



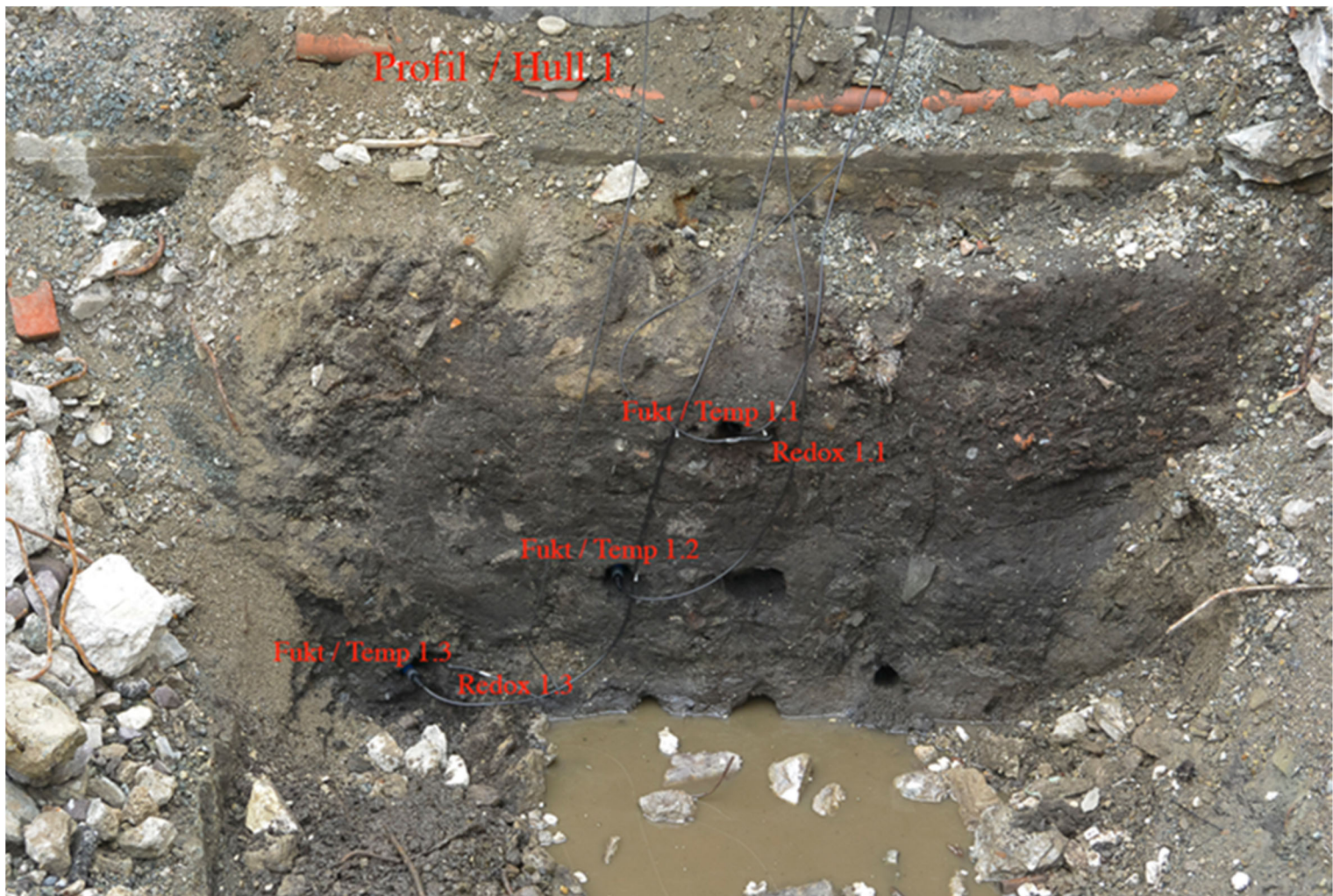
**NIBIO**

NORSK INSTITUTT FOR  
BIOØKONOMI

# Miljøovervåking av arkeologiske kulturminner fra middelalderen før og etter nybygg på tomt i Munkhaugveita 5-7 i Trondheim

Sluttrapport 2015 til og med 2020

NIBIO RAPPORT | VOL. 7 | 20 | 2021



**TITTEL/TITLE**

Miljøovervåking av arkeologiske kulturminner fra middelalderen før og etter nybygg på tomt i Munkhaugveita 5-7 i Trondheim. Sluttrapport 2015 til og med 2020

**FORFATTER(E)/AUTHOR(S)**

Ove Bergersen

DATO/DATE:	RAPPORT NR	TILGJENGELIGHET/AVAILABILITY:	PROSJEKTNR	SAKSNR
05.02.2021	7/20/ 2021	Åpen	8929	18/00079
ISBN:	ISSN:	ANTALL SIDER:	ANTALL VEDLEGG	
978-82-17-02756-0	2464-1162	3	5	

**OPPDRAGSGIVER/EMPLOYER:**

Riksantikvaren, Distriktskontor Trondheim  
NIKU, Distriktskontor Trondheim

**KONTAKTPERSON/CONTACT PERSON:**

Sissel Ramstad Skoglund  
Anna H. Petersén

**STIKKORD/KEYWORDS:**

Redoksforhold, bevaring, kulturminner,  
Miljøovervåking, nedbrytning org. materiale

**FAGOMRÅDE/FIELD OF WORK:**

Jordkvalitet og miljøovervåking i kulturlag fra  
middelalderbyen Trondheim.

**SAMMENDRAG/SUMMARY:**

Dette er en sluttrapport som oppsummerer 5 års miljøovervåking av kulturminner i jord for tomte Munkhaugveita 5-7 i Trondheim. Forundersøkelsen med jordkjemiske analyser viste at de fleste kulturlag hadde gode bevaringsforhold. Kulturlagene er overvåket med sensorer for jordtemperatur, fuktighet og redoksforhold i 5 år fra 2015-2020. Utstyret har fungert bra uten større avvik i måleperioden. Målinger og data viser at det fortsatt er reduserende forhold i de fleste kulturlagene etter 5 år. Den høyest plasserte sensoren i Hull 4 på 10.10 moh. viser lavere redokspotensialet fra +600 til +280 mV etter 5 års overvåking. Her var det noe tørrere og oksiderende forhold i starten. Temperaturen har steget fra 7-10°C i snitt i begge profiler. Sistnevnte er tydelig de tre siste årene etter at nytt hus er satt opp etter 2018. En ser også at svingningene i temperatur er lavere mellom sommer og vinter. Profil 1 Hull 1 viser reduserende forhold og fortsatt gode bevaringsforhold. Jordfuktigheten er blitt mere stabil i begge profiler gjennom overvåkingsperioden, med unntak av øvre lag i Hull 1 og bunn i Hull 4, som ser ut til å være påvirket av grunnvann. Lav jordtemperatur i begge profiler, godt under 10°C, tilsier en lav nedbrytingsrate av organisk materialet. NIBIOs nedbrytningsforsøk på jordprøver fra to av kulturlagene i Hull 4 (9.1 og 7.9 moh.) har vist stabile forhold og nedbrytingsraten er nesten ikke målbar ved 10°C, både uten og med nærvær av oksygen. Dette viser at organisk materiale blir bedre bevart over lengre tid hvis kulturlagene holdes ved lave temperaturer. Miljøovervåkingen gir grunnlag for å anta at nye bygg over områder med verneverdige kulturlag i Munkhaugveita 5-7 ikke har hatt en direkte negativ påvirkning på de kulturlag som er overvåket. Kun øvre del av profil 1 Hull 4 kan bli påvirket hvis temperaturen øker eller holder seg over 12°C.

**LAND/COUNTRY:**

Norge

**FYLKE/COUNTY:**

Sør Trøndelag

**KOMMUNE/MUNICIPALITY:**

Trondheim

**STED/LOKALITET:**

Munkhaugveita 5-7

**NIBIO**NORSK INSTITUTT FOR  
BIOØKONOMI

GODKJENT /APPROVED

PROSJEKTLEDER /PROJECT LEADER



---

TROND MÆHLUM

---

OVE BERGERSEN



# Forord

Rapporten er skrevet på oppdrag fra Riksantikvaren og NIKU. NIBIO har i oppdrag å utføre miljøovervåking av arkeologisk kulturlag i 5 år på tomten Munkhaugveita 5-7 i Trondheim. I september 2015 ble det installert overvåkingsutstyr som skal overvåke hvordan kulturlagene fra middelalderen bevares over tid in situ. Rapporten her er sluttrapport for overvåkingsperioden 2015 til ut året 2020. I rapporten inngår også data fra tidligere årlige statusrapporter.

Fra NIBIO har følgende personer deltatt i prosjektet:

Måletekniske arbeider i felt: Thor Endre Nytrø, Srikanthapalan Muthulingam og Ove Bergersen

Laboratorieundersøkelser: Hege Bergheim og Ove Bergersen

Rapportering: Ove Bergersen

Kvalitetssikring av rapporten: Trond Mæhlum

Ås, 2.02. 2021



Ove Bergersen

Prosjektleder

# Innhold

1	Introduksjon .....	6
1.1	Bakrunn .....	6
1.2	Målet for prosjektet .....	6
1.3	Avvik .....	6
2	Metoder og utstyr .....	8
2.1	Arkeologi- og naturvitenskapelige definisjoner.....	8
2.2	Feltarbeide.....	8
2.3	Generelt om vurdering av bevaringsforhold i kulturlag – kjemisk analyser av jordprøver. ....	8
	Grunnleggende analyseparameter S1 analyser .....	9
	Miljøparameter S2 analyser.....	9
2.4	Feltarbeid i forbindelse med miljøovervåking.....	10
2.5	Miljøovervåking av arkeologiske kulturlag .....	10
2.6	Installering av sensorer i kulturlag .....	10
2.7	Installering av datalogger .....	11
2.8	Stabilitet og nedbryting ved undersøkelse av jordprøver fra midten og bunnen ved Profil 1 Hull 4.....	13
3	Resultater og diskusjon .....	14
3.1	Forundersøkelse, vurdering av bevaringsforholdene i begge profiler .....	14
3.2	Jordtemperaturen målt i kulturlag i profil 1 Hull 1 og Hull 4.....	15
3.3	Jordfuktigheten målt i kulturlag i Profil 1 i Hull 1 og Hull 4 .....	17
3.4	Redoksforhold målt i kulturlag i profil 1 fra Hull 1 og Hull 4 sammenstilt og vurdert sammen med jordfuktighet.....	20
3.5	Nedbrytningsstudier av kulturlagsprøver fra Munkhaugveita 5-7 Profil 1 Hull 4.....	27
4	Konklusjon .....	29
	Litteraturreferanser .....	30
	Vedlegg.....	31

# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

Det henvises til oppdragsbestilling fra Norsk Institutt for Kulturminneforskning (NIKU) som i brev datert 20.03. 2015 ba Bioforsk (nå NIBIO) om å påta seg ansvaret for miljøovervåking av kulturlag i Munkhaugveita 5-7 som inngår i middelalderbyen Trondheim. Prosjektet utføres i samarbeid med lokalkontoret til NIKU i Trondheim ved Anna H. Petersén (prosjekt nr. 1020444). Prosjektet med feltarbeid ble igangsatt i september 2015. Området som skal overvåkes er tomten Munkhaugveita 5-7 hvor det tidligere har vært en bensinstasjon, i dag parkeringsplass (se kart i Figur 1). Tidligere undersøkelser har vist godt bevarte kulturlag flere steder på denne tomten (Bergersen og Petersén 2009). Det skal etableres et nytt bygg på tomten i overvåkingsperioden.

Prosjektets varighet var satt til 5 år, med overvåking før og etter et ferdigstilt hus er satt opp på tomten. Siden området tidligere er undersøkt er det viktig å få ny kunnskap om hvordan bevaringsforholdene i området er 6-7 år etter forrige undersøkelse (Bergersen og Petersén 2009) og for å se om kulturlagene påvirkes ved at bevaringsforholdene endrer seg. På sikt vil denne kunnskapen kunne gi viktig informasjon om de vil endre seg i fremtiden når nytt hus bygges på denne tomten.

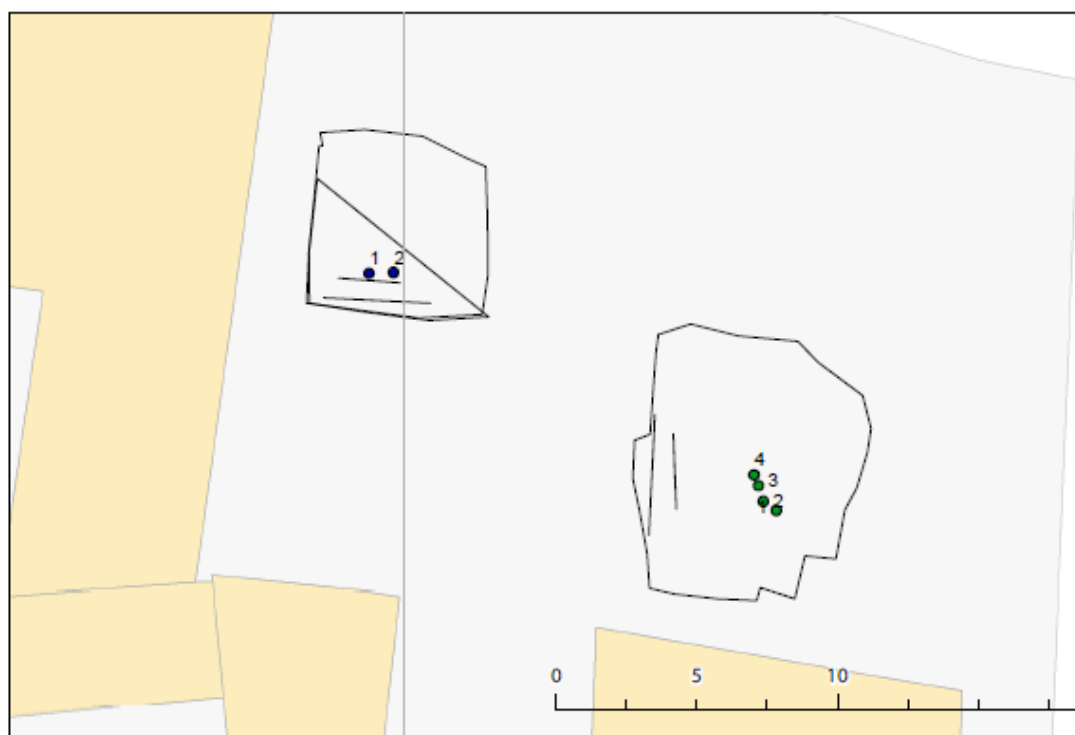
Dette er en sluttrapport over alle år med overvåking fra installasjonen høsten 2015 til slutten av 2020. Den bygger videre på status rapport I (Bergersen 2016), status rapport II (Bergersen 2018) og status rapport III (Bergersen 2019). Sensorene er satt inn i kulturlag på to ulike lokaliteter som i rapporten refereres som Hull 1 og 4 (kart i figur 1, GPS i vedlegg 3). På tomten har det vært byggeaktivitet gjennom 2017 og 2018 og i 2019 er nytt hus ferdigstilt (se vedlegg 2). Nytt hus satt opp over Hull 4 beskrevet i rapporten. Hull 1 ligger under steinheller i overgang gårdsplass og nytt bygg langs med Munkhaugveita 5-7 i retning torget.

## 1.2 Målet for prosjektet

Målet med prosjektet er å overvåke kulturlag in situ ved å undersøke hva som skjer med bevaringen av kulturlag i umettet sone (over grunnvannsnivået) før og etter etablering av nytt bygg over en periode på 5 år.

## 1.3 Avvik

Alle sensorene har gitt gode og fornuftige resultater i hele måleperioden fra installasjon september 2015 til ut 2020. Det er ikke registrert avvik i målingene i måleperioden. Sensor temperatur 4.1 i Hull 4 sluttet og gi normale verdier starten av januar 2021.



EUREF89/UTM32  
Kartgrunnlag: Statens kartverk, Geovekst og kommuner

Figur 1. Oversiktskart over Trondheim og tomten i Munkhaugveita 5-7. Hull 1 til venstre og Hull 4 til høyre (NIKU).

## 2 Metoder og utstyr

### 2.1 Arkeologi- og naturvitenskapelige definisjoner

I rapporten blir det brukt uttrykk som trenger en forklaring fordi de brukes forskjellig i ulike fagområder eller de er lite kjent.

**Kulturlag:** Lag med materiale knyttet til menneskelig aktivitet. Kulturlag kan variere meget i form, utseende, sammensetting og innhold beroende på lokalitet, tidsalder, type aktivitet og jordsmonn.

**Steril grunn:** Naturlig undergrunn, upåvirket av menneskelig aktivitet

**Bevaringstilstand:** Kulturlagenes nåværende tilstand avhengig av pågående og historisk nedbrytning.

**Bevaringsforhold:** Fysiske, kjemiske og mikrobiologiske forhold som er avgjørende for nedbrytningshastighet i kulturlag.

**Redoksreaksjoner:** Redoksreaksjoner består av to delreaksjoner, oksidasjon og reduksjon. Disse reaksjoner foregår vanligvis relativt langsomt, men i naturlige systemer fungerer mikroorganismer som katalysatorer slik at reaksjonene foregår mye raskere.

**Aerobe forhold:** Forhold der luft (oksygen) er til stede. Ved aerobe forhold blir organisk materiale og reduserte uorganiske forbindelser oksidert av mikroorganismer som omsetter oksygen (sammenlignbar med menneskelig respirasjon). Ved aerobe forhold kan man forvente en høyere mikrobiell aktivitet enn ved anaerobe forhold.

**Anaerobe forhold:** forhold der luft (oksygen) er fraværende. Ved anaerobe forhold blir organisk materiale oksidert av mikroorganismer som omsetter nitrat, oksidert jern og mangan, sulfat eller oksidert organisk materiale i stedet for oksygen. I naturlige miljøer er anaerobe forhold ensbetydende med reduserende (reduktive) forhold, men i hvilken grad forholdene er reduserende, varierer.

**Reduserende (reduktive) forhold:** Avhengig av forbindelsen som blir redusert, snakker man om nitratreduserende, jern- og manganreduserende, sulfatreduserende og metanogene forhold. Jo mer redusert redoksforholdene er, jo lavere er den mikrobielle aktiviteten.

### 2.2 Feltarbeide

Arkeologisk vurdering er utført av NIKU v/ Anna Petersén og jordprøver er tatt av NIBIO for videre kjemisk og fysisk analyse v/Ove Bergersen og Hege Bergheim. Måletekniske arbeider i felt er utført av NIBIO ved Thor Endre Nytrø, Srikanthapalan Muthulingam og Ove Bergersen.

### 2.3 Generelt om vurdering av bevaringsforhold i kulturlag – kjemisk analyser av jordprøver.

Gode bevaringsforhold for kulturlag karakteriseres av stabile kjemisk fysiske forhold, og at mikrobiologisk og kjemisk aktivitet er relativt lav. Stabile kjemisk fysiske forhold fører til at naturlige gradienter (f.eks. hydrauliske gradienter eller konsentrasjons-gradienter), som ofte holder naturlige kjemiske prosesser i gang, avtar. Dette medfører langsommere nedbrytning av kulturlag.

I naturen foregår nedbrytning av organisk materiale eller korrosjon av metaller parallelt med redoks-reduksjon av andre forbindelser. Mikroorganismer får energi fra slