torv, jord, småkøl, og aske». Milebunnen ble brukt om igjen så fremt det var mulig. På fuktige steder ble en grøft, ca. 0,5 m dyp, gravd rundt milen, men andre steder ble enkeltvis dreneringshull gravd, og noen steder var ingen graving nødvendig (Ryen, 2022b).

Jordsmonnet på milebunnen er altså utsatt for store antropogene forstyrrelser: torvlaget ble fjernet, mineralpartikler ble blandet med jorda, og en grøft rundt milebunnen ble gravet. I tillegg ble jordoverflaten brent, og kullrester fra kullbrenningen ble igjen i jorda. Studier av jordsmonn på milebunner bekrefter at milejord har endrede fysiske egenskaper, sammenlignet med ubrent jord. Ifølge Raab et al. (2022) er den mest fremtredende egenskapen lav jordtetthet og høy porøsitet. Dette påvirker vannretensjon og vanninfiltrasjon og varmeledning. I følge Schneider et al. (2020) tørker jorda på milebunner lettere ut, og fylles lettere med vann, som følge av større volum grove porer. Schneider et al. (2019) påviste redusert varmeledning på milebunner som følge av økt porøsitet, som fører til raskere oppvarming og nedkjøling av øvre jordlag (med høyere kullinnhold), mens dypere jordlag opplever mindre temperaturvariasjon på milebunner, sammenlignet med ubrent jord.

Endringer i kjemiske egenskaper er også påvist i tidligere studier. Høyere innhold av flere plantenæringsstoffer i jord på milebunner ble påvist i barskog av Eriksson og Lundin (2021), Buras et al. (2020) og Lasota et al. (2021), og i temperert løvskog av Mastrodonato et al. (2019). Høyere pH på milebunner er påvist i temperert og boreal skog i flere studier (blant annet Carrari et al., 2016; Eriksson & Lundin, 2021; Hardy et al., 2016; Lasota et al., 2021; Young et al., 1996). Hardy et al. (2016) og Carrari et al. (2016) påviste også høyere C:N-forhold i øverste jordlag på milebunner. De varige endringene i jordegenskaper gjør at jord på milebunner ifølge IUSS Working Group WRB (2022) klassifiseres som en egen jordtype, «spolic technosol».

Det er dermed grunn til å forvente at milebunner har endrede jordegenskaper i forhold til ubrent jord, og at dette kan påvirke vekstforholdene. Det er utført få studier på vegetasjon og økologi på milebunner, sammenlignet med studier av jordegenskapene (Raab et al., 2022). Ulike studier har funnet ulike effekter av milebunner på trærnes vekst. Redusert diametervekst på milebunner, sammenlignet med området rundt, ble funnet av Buras et al.

(2020) og Mikan og Abrams (1995), mens Johanis et al. (2022) og Mastrolonardo et al. (2019) fant ingen forskjell i diametertilvekst. Mens Johanis et al. (2022) fant mindre variasjon i diametertilveksten fra år til år hos trærne på milebunner, fant Buras et al. (2020) ingen forskjell i vekstmønsteret. Lavere treantall på milebunner er funnet av flere studier (Carrari et al., 2017; Mikan & Abrams, 1995). Til tross for økt innhold av plantenæringsstoffer på milebunner, fant Buras et al. (2020) redusert tilvekst, mens Mastrolonardo et al. (2019) fant ingen forskjell i trærnes vekst på milebunner. Økt innhold av grunnstoffer som kalsium, jern, kalium og mangan i veden, og lavere veddensitet ble funnet på milebunner av Buras et al. (2020).

Akkumuleringen av trekull i jorda på milebunner gjør dem relevante for å studere langtidsvirkningen av biokullbehandling av jord (Mastrolonardo et al., 2019). Det er betydelig interesse for bruk av biokull innen jordbruket og skogbruket (Thomas & Gale, 2015). Meta-analysen deres avdekket at biokullbehandling fremmer veksten til trær i en rekke økosystemtyper, og at virkningen av biokull avtar over tid. Men de fleste studiene som inngår i meta-analysen er kortvarige (<6 måneder) studier av potteplanter. Siden biokull i jord er svært bestandig, er det viktig å undersøke de langsiktige virkningene på jordsmonnet (Mastrolonardo et al., 2019). Biokullforsøk er ikke egnet for å studere dette, fordi det er et forholdsvis nytt forskningsfelt, og forsøkene har en varighet på noen få år på det meste. Studier av milebunner kan avdekke hvilken virkning kull har på jordsmonnet lang tid etter tilførselen. Siden kullbrenning foregikk over lang tid, er det mulig å studere milebunner av ulik alder for undersøke hvordan virkningen av kull endres over tid. Dette kalles rom-for-tid substitusjon.

Målet med denne oppgaven er å undersøke den skogøkologiske effekten av kullbrenning. Jeg undersøkte vegetasjon og jordsmonn på milebunner og sammenlignet med tilsvarende areal uten kullbrenning. Arbeidet til Ryen (2020) har gjort det mulig å samle et utvalg kullmiler med ulike aldre, slik at jeg kunne undersøke alderseffekten. Målet var å klarlegge hvilken varig virkning kullbrenning har hatt på skogøkosystemet i Nord-Østerdalen, og samtidig bidra til økt kunnskap om langtidsvirkningen av kull i jorda.

Oppgaven skal teste følgende hypoteser:

- i) Kullbrenning har gitt jordsmonnet økt C:N-forhold og økt pH.
- ii) Kullbrenning har ført til redusert skogproduksjon, målt som H40-bonitet og grunnflate.
- iii) Trær som vokser på milebunner har redusert veddensitet og økt innhold av grunnstoffer i veden.
- iv) Virkningen av kullbrenning på jordegenskaper, skogproduksjon og vedegenskaper er avhengig av alder på milene.

I tillegg var det et mål om å klarlegge hvor mye kull milebunner inneholder, og hvordan kullpartiklene reagerer på langvarig lagring i jord.

Materiale og metode

Områdebeskrivelse

Studieområdet ligger i Innlandet og Trøndelag fylker, i et område fra Røros til Drevsjø i Engerdal kommune (Figur 3). Prøveflatene ligger i furudominert skog med lav til middels bonitet. Noen flater hadde innslag av bjørk og gran. Prøveflatene ligger i høydeler mellom 600 og 800 moh (Tabell 1). Feltarbeidet ble gjennomført i juli og august 2022.

Valg av lokaliteter og flater

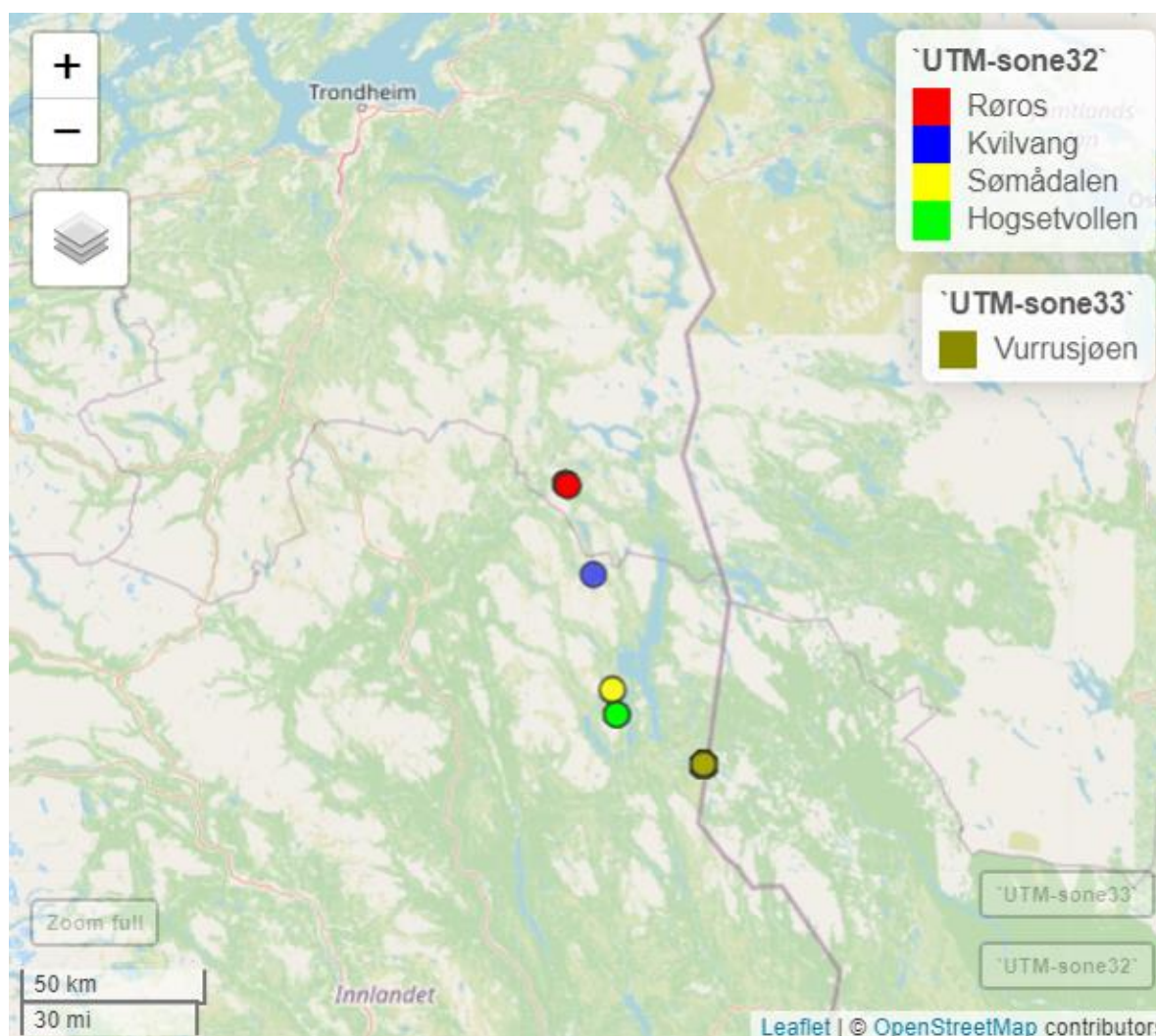
Metoden for å undersøke effekten av kullbrenning er å sammenligne en gruppe prøveflater med kullbrenning (milebunnene), med en gruppe flater uten kullbrenning (kontrollflatene).

Ryen (2020) har i sitt historiske arbeide koordinatfestet mange milebunner etter gamle kullmiler i Nord-Østerdalen og rundt Femunden. På bakgrunn av hans arbeid og samtaler med ham, ble det gjort et utvalg av lokaliteter for milebunner til denne oppgaven (Ryen, 2022a). Lokalitetene (Figur 3) representerte ulike tidspunkter for kullbrenning (Tabell 1). Datering er begrunnet i en kulleveranse fra lokaliteten i årstallet. Lokalitetene hadde kulleveranser i flere år etter hverandre, så det nøyaktige årstallet for hver milebunn kunne ikke bestemmes. For lokaliteten Vurrusjøen forteller Ryen (2020) at det var kulleveranser derfra mellom 1841 og 1896. Alderen i brysthøyde til trærne på milebunnene tyder på at trærne spiret mellom ca. 1820 og 1830, så lokaliteten ble datert til 1822, året Drevsjø smeltehytte startet driften.

Tabell 1: Miljøbeskrivelse av studieområdet og prøveflatene. Årstall: Antatt tidspunkt for kullbrenning. Flateareal: Arealet til milebunnen på flaten, avrundet til nærmeste hele 10 kvadratmeter. Temperaturspenn: (Årlig max - min °C). Kvartalmiddeltemperatur: Middeltemperatur i varmeste kvartal. Bioklimatiske data hentet fra WorldClim.org.

				Vegetasjonstype		Mose- /lavdominans		Tempera- turspenn (°C)	Årlig middel- tempera- tur (°C)	Kvartal- middel- tempera- tur (°C)	Årlig nedbør (mm)	Høyde over havet (m)
Lokalitet	Årstall	Flate- areal	SR16- bonitet	Kontroll	Mile	Kontroll	Mile					
Røros	1650	200	11	Bærlyng	Bærlyng	Mose	Mose	31,7	0,5	10,7	552	645
Røros	1650	150	8	Lyngskog	Lyngskog	Mose	Mose	31,7	0,5	10,7	552	646
Røros	1650	130	8	Lyngskog	Lyngskog	Mose	Mose	31,7	0,5	10,7	552	652
Røros	1650	280	11	Blåbær	Blåbær	Lav	Lav	31,2	0,2	10,3	607	670
Røros	1650	150	11	Bærlyng	Bærlyng	Mose	Mose	31,2	0,2	10,3	607	668
Røros	1650	250	8	Blåbær	Blåbær	Mose	Mose	31,2	0,2	10,3	607	654
Røros	1650	200	11	Lyngskog	Lyngskog	Mose	Mose	31,2	0,2	10,3	607	657
Røros	1650	200	8	Lyngskog	Lyngskog	Mose	Mose	31,2	0,2	10,3	607	673
Kvilvang	1700	110	6	Bærlyng	Bærlyng	Lav	Lav	32	0,1	10,4	620	775
Sømådalen	1750	100	8	Bærlyng	Bærlyng	Mose	Mose	33,6	0,4	11	615	677
Sømådalen	1750	100	11	Bærlyng	Bærlyng	Mose	Mose	33,5	0,4	11,1	610	677
Vurusjøen	1822	100	8	Blåbær	Blåbær	Mose	Mose	33,5	0,3	11	623	675
Vurusjøen	1822	100	8	Bærlyng	Lyngskog	Lav	Lav	33,5	0,3	10,9	625	675
Vurusjøen	1822	80	8	Blåbær	Bærlyng	Mose	Mose	33,5	0,3	10,9	625	677
Hogsetvollen	1850	50	8	Lavskog	Lavskog	Lav	Lav	33,9	0,5	11,2	612	674
Hogsetvollen	1850	100	8	Lyngskog	Lyngskog	Lav	Lav	33,7	0,3	11,1	623	668
Hogsetvollen	1850	100	8	Lyngskog	Lyngskog	Mose	Mose	33,7	0,3	11,1	623	679
Hogsetvollen	1850	110	8	Bærlyng	Bærlyng	Lav	Lav	33,7	0,3	11,1	625	677

Ved å bruke en digital terrengmodell (Kartverket, 2012) fant jeg flere milebunner innenfor lokaliteten. I følge inndelingen til Hirsch et al. (2020) var milebunnene av typen 2b, med en tydelig milering/grøft som var synlig i terrengmodellen (jf. Figur 2). Jeg antok med støtte i Ryen (2020) at milebunner i samme lokalitet hadde tilnærmet samme alder. Milebunnene ligger i fem lokaliteter, som hver representerer et tidspunkt for kullbrenning. Lokalitetene utgjør dermed en tidsgradient, fra 1650 til 1850 (Tabell 1). Par av milebunn og den tilhørende kontrollflaten utgjør et prøvested innenfor lokaliteten.



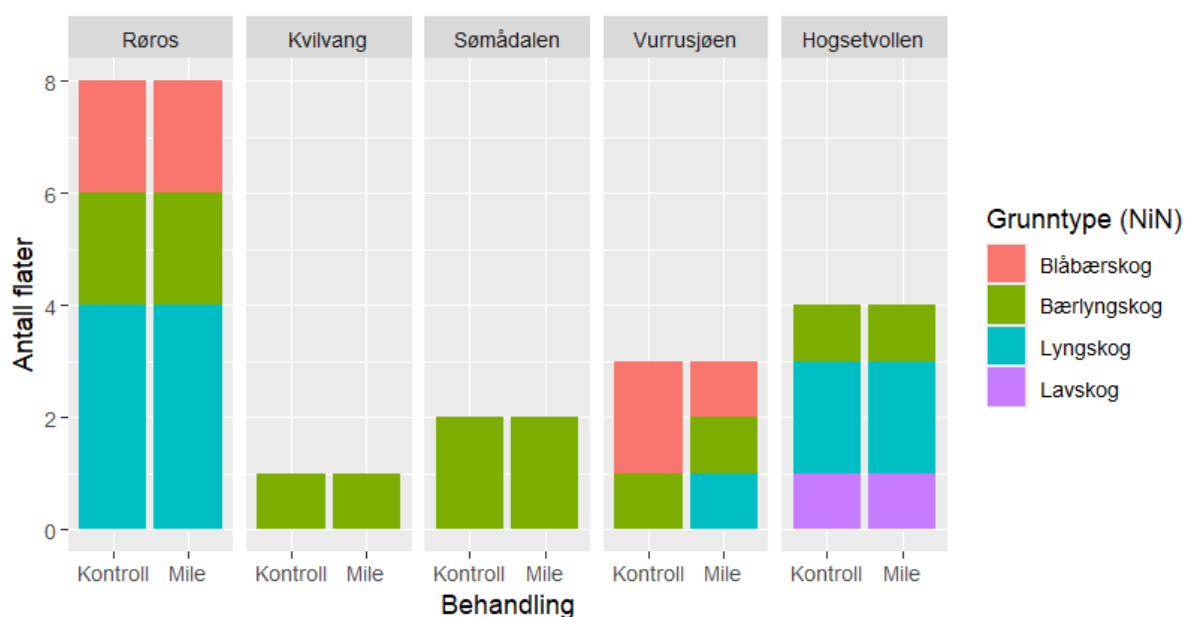
Figur 3: Kart over hvor lokalitetene ligger.

Mileringene fra terrengmodellen ble lokalisert i felt. Hvis det ikke ble påvist kull i jorda, ble de forkastet som flater. Milebunner uten furutrær, og milebunner tydelig påvirket av annen menneskelig aktivitet (hogst, veier osv) ble forkastet. Milebunnens koordinater og høyde over havet ble registrert i felt med Garmin GPS.

Hver milebunn ble regnet som en sirkulær prøveflate, der milediameter ble målt med Vertex og avrundet til nærmeste meter. Ved hver milebunn ble det anlagt en sirkulær kontrollprøveflate med samme størrelse. Kontrollflaten skulle være uten synlig kull i jorda, ha lignende helning som milebunnen, og ha tilnærmet lignende vegetasjon, for å unngå småskala forskjeller i vekstforhold. Milediameter ble målt på terrengmodellen hvis den ikke ble målt i felt.

Vegetasjonsbeskrivelse og tremålinger

På hver flate, både kontroll og milebunn, ble dominerende bakkevegetasjon visuelt bedømt (Figur 4). Registrering av vegetasjonstypene fulgte Larsson (2000), og ble i etterkant tilordnet grunnstypene blåbærskog, bærlyngskog, lyngskog og lavskog i NiN (Granhus et al., 2016). I tillegg registrerte jeg om moser eller lav dominerte bunnsjiktet på flaten. Hvis mose-/lavdominans ikke ble registrert i felt, ga jeg flatene en sannsynlig verdi, basert på vegetasjonstypen. Diameter i brysthøyde (dbh) ble målt med klave (nøyaktighet 1 mm) på alle trær grovere enn 2 cm i brysthøyde. Den grøvste feilfrie furuen ble valgt som boniteringstre, og ble høydemålt med Vertex og boret med tilvekstbor for å ta årringprøve. Årringprøven fra boniteringstreet ble også brukt til måling av veddensitet og grunnstoffinnhold (se under). Boniteten fra skogressurskartet (SR16) (Kilden, 2023) ble hentet for koordinatene til hvert prøvested, og er antatt lik for mileflaten og kontrollflaten.



Figur 4: Antall flater fra hver lokalitet, og deres vegetasjonstype (etter NiNs grunntyper).

Jordprøver

På hver flate ble jordprøver tatt tre ulike steder med et hulbor med indre diameter 60 mm. Dersom et jordprøvestikk traff på stein eller andre hindringer i jorda, ble det stikket forkastet og et nytt stikk tatt. Jordprøven ble lagt ut på et plastunderlag, og sjikttykkelsen ble målt i cm (Figur 5). Sjiktene ble skilt fra hverandre og oppbevart i plastposer. Prøver fra samme sjikt på flaten ble blandet sammen. O-sjiktets tykkelse ble målt uten levende vegetasjon. Jordprøvene ble oppbevart på fryselager fra august 2022 til mars 2023. Jordsjiktclassifisering fulgte beskrivelsen i Tabell 2.



Figur 5: Et eksempel på en milebunn fra lokaliteten Vurrusjøen (prøvested 3, jf. Tabell 1). Venstre: Den røde buen viser hvor mileringen/grøften rundt milebunnen går. Høyre: En jordprøve fra samme milebunn. De røde strekene viser sjiktgrensene. Navnet på sjiktene (jf. Tabell 2) er oppgitt ved siden av jordprofilet.

Tabell 2: Beskrivelse av jordsjiktene som ble benyttet i studiet. Sjiktene K, Ek1 og Ek2 forekommer bare på milebunner, men ikke alle sjiktene ble registrert på hver milebunn. Rekkefølgen i tabellen følger det som ble observert i jordprøvene.

Sjikt	Beskrivelse
O	Samlet LFH (strø, formolding, humus). Tykkelsen ble målt uten levende vegetasjon.
K	Sjikt som består nesten utelukkende av kullbiter.
Ek1	Øverste 5 cm av elluvial-sjikt som består av mineraljord med betydelig kullbit-innhold.
Ek2	Dypere del av elluvial-sjikt med betydelig kullbit-innhold.
Eu	Eluvial-sjikt uten kull.
B	Anrikningssjikt under E-sjikt.

Laboratoriearbeid

Årringprøver:

Jeg målte årringbredde ved å se på borprøven fra boniteringstreet med lupe (LinTab tree-ring measurement station). Jeg målte avstanden fra slutten på sommerveden til begynnelsen på vårveden i hvert år, med retning fra barken til marginen. Borprøven ble skrudd fast til en ramme, og så ble en side skåret flat med tapetkniv for å gjøre det lettere å studere årringene i lupe. Overflaten ble smurt inn med sinkhvitt for å gjøre forskjellen mellom vår- og sommerved tydeligere (Storaunet, 2023). Noen av borprøvene ble brutt i to eller flere biter da de ble skåret flate. Disse bitene ble plassert tett inntil hverandre i rammen, slik at bruddet ble antatt å ikke påvirke avstanden mellom årringene. Hvis årringene var skjeve, som følge av at borprøven ikke traff marginen, ble årringbredden målt vinkelrett på årringen. Årringbredden ble målt ved å bevege rammen med borprøven langsomt fra en årring til en annen, og avstanden rammen beveget seg ble notert av dataprogrammet TSAP-Win tilknyttet lupen (Figur 6). Grensen mellom årringene ble vurdert visuelt i lupen. Nøyaktigheten på målingene var 0,001 mm. Antallet årringer ga brysthøydealderen til hvert tre.



Figur 6: Måling av årringbredde med lupe. Bilde: Per Holm Nygaard.

For å måle veddensiteten til borprøvene veide jeg borprøvene (nøyaktighet 0,001 g) og delte på volumet til borprøvene. Fordi borprøvene hadde uregelmessig form, da de var blitt høvlet før årringbreddemålingen, kunne ikke volumet beregnes av prøvenes diameter og lengde. Volumet ble målt ved å dyppe borprøvene i et kar med vann. Vektøkningen utgjør vekten til vannet som blir fordrevet av borprøvens volum. Ved å dele vektøkningen på vannets tetthet kommer man frem til borprøvens volum (nøyaktighet 0,01 cm³). Veddensitet ble målt på alle borprøvene (35 prøver), men grunnet feil i filbehandling som førte til tap av data, ble bare 18 prøver inkludert i analysen.

Innholdet av grunnstoffer i et utvalg vedprøver ble målt: 3 tilfeldige milebunn-kontroll-par fra Røros (årstall for kullbrenning: 1650) og 3 tilfeldige par fra Hogsetvollen (Årstall: 1850). Hensikten var å undersøke effekten av kullbrenning på innholdet av utvalgte grunnstoffer, og undersøke om effekten er alderspåvirket. De 20 ytterste årringene, som utgjør årene 2003-2022, ble kjemisk analysert for innhold av Ca (kalsium), Fe (jern), K (kalium) og Mn (mangan). Metoden for grunnstoffbestemmelse var ICP-OES (Inductively Coupled Plasma – Optical Emissions Spectrometry) etter Ogner et al. (1999).

Jordprøver

Alle jordprøvene ble tørket i tørkeskap ved temperatur 35-40 °C, og siktet med 2 mm sikt. Torrvekten til finjorda (<2 mm) og grovmassen (>2 mm) ble veid (nøyaktighet 0,1 g). Større kullbiter fra hver lokalitet ble plukket ut til elektronmikroskopi. Prøvene ble oppbevart i pappesker ved romtemperatur fra mars 2023 til januar 2024.

pH og C:N-forhold ble målt i O-sjiktet på flatene. O-sjiktprøvene fra samme flate ble slått sammen i felt, så én verdi ble målt per flate. Etter forbehandling ble finjorda i prøven finmalt i kulemølle. Jeg fylte et 50 ml beger med jord og kjørte kulemøllen i 2 min med frekvens 20 s⁻¹. Kulemøllen ble rengjort med varmt vann og sprit mellom hver jordprøve.

For å måle pH ble 2,0±0,1 g finmalt jord veid inn i et glassrør og tilsatt 10 ml destillert vann, etter Gauslaa et al. (2020). Standardmetoden ISO 10390 for å måle pH (H₂O) i jord bruker et volum:volum-forhold (International Organization for Standardization, 2021). pH-måling med et masse:volum-forhold gir nesten samme verdier som å bruke et volum:volum-forhold, i følge en sammenligning av metodene på mineraljord (Utermann, u.å.). Jeg brukte 1,5±0,1 g finmalt jord og 7,5 ml destillert vann hvis jeg ikke hadde nok finmalt jord, som gir det samme forholdet mellom jord og vann. Prøvene ble først ristet med vortex for å blande vann og jord, og så lagt på ristebrett i 90 minutter med frekvens 200 min⁻¹. Før pH-måling ble prøvene igjen ristet med vortex. Deretter ble pH målt med en SenTix-elektrode, knyttet til en WTW Inolab 720 pH-måler. Elektroden var kalibrert med bufferløsninger med pH 7 og 4 fra Metrohm. Elektroden ble skylt med destillert vann mellom hver jordprøve.

For å måle C:N-forhold ble 5,0±0,5 mg finmalt jord veid inn i et tinnskip. Tinnskipet med jord ble forseglet og lagt i plastbeger. Spatelen som ble brukt til å veie inn jord ble tørket av på papir mellom hver jordprøve. C:N-forhold ble målt med en elementar vario EL cube.

For å anslå kullmengde på milebunnene ble én prøve av de tre kullpåvirkede jordsjiktene, i tillegg til mineraljordsjiktet uten kullpåvirkning, valgt ut (Tabell 3). Kullmengde ble målt for fraksjonene finjord og grovmasse hver for seg. Metoden for å måle kullmengde i jordprøvene fulgte Haukenes (2024). Hele jordprøven ble veid, og ca. 20% av jordprøven (på vektbasis) ble lagt på en petriskål. Kullpartikler ble skilt fra mineralpartikler og annet materiale og lagt i en egen skål, og massen i skålen ble veid (nøyaktighet 0,01 g). Jeg brukte 30 minutter per prøve på å skille ut kullpartikler. Hvis en jordprøve hovedsakelig besto av kullpartikler valgte

jeg å plukke ut andre partikler, og veie den gjenstående jordmengden. Jeg regnet ut hvor mye kull det var i hele jordprøven, og satte det i forhold til sjikttykkelsen. Med et forholdstall for kullmengde og sjikttykkelse kunne jeg dermed estimere kullmengde i alle sjiktene. Estimatet på kullmengde brukte verdiene i Tabell 3 for sjiktene Ek1, Ek2, og K. For sjiktene O, Eu og B ble kullmengde antatt å være 0.

I estimeringen av kullmengde på flater ble kullmengden i sjiktet Eu regnet for å være 0, selv om prøven inneholdt kullpartikler (Tabell 3). Etersom hele tykkelsen til Eu-sjiktet ikke ble målt på alle flater (siden hulboret ikke alltid gikk dypt nok), er det ikke mulig å gjøre beregninger for den fullstendige tykkelsen til sjiktet for alle flater. I tillegg inneholder antagelig Eu-sjiktet bare kullpartikler i overgangen mellom Eu og det kullholdige sjiktet ovenfor, så kullmengden i sjiktet er uavhengig av tykkelsen til sjiktet. Estimatenes for kullmengde på milebunnene inkluderer altså kun sjiktene K, Ek1 og Ek2.

Tabell 3: *Målinger for estimering av kullmengde på milebunnene. Se Tabell 2 for beskrivelse av sjiktene. Sjikttykkelse: Gjennomsnitt for de tre prøvene fra samme flate (cm). Kullmengde i prøven: Massen til kullpartikler i jordprøven (oppgitt for finjord og for grovmasse, og samlet for sjiktet). % kull: Andel av massen i jordprøven som utgjøres av kullpartikler. Kullmengde på milebunnen (kg m⁻²): Estimat på hvor mye kull som befinner seg i sjiktet på 1 kvadratmeter av milebunnen. Beregnet ut ifra tykkelsen på sjiktet og størrelsen på hulboråpningen.*

Sjikt	Prøvested (innen lokalitet Røros)	Sjikttykkelse (cm)	Kullmengde i prøven (g)			% kull (vektbasis)	Kullmende på milebunnen (kg m ²)
			Fin (<2 mm)	Grov (>2 mm)	Samlet		
Eu	1	2,7	0,9	2,5	3,4	0,87	1,2
Ek1	1	5,0	2,8	51,9	54,7	15,1	19,3
Ek2	1	12,7	1,6	116,0	117,6	21,1	41,6
K	4	0,7	18,2	10,5	28,7	88,3	10,3

Elektronmikroskopi av kullpartikler

En kullpartikkel fra hvert årstall og hver lokalitet (Tabell 1) ble valgt ut til elektronmikroskopi for å undersøke overflatestruktur. I tillegg ble en fersk biokullpartikkel av furu undersøkt som sammenligningsgrunnlag. Overflatebilder av partiklene med lav forstørrelse ble tatt ved lavt vakuum med variable pressure sekundær elektron detektor på Imaging Centre på NMBU (Hermansen, 2024). Bilder med større forstørrelse og oppløsning ble tatt ved høyt vakuum, med en Everhart-Thornley detektor. Til dette ble partiklene dekket med et 80 nm tykt lag med platina.

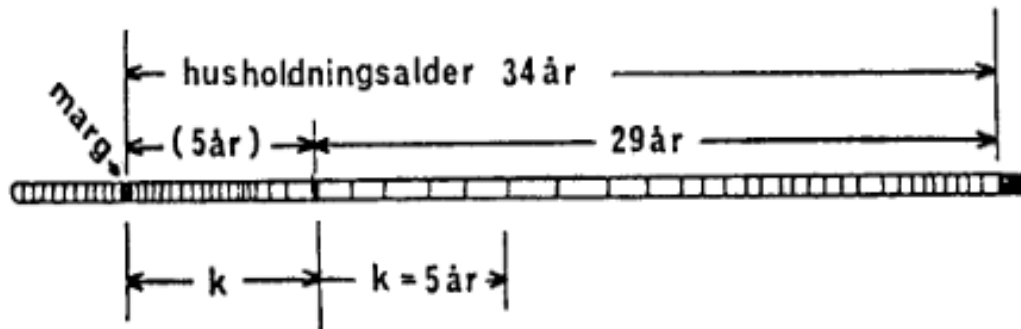
Statistisk analyse

Bonitet

I et uensaldret bestand brukes husholdningsalder og overhøyde for å bonitere (Tveite, 1977). Husholdningsalder er antallet år et tre ville brukt for å nå den nåværende diameteren, hvis diametertilveksten ikke hadde vært undertrykt (Figur 7). For å finne husholdningsalderen plottet jeg boniteringstreets årringbredde fra innerste til ytterste årring. Hvis de innerste årringene var smale, og de senere årringene tydet på en fristillingsreaksjon, regnet jeg de innerste årringene som undertrykt.

Jeg regnet ut husholdningsalderen ved å regne ut hvor mange mm årringene med undertrykt vekst utgjorde. Noen av borprøvene traff ikke marginen og manglet derfor de innerste årringene. Ved å undersøke formen på den innerste årringen kunne jeg anslå avstanden til marginen. Videre regnet jeg ut gjennomsnittlig årringbredde for de 10 første årene med fristilt vekst. Den samlede avstanden fra første årring med fristilt vekst til marginen, delt på gjennomsnittlig årringbredde, er hvor mange år med fristilt vekst treet ville brukt for å nå diameteren det hadde ved fristilling. Antall årringer etter fristillingsreaksjonen, lagt sammen med antall år før fristillingen hvis veksten var fristilt, utgjør husholdningsalderen (Figur 7).

Jeg beregnet bonitet på hver flate i R med funksjonen SiteIndex fra pakken SkogR, med metoden Sharma-Brunner (Ørka & Hauglin, 2016). Jeg hadde opprinnelig 18 flatepar (mile + kontroll), men jeg manglet borprøve fra en flate. Derfor har jeg i alt har bonitet for 35 flater.



Bestemmelse av husholdningsalder fra en borprøve.

Figur 7: Visualisering av metoden for å beregne husholdningsalder (Hauglin et al., 2017).

Lineær regresjon

Fordi jeg er interessert i effekten av kullbrenning undersøkte jeg om forklaringsvariabelen behandling (milebunn/kontrollflate) hadde en signifikant effekt på responsvariablene, og om effekten av behandling var påvirket av alderen på milebunnen. Jeg var også interessert i om interaksjonen mellom behandling og miljøvariabler hadde en effekt. Jeg lagde lineære blandede modeller med funksjonen lmer (Douglas et al., 2015). For å unngå problemer med multikollinearitet var variansinflasjonsfaktoren (VIF) < 5 for alle forklaringsvariablene i modellene.

Jeg brukte modellformelen $\text{behandling (milebunn/kontrollflate)} * (\text{alder (numerisk, år siden kullbrenning)} + \text{pH (målt i O-sjikt)})$ for responsene bonitet og grunnflate, og formelen $\text{behandling} * \text{alder}$ for responsene pH og C:N-forhold. For å modellere virkningen av kullbrenning på veddensitet og grunnstoffinnhold i veden, brukte jeg modellformelen $\text{behandling} * (\text{alder} + \text{bonitet (målt på flaten)})$. Tilfeldig effekt var prøvested innenfor lokalitet (Tabell 1). Jeg standardiserte alle kontinuerlige forklaringsvariabler med funksjonen scale, og logtransformerte bonitet. For å undersøke grunnflateresponsen nærmere, brukte jeg modellformelen $\text{behandling} * (\text{alder} + \text{pH})$ for responsene antall furutrær og grunnflateveid middeldiameter.

Resultater

Målinger på prøveflaten: pH, C:N-forhold, bonitet og grunnflate

Milebunnene hadde signifikant høyere pH i O-sjiktet enn kontrollflatene (Tabell 5; Figur 8).

Interaksjonen mellom alder og behandling var ikke signifikant, men p-verdien var lav ($p=0,060$). Alder hadde ingen effekt på pH på kontrollflatene, men en økning i pH på milebunnene med alderen er antydnet.

Modellen for C:N-forhold i O-sjiktet fant ingen signifikante effekter av forklaringsvariablene.

Behandling hadde en signifikant direkte effekt på bonitet. Behandlingene hadde ulik reaksjon på pH: Økende pH henger sammen med lavere bonitet på milebunner, mens pH ikke hadde en effekt på bonitet for kontrollflatene (Figur 8). Høyere alder ga høyere bonitet for begge behandlinger.

Ingen forklaringsvariabler hadde signifikant effekt på grunnflate, men effekten av behandling ($p=0,066$) og interaksjonen mellom behandling og alder ($p=0,084$) hadde lav p-verdi.

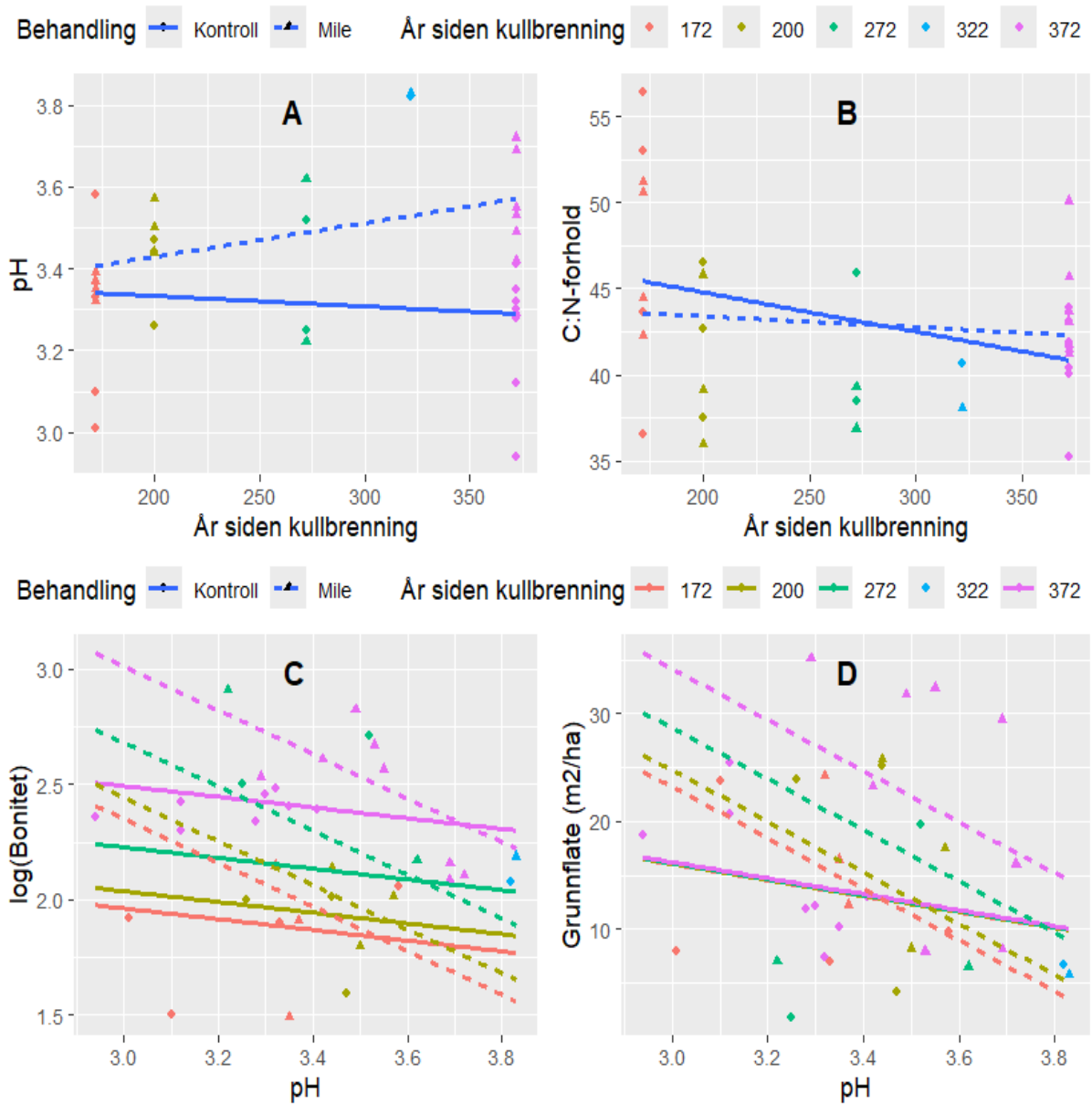
Milebunnenes grunnflate ser ut til å være høyere enn kontrollflatenes. Milebunnenes grunnflate ser ut til å øke med alder, mens alder ikke har en effekt på kontrollflatenes grunnflate.

Tabell 4: ANOVA-tabell fra en lineær blandet modell som tester effekten av behandling (milebunn/kontroll), alder på milen (numerisk variabel, år siden kullbrenning), pH i O-sjiktet, samt interaksjonene mellom behandling og alder, og mellom behandling og pH, på responsvariablene. Prøvested er brukt som tilfeldig effekt. Verdiene er $F(p)$ for bonitet, og $X^2(p)$ for de andre responsene. Uthevede verdier representerer signifikante effekter.

Respons	pH	C:N	log(Bonitet)	Grunnflate
Behandling	14,26 (<0,001)	<0.01 (0,993)	8,82 (0,008)	3,39 (0,066)
Alder	0,44 (0,509)	2,29 (0,123)	21,96 (<0,001)	1,57 (0,211)
pH			9,22 (0,006)	2,27 (0,132)
Behandling * Alder	3,53 (0,060)	0,86 (0,355)	1,46 (0,247)	2,99 (0,084)
Behandling * pH			6,41 (0,023)	1,05 (0,306)

Tabell 5: Oversikt over resultatene. Medianverdi, første og tredje kvartil (hhv. Q1 og Q3), minste og største observasjon for behandlingene. pH: pH (H₂O) målt i O-sjikt. C:N-forhold: O-sjiktets karboninnhold/nitrogeninnhold. Bonitet: Målt bonitet på flaten. Grunnflate: Beregnet for furutrærne på flaten. Kullmengde (estimert på grunnlag av sjiktykkelser). Kullag: Tykkelsen på de kullholdige sjiktene. Veddensitet: Målt veddensitet i borprøver. Ca, Fe, K, Mn: kalsium-, jern-, kalium- og manganinnhold i veden. Antall observasjoner for variablene, fordelt mellom lokalitene ligger i vedleggene (Tabell 7).

Variabel	Medianverdi (Q1-Q3)		Minste-største observasjon	
	Mile	Kontroll	Mile	Kontroll
pH	3,5 (3,4-3,6)	3,3 (3,2-3,4)	3,2-3,8	2,9-3,8
C:N-forhold	42 (39,7-45,4)	42,3 (40,1-43,9)	35,9-51,2	35,2-56,4
Bonitet	8,6 (8,0-13,0)	10,2 (7,4-11,2)	4,4-18,3	4,5-15,1
Grunnflate (m ² ha ⁻¹)	16,2 (8,1-25,4)	12,0 (7,5-20,4)	5,8-35,2	1,8-25,4
Kullmengde (kg m ⁻²)	58,8 (43,9-71,9)		21,5-155	
Kullag (cm)	13,6 (10,4-17,1)		6,0-25,3	
Veddensitet (g cm ⁻³)	0,59 (0,52-0,62)	0,63 (0,59-0,71)	0,48-0,94	0,26-1,0
Ca (mg kg ⁻¹)	541 (403-564)	419 (405-430)	322-599	368-774
Fe (mg kg ⁻¹)	115 (54,7-118)	90,6 (71,7-188)	22,8-237	16,7-316
K (mg kg ⁻¹)	411 (382-477)	445 (348-566)	299-556	301-692
Mn (mg kg ⁻¹)	59,0 (37,6-69,7)	45,0 (41,4-49,3)	20,5-90,1	39,6-53,3



Figur 8: Visualisering av modellene for pH (A), C:N-forhold (B), bonitet (C), og grunnflate (D) (Tabell 4). Punktene er observasjoner fra flater, linjene kommer fra modellene. Linjene tar ikke hensyn til tilfeldige effekter av prøvested, for å tydeligere vise effekten av alder (år siden kullbrenning, se Tabell 1). Alderseffekten i bonitetsmodellen er en kontinuerlig variabel, men figuren grupperer flater med samme alder.

Målinger på vedprøver

Ingen forklaringsvariabler hadde signifikant effekt på veddensitet (Tabell 6).

Behandling hadde ingen signifikant effekt på innholdet av noen grunnstoffer i veden (Tabell 6). Innholdet av kalsium økte med alder, men alderseffekten var lik for behandlingene.

Innholdet av mangan (Mn) i veden var ikke direkte påvirket av behandling, men behandlingene hadde ulik respons på alder og bonitet. Trærne på milebunnene fikk høyere Mn-innhold i veden ved økende alder, og lavere Mn-innhold i veden ved økende bonitet, mens alder og bonitet hadde ingen effekt på Mn-innholdet i veden på kontrollflater.

Tabell 6: ANOVA-tabell fra en lineær blandet modell som tester effekten av behandling (milebunn/kontroll), alder på milen (numerisk variabel, år siden kullbrenning), bonitet på flaten, samt interaksjonene med behandling på responsvariablene for enkeltrær (veddensitet ($g\ cm^{-3}$) og innhold av grunnstoffer i veden: Ca, Fe, K, Mn). Prøvested innenfor lokaliteten er brukt som tilfeldig effekt. Verdiene er X^2 (p). Uthevede verdier representerer signifikante effekter.

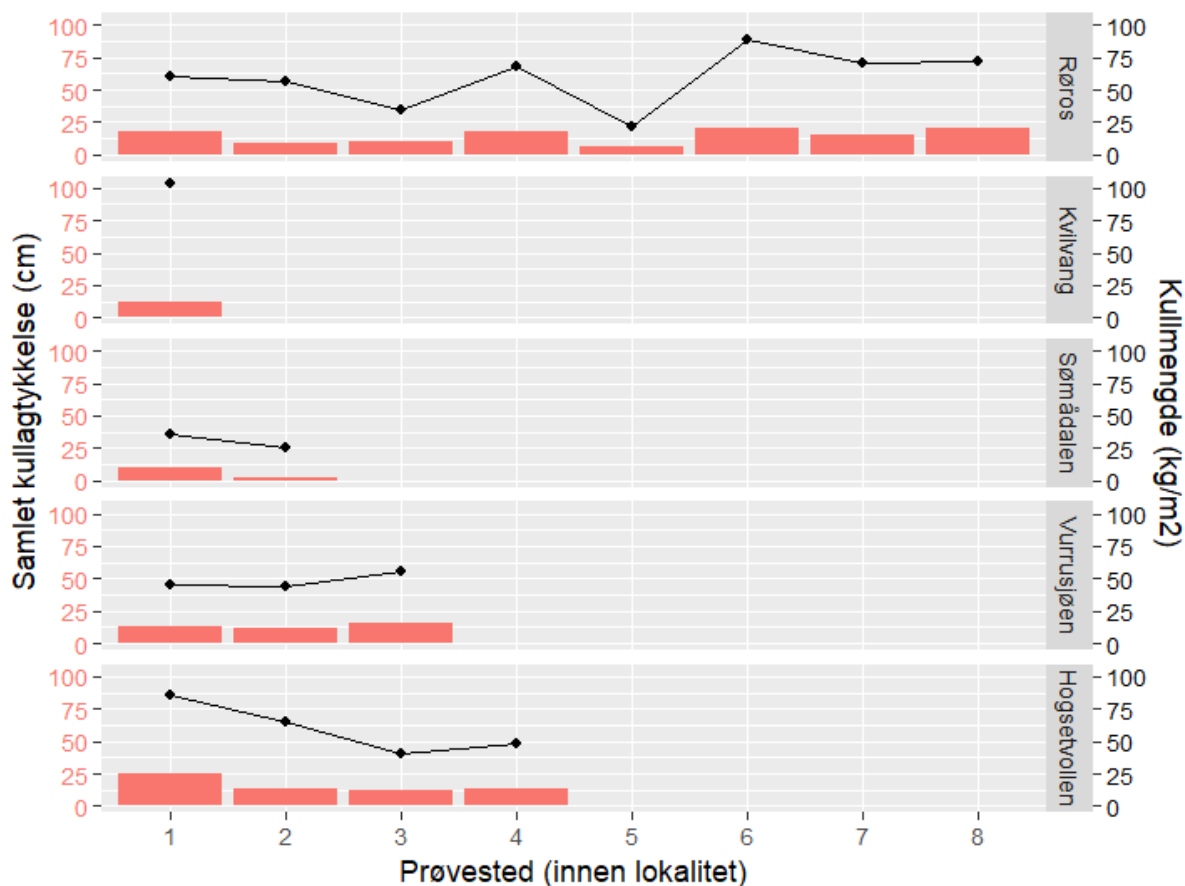
Respons	Veddensitet	Ca	Fe	K	Mn
Behandling	1,24 (0,265)	0,00 (0,995)	0,57 (0,451)	0,53 (0,466)	0,48 (0,490)
Alder	0,09 (0,766)	3,92 (0,048)	2,66 (0,103)	0,27 (0,605)	33,85 (<0,001)
Bonitet	0,35 (0,553)	1,09 (0,29)	0,10 (0,75)	0,01 (0,912)	8,00 (0,005)
Behandling * Alder	2,67 (0,102)	0,02 (0,902)	0,26 (0,61)	0,08 (0,774)	6,48 (0,011)
Behandling * Bonitet	1,73 (0,189)	0,26 (0,608)	0,34 (0,558)	0,78 (0,378)	6,01 (0,014)

Kullmengde og kullagtykkelse

Mineraljordsjiktene med innblanding av kullpartikler (Ek1 og Ek2) hadde 15-21% kull på vektbasis, mens sjiktet som regnes som nesten utelukkende kullpartikler (K) hadde 88% kull på vektbasis. Det meste av kulletts masse forekommer som grove partikler (>2 mm) i mineraljordsjiktene, mens i det nesten rene kullaget K er størstedelen av kulletts masse fine partikler (Tabell 3).

Den estimerte kullmengden på milebunnene hadde stor spredning, med en minste verdi på 21,5 kg m⁻² og en største verdi på 153,8 kg m⁻². Den samlede tykkelsen til kullagene (sjiktene

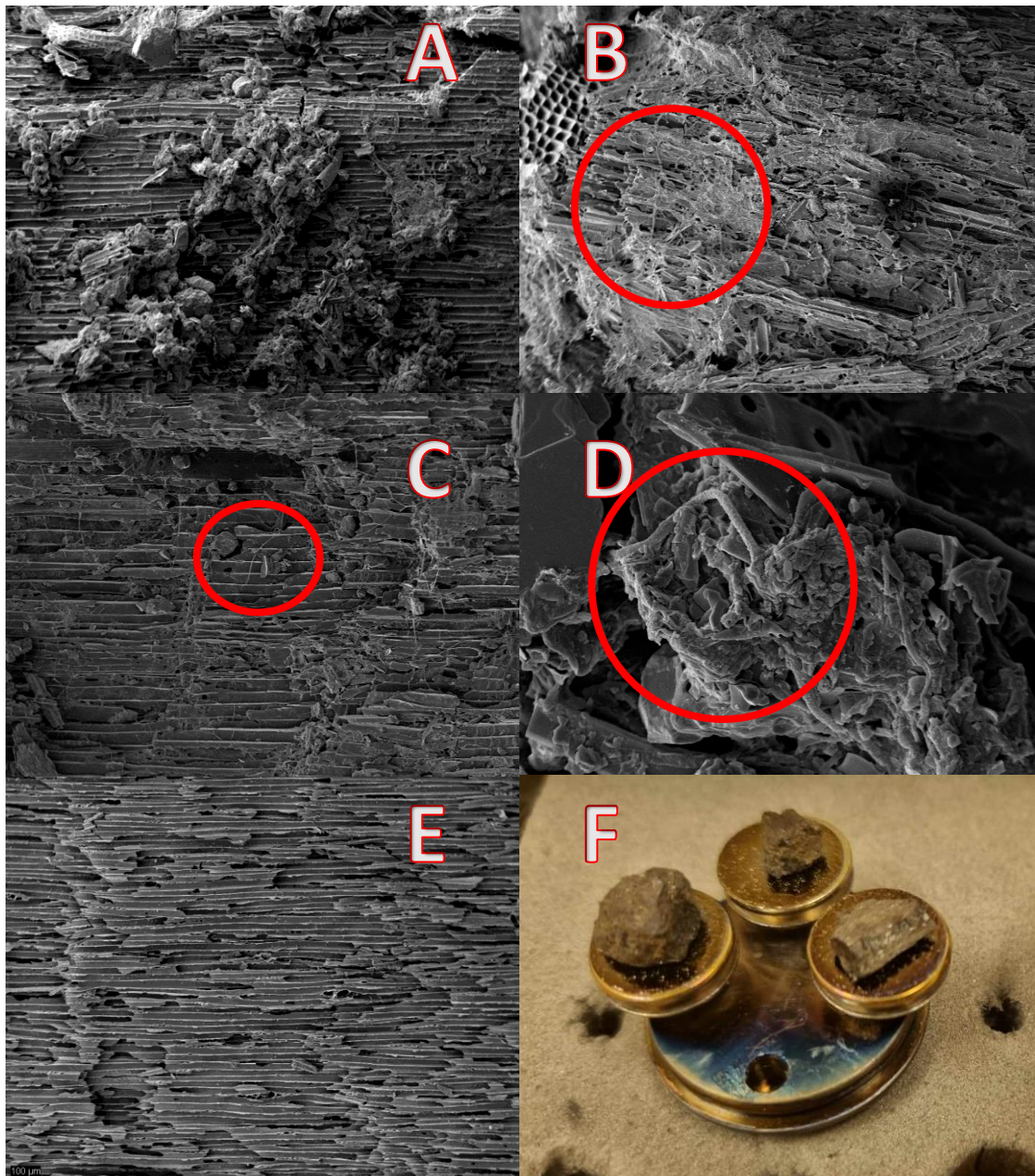
K, Ek1 og Ek2, se Tabell 2) var i den minste observasjonen 6 cm, og i den største 25,3 cm (Figur 9).



Figur 9: Samlet tykkelse (cm) til kullpåvirkede sjikt (røde stolper, venstre y-akse) og estimert kullmengde (kg m^{-2}) (svarte punkter og linjer, høyre y-akse) for hver milebunn på lokalitetene. Aksene har samme skala, men ulik enhet.

Elektronmikroskopi av kullpartikler

Kullpartiklene fra milebunner viste mineralske partikler over deler av overflaten (Figur 10A), og mange steder var det tegn på biologisk aktivitet (sopphyfer, Figur 10B, C, D, og noen steder finrøtter). Kullpartiklene viste ingen tydelig endring i overflatestruktur fra de ferskeste kullpartiklene til de eldste. Kullpartiklene fra 1700, 1750 og 1850 hadde mer avrundede kanter enn partiklene fra 1650, 1822 og den moderne biokullpartikkelen. De avrundede kantene kan skyldes forvitring av overflaten, men utvalget kullpartikler er for lite til å si dette med sikkerhet.



Figur 10: Bilder fra elektronmikroskopi. Røde ringe markerer synlige sopphyfer, som vises som tynne tråder. A: Overflatestruktur til kullpartikkelen fra 1650 (fra lokaliteten Røros). 150x forstørrelse. B: Overflatestruktur til kullpartikkelen fra 1700. 150x forstørrelse. C: Overflatestruktur til kullpartikkelen fra 1850. 150x forstørrelse. D: Nærbilde av sopphyfe på kullpartikkelen fra 1850. 2000x forstørrelse. E: Overflatestruktur på kullpartikkel fra moderne biokullproduksjon. 150x forstørrelse. F: Tre av kullpartiklene som ble fotografert med elektronmikroskopi. Partikkeloverflaten er dekket med platina.

Diskusjon

Mine reultater støtter den første hypotesen om høyere pH i O-sjiktet på milebunnene. Dette samsvarer med tidligere studier på milebunner på sur jord i barskog (Buras et al., 2020; Eriksson & Lundin, 2021; Lasota et al., 2021). Jeg fant en pH-økning på milebunnene på 0,2 pH-enheter, som er litt mer enn gjennomsnittet for tidligere studier, som er 0,11 pH-enheter (Raab et al., 2022).

Økningen i pH på milebunnene skyldes tilførsel av aske, slik at pH er nesten nøytral raskt etter kullbrenninga (Hardy et al., 2016). Aske har en sterkt nøytraliserende evne på grunn av høyt innhold av karbonat- og hydroksidioner, som øker pH i sur jord (Demeyer et al., 2001). Etter kullbrenning foregår en forsuring, som gjenspeiles i en utvasking av kationer til dypere jordlag (Hardy et al., 2016). Det at milebunnen har forhøyet pH etter mer enn 150 år siden kullbrenning, forklares i den studien med en buffereffekt fra kullpartiklene. En buffereffekt er påvist for biokull, som har funksjonelle grupper på partikkeloverflaten som kan binde protoner og begrense økningen i H^+ -konsentrasjon (Tusar et al., 2023).

Resultatene i denne oppgaven viser også en forhøyet pH i O-sjiktet lenge etter kullbrenning, men en buffereffekt fra overflaten til kullpartiklene kan ikke forklare dette. Det øverste jordlaget i jordtypen som undersøkes i denne oppgaven, podsol-jord, er organisk materiale akkumulert over mineraljord. Etter kullbrenninga var det organiske sjiktet fjernet, og kullpartiklene ble blandet inn i mineraljorda. Det organiske sjiktet som i ettertid er blitt til, er derfor ikke iblandet kullpartikler. Hardy et al. (2016) undersøkte hovedsakelig jordtyper der det øverste jordlaget består av organisk materiale iblandet mineralsk materiale og kullpartikler. En eventuell buffereffekt fra overflaten til kullpartiklene kan dermed ikke være årsaken til at pH-økningen har vedvart på milebunnene i denne oppgaven, i motsetning til i Hardy et al. (2016).

En mulig forklaring på at pH-økningen i denne oppgaven har vedvart, er at asketilførselen har økt jordas innhold av basekationer. Vegetasjonen tar kationene opp i plantevevet, slik at strøfallet får økt innhold av kationer. Når strøet nedbrytes vil basekationene kalsium og magnesium frigjøres, og de kan bytte ut H^+ -ionene fra de negative ladningsplassene på partikkeloverflatene (Weil & Brady, 2016). Det kan redusere H^+ -konsentrasjonen i vannløsningen ved at hydrogenioner utvaskes fra O-sjiktet.

I denne oppgaven var ikke C:N-forholdet i O-sjiktet påvirket av behandling, så hypotesen om økt C:N-forhold på milebunnene forkastes. Resultatet står i kontrast til to tidligere studier som har påvist høyere C:N-forhold på milebunnene (Carrari et al., 2016; Hardy et al., 2016). De forklarer økningen i C:N-forhold med innblanding av kullpartikler i jorda. O-sjiktet i denne oppgaven inneholder i liten grad kullpartikler, og dette kan forklare hvorfor kullbrenning ikke hadde en effekt på C:N-forholdet.

Hypotesen om at milebunnen hadde redusert bonitet får betinget støtte av resultatene.

Boniteten er høyere på milebunnene enn på kontrollflatene ved de laveste pH-verdiene, men ved de høyeste pH-verdiene er boniteten lavere på milebunnene. Dette vises i Figur 8C ved at den stiplede linjen for milebunnene viser høyere bonitet enn den heltrukne linjen til kontrollene ved lav pH, men ved økende pH krysser linjene hverandre og milebunnene får lavere bonitet enn kontrollene. De høyeste pH-verdiene i denne oppgaven er likevel svært sure, for den høyeste pH-verdien er 3,8 (Tabell 5).

Ingen andre studier har undersøkt sammenhengen mellom pH og bonitet på milebunner. At pH ikke har noen effekt på kontrollflatenes bonitet samsvarer med Elgersma (1998), som ikke fant noen signifikant korrelasjon mellom bonitet og pH i nordboreal furuskog. Mens pH ikke påvirker kontrollflatenes bonitet, påvirkes milebunnenes bonitet negativt av økende pH, som står i kontrast til tendensen til en positiv korrelasjon mellom bonitet og pH i ulike boreale skogtyper (Elgersma, 1998; Heiskanen et al., 2018). En negativ korrelasjon mellom pH og bonitet i furuskog på podsol-jord er påvist tidligere av Sewerniak (2020). Han forklarte det med at lav pH er gunstig for ektomykorrhiza, i tillegg til at organiske syrer øker forvitringen av mineraler og dermed bedrer næringstilgangen. Forvitring av mineraler er en usannsynlig forklaring i denne oppgaven, ettersom veksten i norsk boreal skog er hovedsakelig begrenset av nitrogenmangel (Nilsen, 2001). Effekten av ektomykorrhiza er en bedre forklaring på hvorfor boniteten på milebunner er høyest ved lav pH. Siden milebunner er «hotspots» for bakterier og sopp kan effekten av ektomykorrhiza også forklare at milebunner og kontrollflater har ulik respons på pH (Lasota et al., 2021).

Så vidt jeg vet er det ingen andre som har målt bonitet på milebunner, men Buras et al. (2020) fant at trærne på milebunner hadde lavere høyde enn kontrollflatene ved samme alder, som tyder på at milebunnene har lavere bonitet. Forklaringen deres er at trærne er mer utsatt for tørke på milebunner, som leder til større allokering av biomasse til røttene. Resultatet deres

samsvarer med at milebunnene i denne oppgaven hadde lavere bonitet enn kontrollflatene. Det er mulig at tørke er årsaken til redusert bonitet på milebunnene også i denne oppgaven. Milebunner har et større volum grove porer som følge av innblanding av kullpartikler, og dette gjør at jorda tørker ut raskere (Schneider et al., 2020). Hvis uttørking er årsaken til redusert bonitet på milebunner, tyder det på at ved lav pH er trærne mindre utsatt for tørke. Det kan forklares med at ektomykorrhiza kan hjelpe trærnes vannforsyning ved tørke, og at effekten av ektomykorrhiza kan være størst ved lav pH (Brunner et al., 2015; Sewerniak, 2020).

Hypotesen om redusert grunnflate på milebunnene forkastes av resultatene, for grunnflaten var høyere på milebunnene enn på kontrollflatene. Forskjellen i grunnflate kan ikke forklares med uttak av tømmer, ettersom milebunner og kontrollflater innenfor samme lokalitet antagelig har lik behandlingshistorikk i etterkant av kullbrenninga. Bonitet i et bestand er positivt korrelert med grunnflatetilveksten, så det er overraskende at milebunnene har lavere bonitet, men samtidig høyere grunnflate (Gizachew & Brunner, 2011; Gizachew et al., 2012).

Siden grunnflaten på milebunner og kontroller har utviklet seg forskjellig siden kullbrenninga, må det være en forskjell i enkeltrærnes diametertilvekst eller tilvekst i treantall mellom behandlingene. Treantall var høyere på milebunnene, mens grunnflateveid middeldiameter ikke var påvirket av behandling (Tabell 8, vedlegg). Det tyder på at årsaken til høyere grunnflate er at milebunnene har hatt tettere foryngelse eller mindre mortalitet. I foryngelsesfasen er plantene utsatt for uttørking og frostskafer, særlig hvis de vokser på strølaget (Smith, 1997). Foryngelsesforholdene kan være bedre på milebunnene fordi mineraljorda ble eksponert. Tilførsel av næringsstoffer fra aske og redusert konkurranse fra annen vegetasjon kan også bidra til bedre foryngelsesforhold på milebunner. Flatebrenning har en positiv effekt på overlevelse og høydevekst, og ble tidligere brukt som foryngelsestiltak i skogbruket (Mäkitalo, 1999; Nitteberg & Nygaard, 2007).

Mikan og Abrams (1995) fant lavere grunnflate på milebunner enn på kontrollflatene, og knytter dette til dårligere foryngelsesforhold på milebunnene. Det står i kontrast til resultatene i denne oppgaven, men kan forklares med at treslagene i studieområdet deres har en annen foryngelsesstrategi. De forklarer den dårlige foryngelsen på milebunner blant annet med fraværet av stubbeskudd fra eik på milebunner, i motsetning til på kontrollflatene. Det

dominerende treslaget i denne oppgaven, furu, forynger seg ikke med stubbeskudd. Dette viser at suksessjon og foryngelse etter kullbrenning påvirkes av skogtypen.

Bedre foryngelsesforhold for furu på milebunner er den beste forklaringen på forskjellen i grunnflate, men det er behov for å undersøke dette nærmere. En annen studie kan studere foryngelsens overlevelse og vekst på milebunner, og forsøke å identifisere prosessene som forårsaker bedre foryngelse på milebunner, slik Carrari et al. (2017) gjorde. Det er også mulig å studere diameterfordelingen til trærne på milebunner, slik Hart et al. (2008) gjorde, som kan indikere suksessjonprosessen og tidligere foryngelsesforhold i bestandet.

Modellene viste ingen effekt av pH på grunnflate for noen behandlinger, mens bonitet på milebunnene var høyest ved lav pH. Siden bonitet og grunnflatetilvekst henger sammen, er det overraskende at pH ikke hadde en effekt på grunnflate når det hadde effekt på bonitet. Hvis mykorrhiza forklarer at boniteten på milebunner er høyest ved lav pH, burde pH også påvirke trærnes overlevelse og diametertilvekst på milebunner. En vanskelighet med å undersøke sammenhenger med grunnflate i denne oppgaven er at lokalitetene har ukjent og antagelig forskjellig behandlingshistorie. For å undersøke effekten av pH på grunnflate, og om effekten av pH er forskjellig mellom behandlingene, bør flatene ha lik behandlingshistorikk. Dette kan gjøres ved å velge flater innenfor ensaldrede og homogene skogbestand, slik Buras et al. (2020) gjorde.

Hypotesen om lavere veddensitet på milebunnene støttes ikke av resultatene, selv om mediandensiteten var litt lavere på milebunnene (Tabell 5). Ingen forklaringsvariabler hadde en signifikant effekt på veddensiteten. En annen studie på milebunner har undersøkt veddensitet, og påviste lavere veddensitet på milebunner (Buras et al., 2020). De målte veddensitet med røntgenscanning av vedprøvene, som gir en veddensitetsprofil for hver prøve. De ga ingen forklaring på forskjellen i veddensitet, men det kan henge sammen med at trærne er mer tørkeutsatt på milebunner. Innblanding av kullpartikler i mineraljorda fører til økt porevolum, som bidrar til større svingninger i vannhusholdning (Schneider et al., 2020). Mer tørkeutsatte furutrær utvikler lavere veddensitet (Buras et al., 2023).

I utgangspunktet skulle veddensitet i denne oppgaven måles ifølge Buras et al. (2020), men prøvematerialet var ikke tilpasset betingelsene for røntgenscanning. Flere av borprøvene hadde skjeve årringer, som påvirker overgangen mellom vårved og sommerved. En ytterligere feil var at borprøvene ble skåret flate på en side, som gjør at tykkelsen på borprøvene varierte.

Metoden for å bestemme volum med vannfordrivning omgår disse problemene til en viss grad, men de skjeve årringene kan likevel påvirke andelen vårved og sommerved i prøven, og dermed veddensitet. En annen svakhet ved undersøkelsen av veddensitet skyldes at prøvematerialet er forholdsvis lite. Bare 18 av 36 flater er inkludert, og størstedelen (11 flater) kommer fra lokaliteten Røros (Tabell 7, i vedleggene). Effekten av behandlingene ble testet med en lineær modell som inkluderte alder som en forklaringsvariabel. På grunn av den dårlige representasjonen av ulike aldre passer modellen dårlig til å teste effekten av behandling. Det er derfor behov for videre studier for å undersøke veddensitet på milebunner. En ny studie må ta stilling til hvordan veddensitet skal måles, og tilpasse datainnsamlingen til det. Fordelen med røntgenscanning er at det produserer en densitetsprofil som viser densiteten for hver årring, i tillegg til å kunne regne ut årringbredde. På den annen side er målingen svært tidkrevende (Buras et al., 2020), så volumbestemmelse med vannfordrivning kan være nødvendig for å få et større datasett.

Hypotesen om økt innhold av grunnstoffer i veden på milebunner støttes ikke av resultatene. Behandling hadde ingen direkte effekt på innholdet av noen av grunnstoffene, men interaksjonen mellom behandling og alder, og mellom behandling og bonitet var signifikant for mangan. Resultatene står i kontrast til en tidligere studie som fant at trærne på milebunner hadde høyere konsentrasjon av flere grunnstoffer i veden (Buras et al., 2020). De fant også at høyere grunnstoffinnhold i veden sammenfalt med høyere grunnstoffinnhold i jorda. På den annen side fant Mastrolonardo et al. (2019) ingen sammenheng mellom konsentrasjonen av grunnstoffer i bøkeblader og i jorda på milebunner. Det er derfor ikke nødvendigvis en sammenheng mellom konsentrasjonen av et grunnstoff i veden og hvor mye av grunnstoffet som er plantetilgjengelig. Dersom resultatene viste en effekt av behandling på vedens innhold av flere grunnstoffer, ville det være bedre grunnlag for å spekulere i årsaken til sammenhengen. Buras et al. (2020) foreslår at grunnstoffinnholdet i veden gjenspeiler næringsforholdene i jorda bedre enn grunnstoffinnholdet i blader. For å undersøke effekten av behandling på grunnstoffinnholdet i plantevev, bør en annen studie måle grunnstoffinnholdet i ved og blader, i tillegg til i jorda.

Hypotesen om en aldersavhengig effekt av kullbrenning får ingen støtte av resultatene for C:N-forhold og bonitet, mens en aldersavhengig effekt på pH og grunnflate er antydnet, men den er ikke signifikant.

Denne oppgaven undersøkte alderseffekten ved å sammenligne milebunner med ulik alder siden kullbrenning. Så vidt jeg vet, er det ingen andre som har studert alderseffekten ved å undersøke milebunner langs en tidsgradient (i denne oppgaven er milebunnenes alder mellom 172 og 372 år siden kullbrenning). Hardy et al. (2016) sammenlignet milebunner med alder >150 år med en moderne milebunn med aktiv kullbrenning. De daterte milebunnene ut ifra når kullbrenning i området endte, men kjente ikke alderen til hver enkelt milebunn.

Det er flere utfordringer med å undersøke alderseffekten på milebunnene. Først og fremst er det vanskelig å angi en alder for hver milebunn – det vil si hvor mange år det er gått siden kullmila ble brent. Tidligere studier har brukt historiske kilder (f.eks. Eriksson & Lundin, 2021; Hardy et al., 2016) som kan fortelle når kullbrenning foregikk i et område. Datering av enkeltvise milebunner kan gjøres med ^{14}C -datering av kullpartikler (f.eks. Bonhage et al., 2020) eller OSL-datering (optically stimulated luminescence) av mineralske sedimenter fra kullbrenningen (Karimi Moayed et al., 2020). Grunnlaget for dateringen av milebunnene i denne oppgaven er historiske kilder benyttet av Ryen (2020). Protokoller etter 1690 opplyser transportavstander for kulleveranser, som gjør det «mulig å finne ut hvor kullbrenninga til enhver tid har foregått» (Ryen, 2020).

Dateringen i denne oppgaven har flere års usikkerhet, fordi kulleveranser fra samme lokalitet skjedde over flere år. Arbeidet til Ryen (2020) beskriver hvordan kullbrenning spredte seg i området over tid, men ikke hvor lenge kullbrenning foregikk på hver lokalitet. Dateringen for lokalitetene gitt av Ryen (2022a) tar utgangspunkt i en kjent kulleveranse fra lokaliteten i det året. Den opprinnelige dateringen av lokaliteten Vurrusjøen var 1900, men dette stemte ikke med den observerte alderen til trærne. Derfor ble en tidligere datering brukt. For de andre lokalitetene var det ingen uoverensstemmelser mellom opprinnelig datering og trealderen, så dateringen til Ryen (2022a) ble brukt.

Antagelsen om at milebunnene i samme lokalitet har tilnærmet samme alder er begrunnet i at tømmerressursene i et område ble uttømt i løpet av kort tid etter kullbrenninga begynte der. De grove furuskogene som ble brukt til framstilling av trekull vokste ikke tilbake til det samme omfanget, og mange steder vokste det til med løvskog i stedet (Ryen, 2020).

Pollenalyser fra Røros viser en større nedgang i andel furupollen enn i bjørkepollen (Prøsch-Danielsen & Sørensen, 2010), som kan tyde på mer foryngelse av bjørk enn av furu. Derfor er det grunn til å tro at kullbrenning ikke ble gjentatt i lokaliteter som tidligere var avskoget.

En forutsetning for å kunne undersøke alderseffekten er at rekkefølgen i alder er korrekt og at tidsintervallet mellom lokalitetenes datering er korrekt. Den lineære regresjonen bruker alderen som en kontinuerlig forklaringsvariabel, så den kronologiske rekkefølgen på lokalitetene, og tidsintervallet mellom lokalitetene har betydning for resultatene. Dersom alder ble brukt som en kategorisk variabel, ville ikke dateringen spille en rolle for den lineære regresjonen. Grunnen til at alder ble brukt som kontinuerlig variabel er at dersom effekten av kullbrenning påvirkes av alder, kan den tenkes å følge å være proporsjonal med tiden. Hvis effekten av kullbrenning avtar over tid, skal effekten ha avtatt mer for gamle milebunner enn for unge milebunner. Den lineære modellen antar at alderseffekten følger et lineært forløp.

Det er andre utfordringer med å påvise en alderseffekt som skyldes innsamlingen av data. Alle milebunnene med samme alder siden kullbrenning, er innenfor samme lokalitet. Når en eventuell effekt av alder blir påvist i modellen, er det mulig at effekten skyldes forskjeller mellom lokalitetene. Gradienten i alder kan sammenfalle med en gradient i jordegenskaper eller klima, som påvirker responsvariablene. Sammenfallet mellom alder og andre variabler kan forsterkes ved at datasettet har en ujevn fordeling av aldre. 16 av 36 flater befinner seg i den eldste lokaliteten (Røros), og 14 av 36 befinner seg i de to yngste lokalitetene (Vurrusjøen og Hogsetvollen), med lignende bonitet, alder og klima (Tabell 1). Den lineære modellen vil derfor være tilbøyelig til å påvise en alderseffekt som består i at den eldste lokaliteten er forskjellig fra de to yngste lokalitetene.

En direkte effekt av alder på en variabel vil ganske enkelt si at med økende alder blir variabelen forskjellig, uavhengig av behandling. I denne oppgaven er interaksjonen mellom alder og behandling interessant, fordi den forteller om milebunnene har forskjellig reaksjon på alder enn kontrollflatene. Fraværet av en interaksjonseffekt kan tyde på at effekten av kullbrenning ikke påvirkes av tid, eller at tidshorisonen ikke er lang nok til å påvise en reaksjon på tid.

Interaksjonen mellom behandling og alder for pH var nesten signifikant, og tyder på at milebunnenes pH blir høyere med økende alder, mens kontrollflatenes pH er upåvirket av alder. Det at milebunnene har en reaksjon på alder, men ikke kontrollflatene, tyder på at effekten skyldes tid og ikke forskjeller mellom lokalitetene. En forskjell mellom lokalitetene ville antagelig ha lik effekt for begge behandlinger.

Den eneste kjente studien som ser på alderseffekten er Hardy et al. (2016), som målte pH på historiske milebunner og på en moderne, aktiv milebunn, i tillegg til området utenfor milebunnene. Den ferske milebunnen hadde nesten nøytral pH, mens milebunnen som var >150 år gammel hadde en sur pH, som likevel var høyere enn området utenfor milebunnene. Mens Hardy et al. (2016) fant at pH-økningen etter kullbrenning avtar over tid, antyder resultatene i denne oppgaven den motsatte sammenhengen mellom alder og pH. Det er overraskende at milebunnenes pH øker med alderen, ettersom den nøytraliserende effekten av aske går raskt over. Forbindelsene i aske som øker pH er lettløselige og vedblir kort tid i jorda (Demeyer et al., 2001). Det er grunn til å stille spørsmål ved at milebunnes pH øker med alder, ettersom jeg ikke kan finne noen biologisk eller kjemisk forklaring på dette resultatet. Som nevnt kan resultatene påvirkes av at alle de eldste milebunnene er på samme lokalitet. Alderseffekten som er antydnet på pH kan kanskje bedre forklares av en forskjell mellom lokalitetene som påvirker økningen i pH etter kullbrenning. For å bekrefte at de eldste milebunnene har mer forhøyet pH enn de yngste, er det nødvendig med et større utvalg flater og jevnere fordeling av aldre. Et sikkert resultat er i alle fall at pH-økningen på milebunner har svært lang varighet, ettersom den eldste lokaliteten også har høyere pH på milebunnene enn på kontrollene.

Interaksjonseffekten mellom behandling og alder for grunnflate hadde også lav p-verdi, og tyder på at grunnflaten på milebunnene øker med alder, mens grunnflaten på kontrollflatene ikke påvirkes av alder. Som nevnt over kan forskjellen i grunnflate forklares med bedre foryngelsesforhold på milebunnene som følge av at mineraljorda eksponeres, bedret næringstilgang og redusert konkurranse. Markberedning bidrar til bedre foryngelsesforhold i mange år etter inngrepet (Johansson et al., 2013), og en lignende effekt kan være årsaken til at økningen i grunnflate på milebunnene øker over tid. Alder har også en positiv effekt på treantallet på milebunner, som kan tyde på at kullbrenning fører til bedre foryngelsesforhold lang tid etterpå. Det er likevel overraskende at foryngelsesforholdene er bedre lenge etter kullbrenning, sammenlignet med kort tid etter kullbrenning. For å bekrefte at de eldste milebunnene har de beste foryngelsesforholdene er det behov for en studie som studerer veksten og overlevelsen til foryngelse på milebunner med ulik alder.

Det var ingen interaksjonseffekt mellom behandling og alder for bonitet. Den negative effekten av kullbrenning for bonitet er altså lik for alle aldrene. Dersom uttørking er årsaken til redusert bonitet, vil ikke denne effekten gå over så lenge de grove kullpartiklene, som

bidrar til økt volum grove porer, består i jorda. En varig endring i porøsitet og fuktighetsforhold kan forklare hvorfor en alderseffekt på nedgangen i bonitet ikke ble påvist. Dette kan undersøkes nærmere ved å se om de fysiske og hydrologiske egenskapene til jorda på milebunner endres over tid.

Interaksjonen mellom alder og behandling var signifikant for Mn-innholdet i veden, men det grunn til å være tvilende til om resultatet påviser en alderseffekt. Som nevnt over er det tvilsomt at forskjellen i Mn-innhold reflekterer forskjell i voksestedsforhold, siden behandling ikke hadde noen effekt på de andre grunnstoffene. Videre ble grunnstoffinnholdet bare målt på vedprøver fra to lokaliteter, som representerte to aldre siden kullbrenning. For å kunne påvise en alderseffekt med større sikkerhet burde datasettet inkludere flere aldre, og gjerne også flere lokaliteter for hver alder.

Kullmengde på milebunner

Det er flere studier som oppgir tykkelsen til kullaget på milebunner, og flere som estimerer økningen i jordkarbon, men bare to studier har estimert kullmengden på milebunner. Bonhage et al. (2020) målte innhold av karbon på milebunner med glødetap, og kartla arealet dekket med milebunner i et skogområde. Basert på estimater på andelen karbon (C) med pyrogen opphav i andre studier, kom de frem til at milebunnene bidro til mellom 1,02 og 7,79 Mg pyrogen C ha⁻¹. Når milebunnene dekker 3,6% av skogarealet, blir mengden pyrogen C på milebunnene i gjennomsnitt mellom 2,8 og 21,6 kg m⁻². Criscuoli et al. (2014) målte andelen karbon med pyrogen opphav ved å studere isotoper, og estimerte at mengden pyrogen karbon på milebunnen var 23,3 kg m⁻².

I denne oppgaven ble kullmengde målt ved å skille ut kullpartikler i jordprøven, og måle massen deres. Ved å anta at konsentrasjonen av kullpartikler i et gitt sjikt er fast, estimerte jeg kullmengden på hver flate, og kom frem til en mediankullmengde på 58,8 kg m⁻². Ved å anta at kull består av 74% karbon (Mastrolonardo et al., 2019), utgjør det 43,5 kg m⁻² pyrogen karbon. Dette er høyere enn resultatene til Bonhage et al. (2020) og Criscuoli et al. (2014), men i samme størrelsesorden. Metodene for å måle kullmengde og studieområdene er ulike, så det er ingen grunn til å forvente samme verdier.

Kullmengdeestimatet på hver flate er basert på målinger av kun én prøve for hvert kullholdig sjikt. For å komme med bedre estimater bør kullmengde måles på flere prøver. Uten å ha målt kullmengde i flere prøver er det umulig å estimere usikkerheten i estimatet for flatene.

Kullmengden i en milebunn er mye høyere enn mengden man kan forvente å finne i skog uten milebunner. Studier i Norge har funnet en gjennomsnittlig kullmengde i skog på 150-300 g m⁻² (Hubner, 2023), så milebunnene i denne oppgaven har 200-400 ganger mer kull enn gjennomsnittet i skog. Kullmengden som produseres i en skogbrann kan være 235 kg ha⁻¹, ifølge målinger fra eksperimentelle skogbranner i Skandinavia (Ohlson & Tryterud, 2000). Det tilsvarer 23,5 g m⁻².

Bildene av overflatestruktur på kullpartiklene viser ingen tydelige tegn på forvitring som følge av oppbevaring i jord over tid. De eldste kullpartiklene, som hadde ligget i jorda i nesten 400 år, bar ikke preg av endret overflatestruktur, som kan bety at kullpartikler er svært holdbare i jord. Utvalget av kullpartikler er svært lite, så det er dårlig grunnlag for å undersøke effekten av alder. Criscuoli et al. (2014) estimerer at gjennomsnittlig lagringstid for kull på milebunner er 650 år. Studien er fra fjellene i Nord-Italia, med varmere og våtere klima enn studieområdet i denne oppgaven.

Bildene av kullpartiklene viste at mineralske partikler var bundet til overflaten. Lasota et al. (2021) fant at mineralske sjikt med innblanding av kullpartikler hadde tydelig utviklet struktur, i motsetning til mineralske sjikt i jord uten kull. De knytter den tydelige jordstrukturen i kullholdige mineraljord til økt mikrobiell aktivitet, i tillegg til at kullpartikler kan danne bindinger til leirpartikler. Jordstrukturen ble ikke undersøkt i denne oppgaven, men det er usannsynlig at kullpartiklene bidrar til å utvikle jordstruktur, siden podsol-jord inneholder lite leire (Sperstad & Nyborg, 2008). Lasota et al. (2021) fant også at kullholdige sjikt i større grad var infiltrert med røttene til feltsjiktvegetasjonen, som de forklarer med et høyere innhold av vann i de kullholdige sjiktene. Bildene av kullpartikler i denne oppgaven viste hyfer og finrøtter på overflaten, som kan tyde på at kullpartiklene er gode voksesteder.

Resultatenes bidrag til skogforvaltning og forskning

Lokalitetene i denne oppgaven har lav til middels bonitet: 50% av observasjonene for bonitet var mellom ca. 8 og ca. 11 (Tabell 5). Resultatene i denne oppgaven gjelder altså for et begrenset bonitetsintervall for furuskog i nordboreal klimasone. Studien til Elgersma (1998), med data fra Landsskogtakseringen, kan tyde på at høyere furuboniteter ikke er normalt i klimasonen. Studien hennes inkluderte flater fra nordboreal klimasone med bonitet 6-11 i produktiv skog. Resultatene i denne oppgaven kan derfor hevdes å være representative for furuskoger med kullbrenning i Nord-Østerdalen og andre høyereliggende områder. Andre

studier må til for å undersøke hvordan kullbrenning påvirker jordsmonn og skogproduksjon i granskog og i andre bioklimatiske soner. Som nevnt over påvirkes gjenveksten av skogen etter kullbrenning av treslagenes foryngelsesstrategi. Studier som inkluderer flere bioklimatiske soner og ulike treslagsfordelinger kan undersøke hvordan effekten av kullbrenning er påvirket av klima og treslag.

En annen mulig årsak til forskjellig effekt av kullbrenning er egenskapene til jorda milebunnene forekommer på. Milebunner kan ha mer eller mindre plantetilgjengelig vann, og høyere eller lavere pH enn kontrollene, avhengig av opphavsmaterialet (Hardy et al., 2016; Raab et al., 2022). Siden effekten av kullbrenning på hydrologi og kjemi kan være påvirket av jordegenskaper, vil antagelig den økologiske effekten av kullbrenning også være påvirket. Dette må undersøkes av en studie som sammenligner den økologiske effekten av kullbrenning på ulike jordtyper.

Forskning på milebunner kan være relevant for å forstå effekten av biokull over lang tid, som nevnt i innledningen. Resultatene tyder på at kullpartiklene har hatt en effekt på jordkjemi og vekstforhold, men studien identifiserer ikke prosessene som står bak effekten. Tilførselen av kullpartikler er bare en av forstyrrelsene på milebunner, så effekten av milebunner kan ikke tilskrives kullet alene. Selv om kullpartiklenes bufferevne antagelig ikke påvirker pH i O-sjiktet i denne oppgaven, er det mulig at kullpartiklenes bufferevne kan påvirke pH i lang tid etter kullbrenning, slik Hardy et al. (2016) foreslår. For å klarlegge langtidsvirkningen av biokull i jord, vil det være relevant å undersøke kullpartiklenes kjemiske egenskaper etter langvarig lagring i jord. I tillegg vil det være det relevant å undersøke hvordan kullpartiklene påvirker milebunnens fysiske og hydrologiske egenskaper etter lang tid.

I denne oppgaven undersøkes virkningen av kullbrenning ved å sammenligne flater med kullbrenning med nærliggende flater uten kullbrenning. Schneider et al. (2022) skriver at langtidsvirkningen av tidligere arealbruk kan ha betydning for økosystemet utover arealet som er direkte berørt. Hvis kullbrenning har betydning for økosystemet utenfor milebunnene, blir ikke dette fanget opp i denne oppgaven, fordi kontrollflatene befinner seg i nærheten av milebunnene.

I følge Ryen (2020) er milebunnen bare en del av sporene kullbrenninga etterlot seg på et «kølbruk». Arbeiderne gravde og flyttet jord for å opparbeide milebunnen og dekke kullmila, som betyr at jordsmonnet nær milebunnen kan ha blitt direkte bearbeidet. Arbeiderne bygget

som regel også en koie til seg selv, en redskapskoie og en stall til trekkdyrene. I tillegg lagde de en vei til kølbruket, og gravde vanningshull langs veien til dyrene. Et landskap med milebunner vil altså være preget av kullbrenningsaktiviteten også utenfor milebunnene, og kontrollflatene kan også være preget av aktiviteten.

Resultatene i denne oppgaven forteller hvordan milebunnene i et bestand er påvirket, sammenlignet med det nærliggende området. Resultatene sier ingenting om hvordan området utenfor milebunnene er påvirket av kullbrenningsaktiviteten. For å undersøke dette kan en egen studie sammenligne det ubrente området i nærheten av milebunnen med skogbestand uten historisk kullbrenningsaktivitet.

En annen side av kullbrenning som denne oppgaven ikke berører, er hvilken effekt kullbrenningsaktiviteten har hatt på bestands- eller landskapsnivå. Ifølge Schneider et al. (2022) kan tettheten på milebunner være høy i enkelte regioner, og dette kan føre til at effekten av kullbrenning er mulig å spore også på stor romlig skala. Schneider et al. (2022) viste at milebunnene kan bidra til 18% høyere innhold av organisk materiale i jorda på landskapsnivå, selv om de utgjør 1,5% av skogarealet. Eriksson og Lundin (2021) og Carrari et al. (2016) skriver at milebunnene bidrar til biologisk variasjon og diversitet i skoglandskapet. Det er eksempler på hvordan den lokale effekten av milebunner har betydning på større romlig skala.

Dersom effekten milebunnene har på bonitet, grunnflate og pH også har betydning på bestands- eller landskapsnivå, vil informasjon om forekomsten av milebunner være viktig for skogforvaltningen. En eventuell effekt av milebunner på bestands- eller landskapsnivå kan være korrelert med tettheten på milebunner. Fremtidige studier kan benytte en digital terrengmodell for å kartlegge forekomsten av milebunner i et landskap, slik blant annet Risbol et al. (2013) og Schneider et al. (2022) har gjort. Ved å kjenne tettheten på milebunner i et område vil det være mulig å estimere størrelsen av effekten deres på skogbestand og landskap.

Kullbrenning har foregått over store deler av Norge i forbindelse med bergverkene (jern, kobber og sølv) i førindustriell tid, og i perioden 1620-1870 ble det brent omtrent 720 000 kullmiler over hele landet (Mikkelsen, u.å.). I Sverige er 33 000 milebunner registrert, men det er sannsynligvis langt flere (Eriksson & Lundin, 2021). I tillegg til milebunner, som er restene etter kullmiler, kommer kullgroper. Kullgroper er små produksjonsanlegg for trekull, som er eldre enn kullmiler (hovedsakelig fra 600-1500 e.Kr. i Norge) (Hirsch et al., 2020).

Omfanget av kullproduksjon i norsk skog er altså sannsynligvis stort, men ingen studier har sett på i hvilken grad aktiviteten har formet landskapet. Avhengig av definisjonen av begrepet, vil skogområder med spor etter kullbrenningsaktivitet kanskje kunne regnes som kulturlandskaper. Dersom fremtidige studier kommer frem til at kullbrenning har en effekt på jordegenskaper og vekstforhold på større romlig skala, vil områder med milebunner kunne regnes som «menneskeformede landskap» (Bruun et al., 1994).

Konklusjon

Resultatene viser at kullbrenning har en effekt på jord og skog selv etter flere hundre år. Milebunner er blitt tilført aske og grove kullpartikler, som har gitt en varig pH-økning og ført til lavere bonitet, kanskje på grunn av uttørking. Grunnflaten var høyere på milebunnene enn på kontrollflatene, som kan forklares med bedre foryngelse eller overlevelse, som har ført til høyere treantall. Denne oppgaven er den første som undersøker milebunner langs en tidsgradient, som gjør det mulig å undersøke om effekten av kullbrenning endres over tid. Det var ikke mulig å påvise en interaksjon mellom behandling og alder, men resultatene antyder at økningen i grunnflate på milebunner blir høyere over tid, kanskje som følge av varig forbedrede foryngelsesforhold. Fremtidige studier som undersøker alderseffekten av kullbrenning bør inkludere flere aldre og lokaliteter i datagrunnlaget. Denne oppgaven sammenlignet milebunner i skog med ubrente kontrollflater i nærheten, men fremtidige studier bør undersøke hvordan kullbrenningsaktivitet har påvirket skoglandskapet på større romlig skala.

Referanser

- Bonhage, A., Hirsch, F., Schneider, A., Raab, A., Raab, T. & Donovan, S. (2020). Long term anthropogenic enrichment of soil organic matter stocks in forest soils - Detecting a legacy of historical charcoal production. *Forest Ecology and Management*, 459. doi: ARTN 117814 10.1016/j.foreco.2019.117814.
- Brunner, I., Herzog, C., Dawes, M. A., Arend, M. & Sperisen, C. (2015). How tree roots respond to drought. *Frontiers in Plant Science*, 6. doi: ARTN 547 10.3389/fpls.2015.00547.
- Bruun, M., Gaukstand, E., Haveraaen, E., Høglo, J. M., Iversen, I., Kristiansen, B., Løfaldli, L., Norderhaug, A., Ramberg, A., Ramberg, T., et al. (1994). *Mer enn bare landskap!*

- I: Det sentrale utvalget for registrering av verdifulle kulturlandskap (red.). Nasjonal registrering av verdifulle kulturlandskap. Trondheim.
- Buras, A., Hirsch, F., Schneider, A., Scharnweber, T., van der Maaten, E., Cruz-García, R., Raab, T. & Wilmking, M. (2020). Reduced above-ground growth and wood density but increased wood chemical concentrations of Scots pine on relict charcoal hearths. *Science of The Total Environment*, 717: 137189. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137189>.
- Buras, A., Rehschuh, R., Fonti, M., Lange, J., Fonti, P., Menzel, A., Gessler, A., Rigling, A., Treydte, K. & von Arx, G. (2023). Quantitative wood anatomy and stable carbon isotopes indicate pronounced drought exposure of Scots pine when growing at the forest edge. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6. doi: ARTN 1233052 10.3389/ffgc.2023.1233052.
- Carrari, E., Ampoorter, E., Verheyen, K., Coppi, A. & Selvi, F. (2016). Former charcoal kiln platforms as microhabitats affecting understorey vegetation in Mediterranean forests. *Applied Vegetation Science*, 19 (3): 486-497. doi: <https://doi.org/10.1111/avsc.12238>.
- Carrari, E., Ampoorter, E., Verheyen, K., Coppi, A. & Selvi, F. (2017). Former charcoal platforms in Mediterranean forest areas: a hostile microhabitat for the recolonization by woody species. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 10 (1): 136-144. doi: 10.3832/ifor1701-009.
- Criscuoli, I., Alberti, G., Baronti, S., Favilli, F., Martinez, C., Calzolari, C., Pusceddu, E., Rumpel, C., Viola, R. & Miglietta, F. (2014). Carbon Sequestration and Fertility after Centennial Time Scale Incorporation of Charcoal into Soil. *PLOS ONE*, 9 (3): e91114. doi: 10.1371/journal.pone.0091114.
- Demeyer, A., Nkana, J. C. V. & Verloo, M. G. (2001). Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology*, 77 (3): 287-295. doi: Doi 10.1016/S0960-8524(00)00043-2.
- Douglas, B., Maechler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2015). *Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4.*: Journal of Statistical Software.
- Elgersma, A. M. (1998). *Sammenhenger mellom skogtyper, bonitet og jordkjemi i ulike makro klima regioner*. NIJOS rapport. Ås: NIJOS.

- Eriksson, O. & Lundin, L. G. (2021). Legacies of historic charcoal production affect the forest flora in a Swedish mining district. *Nordic Journal of Botany*, 39 (11). doi: 10.1111/njb.03312.
- Gauslaa, Y., Goward, T. & Pypker, T. (2020). Canopy settings shape elemental composition of the epiphytic lichen in unmanaged conifer forests. *Ecological Indicators*, 113. doi: ARTN 106294 10.1016/j.ecolind.2020.106294.
- Gizachew, B. & Brunner, A. (2011). Density-growth relationships in thinned and unthinned Norway spruce and Scots pine stands in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26 (6): 543-554. doi: 10.1080/02827581.2011.611477.
- Gizachew, B., Brunner, A. & Oyen, B. H. (2012). Stand responses to initial spacing in Norway spruce plantations in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27 (7): 637-648. doi: 10.1080/02827581.2012.693191.
- Granhus, A., Eriksen, R., Viken, K. O., Wollan, A. K., Bryn, A. & Halvorsen, R. (2016). *Naturtyperegistrering etter NiN 2.0 i Landsskogtakseringen*. NIBIO RAPPORT, Vol. 1, Nr. 29. Ås: NIBIO.
- Hardy, B., Cornelis, J. T., Houben, D., Lambert, R. & Dufey, J. E. (2016). The effect of pre-industrial charcoal kilns on chemical properties of forest soil of Wallonia, Belgium. *European Journal of Soil Science*, 67 (2): 206-216. doi: <https://doi.org/10.1111/ejss.12324>.
- Hart, J. L., Van De Gevel, S. L., Mann, D. F. & Clatterbuck, W. K. (2008). Legacy of charcoaling in a Western Highland Rim forest in Tennessee. *American Midland Naturalist*, 159 (1): 238-250. doi: Doi 10.1674/0003-0031(2008)159[238:Lociaw]2.0.Co;2.
- Hauglin, M., Bollandsås, O. M. & Eid, T. (2017). *Skogregistrering*. Forelesningsnotater til Skog100 og Skog102. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Haukenes, V. (2024). *Måling av kullmengde i jordprøve* (Samtale 19.02.2024).
- Heiskanen, J., Hallikainen, V., Uusitalo, J. & Ilvesniemi, H. (2018). Co-variation relations of physical soil properties and site characteristics of Finnish upland forests. *Silva Fennica*, 52 (3). doi: ARTN 9948 10.14214/sf.9948.
- Hermansen, L. C. (2024). *Resultater fra elektronmikroskop* (Epost 13. mars).

- Hirsch, F., Schneider, A., Bonhage, A., Raab, A., Drohan, P. J. & Raab, T. (2020). An initiative for a morphologic-genetic catalog of relict charcoal hearths from Central Europe. *Geoarchaeology*, 35 (6): 974-983. doi: <https://doi.org/10.1002/gea.21799>.
- Hubner, D. (2023). *Soil charcoal in boreal forests with contrasting management histories in southeast Norway*: NMBU.
- International Organization for Standardization. (2021). *Soil, treated biowaste and sludge - Determination of pH*.
- IUSS Working Group WRB. (2022). *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. . I: (IUSS), I. U. o. S. S. (red.)*. Wien, Østerrike: IUSS Working Group WRB.
- Johanis, H., Lehejček, J. & Tejnecký, V. (2022). An insight into long-term effects of biochar application on forest soils. *European Journal of Forest Research*, 141 (2): 213-224. doi: 10.1007/s10342-022-01440-0.
- Johansson, K., Nilsson, U. & Örlander, G. (2013). A comparison of long-term effects of scarification methods on the establishment of Norway spruce. *Forestry*, 86 (1): 91-98. doi: 10.1093/forestry/cps062.
- Karimi Moayed, N., Vandenberghe, D. A. G., Deforce, K., Bastiaens, J., Ghyselbrecht, E., Debeer, A. E., De Smedt, P., De Clercq, W. & De Grave, J. (2020). Bypassing the Suess-effect: Age determination of charcoal kiln remains using OSL dating. *Journal of Archaeological Science*, 120: 105176. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105176>.
- Kartverket. (2012). *Røros 2012*: Blom Geomatics AS. Tilgjengelig fra: <https://hoydedata.no/LaserInnsyn2/> (lest 25.04).
- Kilden. (2023). NIBIO. Tilgjengelig fra: https://kilden.nibio.no/?x=6938447.05&y=318688.7&zoom=10&topic=skogportal&bgLayer=graatone&layers=skogressurs_srrbonitet&layers_opacity=0.75&layers_visibility=true (lest 01. februar).
- Larsson, J. Y. (2000). *Veiledning i bestemmelse av vegetasjonstyper i skog*. NIJOS rapport. Ås: Norsk insitutt for jord- og skogkartlegging.
- Lasota, J., Błońska, E., Babiak, T., Piaszczyk, W., Stępniewska, H., Jankowiak, R., Boroń, P. & Lenart-Boroń, A. (2021). Effect of Charcoal on the Properties, Enzyme Activities and Microbial Diversity of Temperate Pine Forest Soils. *Forests*, 12 (11): 1488.

- Mastrolonardo, G., Calderaro, C., Coccozza, C., Hardy, B., Dufey, J. & Cornelis, J.-T. (2019). Long-Term Effect of Charcoal Accumulation in Hearth Soils on Tree Growth and Nutrient Cycling. *Frontiers in Environmental Science*, 7. doi: 10.3389/fenvs.2019.00051.
- Mikan, C. J. & Abrams, M. D. (1995). Altered Forest Composition and Soil Properties of Historic Charcoal Hearths in Southeastern Pennsylvania. *Canadian Journal of Forest Research*, 25 (5): 687-696. doi: DOI 10.1139/x95-076.
- Mikkelsen, P. R. (u.å.). *Skogen og bergverkene*. Bergverkshistorie. Tilgjengelig fra: <https://www.bergverkshistorie.no/Read.aspx?Name=15.-SKOGEN-OG-BERGVERKENE> (lest 08.05).
- Mäkitalo, K. (1999). Effect of site preparation and reforestation method on survival and height growth of Scots pine. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14 (6): 512-525. doi: Doi 10.1080/02827589950153998.
- Nilsen, P. (2001). Fertilization experiments on forest mineral soils: A review of the Norwegian results. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 16 (6): 541-554. doi: Doi 10.1080/02827580152699376.
- Nitteberg, M. & Nygaard, P. H. (2007). *Skånsom markberedning: Markberedningsaggregatet Markus*. Forskning fra Skog og landskap. Ås.
- Nygaard, P. H. (2023). *Skogshistorisk utvikling etter hogst og kølbrenning i Nord-Østerdalen og potensialet for framtidig skogproduksjon*. NIBIO Rapport. Ås: NIBIO.
- Ogner, G., Wickstrøm, T., Remedios, G., Gjelsvik, S., Hensel, G. R., Jacobsen, J. E., Fongen, M., Skretting, E. & Sørli, B. (1999). *The Chemical analysis program of the Norwegian Forest Research Insititute 2000*. Ås: Norsk institutt for skogforskning.
- Ohlson, M. & Tryterud, E. (2000). Interpretation of the charcoal record in forest soils: forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal. *Holocene*, 10 (4): 519-525. doi: Doi 10.1191/095968300667442551.
- Prøsch-Danielsen, L. & Sørensen, R. (2010). 333 years of copper mining in the Røros region of the Mid-Scandic highlands Written sources versus natural archives. *Journal of Nordic Archaeological Science*, 17: 37-51.
- Risbol, O., Bollandsås, O. M., Nesbakken, A., Orka, H. O., Næsset, E. & Gobakken, T. (2013). Interpreting cultural remains in airborne laser scanning generated digital

- terrain models: effects of size and shape on detection success rates. *Journal of Archaeological Science*, 40 (12): 4688-4700. doi: 10.1016/j.jas.2013.07.002.
- Ryen, A. (2020). *Kølbrenning, kølkjøring og bosetting fra Narjordet mot Drevsjø*. Røros: Røros Museums og historielag.
- Ryen, A. (2022a). *Koordinater til lokaliteter for milebunner* (Skriftlig kommunikasjon 06.08).
- Ryen, A. (2022b). *Oppbygning og størrelse på kullmiler og milebunner* (Samtale 06.08).
- Raab, T., Raab, A., Bonhage, A., Schneider, A., Hirsch, F., Birkhofer, K., Drohan, P., Wilmking, M., Kreyling, J., Malik, I., et al. (2022). Do small landforms have large effects? A review on the legacies of pre-industrial charcoal burning. *Geomorphology*, 413. doi: ARTN 108332 10.1016/j.geomorph.2022.108332.
- Schneider, A., Hirsch, F., Raab, A. & Raab, T. (2019). Temperature Regime of a Charcoal-Enriched Land Use Legacy Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 83 (3): 565-574. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.12.0483>.
- Schneider, A., Hirsch, F., Bonhage, A., Raab, A. & Raab, T. (2020). The soil moisture regime of charcoal-enriched land use legacy sites. *Geoderma*, 366: 114241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114241>.
- Schneider, A., Bonhage, A., Hirsch, F., Raab, A. & Raab, T. (2022). Hot spots and hot zones of soil organic matter in forests as a legacy of historical charcoal production. *Forest Ecology and Management*, 504: 119846. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119846>.
- Sewerniak, P. (2020). Plant species richness or soil fertility: which affects more the productivity of Scots pine in Central Europe? *Annals of Forest Research*, 63 (2): 57-73. doi: 10.15287/afr.2020.2003.
- Smith, D. M. (1997). Ecology of regeneration. I: *The Practice of Silviculture: Applied Forest Ecology*: Wiley.
- Sperstad, R. & Nyborg, Å. (2008). *Beskrivelse av jordsmonngrupper og jordsmonnenheter på dyrka mark i Norge*. Ås: Norsk institutt for skog og landskap.
- Storaunet, K. O. (2023). *Beskrivelse av bruk av årringbreddelupe* (Samtale 15. januar).
- Thomas, S. C. & Gale, N. (2015). Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. *New Forests*, 46 (5): 931-946. doi: 10.1007/s11056-015-9491-7.

- Tusar, H. M., Uddin, M. K., Mia, S., Suhi, A. A., Wahid, S. B., Kasim, S., Sairi, N. A., Alam, Z. & Anwar, F. (2023). Biochar-Acid Soil Interactions-A Review. *Sustainability*, 15 (18). doi: ARTN 13366 10.3390/su151813366.
- Tveite, B. (1977). Foreløpige retningslinjer for bonitering etter nytt bonitetssystem. *Rapport fra Norsk institutt for skogforskning*, 4/77.
- Utermann, J. (u.å.). *Comparison of pH measurements in soils according to ISO 10390 and DIN 19684-1*. Method comparison. Hannover: Federal Institute for Geosciences and Natural Resources.
- Weil, R. R. & Brady, N. C. (2016). *The Nature and Properties of Soils*: Pearson Education.
- Young, M. J., Johnson, J. E. & Abrams, M. D. (1996). Vegetative and edaphic characteristics on relic charcoal hearths in the Appalachian mountains. *Vegetatio*, 125 (1): 43-50. doi: 10.1007/BF00045203.
- Ørka, H. O. & Hauglin, M. (2016). *skogR: Norske skogfunksjoner (Norwegian Forestry Functions)*.

Vedlegg

Tabell 7: Antall observasjoner for variablene innenfor hver lokalitet, fordelt mellom milebunner (M) og kontrollflater (K).

Variabel	Røros		Kvilvang		Sømådalen		Hogsetvollen		Vurru sjøen		Sum	
	M	K	M	K	M	K	M	K	M	K	M	K
pH	8	8	1	1	2	2	4	4	3	3	18	18
C:N-forhold	8	8	1	1	2	2	4	4	3	3	18	18
Kullmengde (kg m ⁻²)	8	0	1	0	2	0	4	0	3	0	18	0
Kullag (cm)	8	0	1	0	2	0	4	0	3	0	18	0
Bonitet	8	8	1	1	2	2	3	4	3	3	17	18
Grunnflate (m ² ha ⁻¹)	8	8	1	1	2	2	4	4	3	3	18	18
Veddensitet (g cm ⁻³)	5	6	1	0	0	0	1	1	3	1	10	8
Ca (mg kg ⁻¹)	3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	6	6
Fe (mg kg ⁻¹)	3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	6	6
K (mg kg ⁻¹)	3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	6	6
Mn (mg kg ⁻¹)	3	3	0	0	0	0	3	3	0	0	6	6

Tabell 8: ANOVA-tabell fra en lineær blandet modell som tester effekten av behandling (milebunn eller kontroll), alder på milen (numerisk variabel, år siden kullbrenning), pH i O-sjikt, samt interaksjonene med behandling på responsvariablene. Treantall: Antall furutrær på flaten. Middeldiameter: Grunnflateveid middeldiameter på flaten. Prøvested er brukt som tilfeldig effekt. Verdiene er X^2 (p). Uthevede verdier representerer signifikante effekter.

Respons	Treantall	Middeldiameter
Behandling	4,41 (0,036)	1,86 (0,173)
Alder	32,3 (<0,001)	5,34 (0,021)
pH	5,84 (0,016)	1,82 (0,178)
Behandling * Alder	8,14 (0,004)	1,95 (0,163)
Behandling * pH	6,87 (0,009)	5,10 (0,024)



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway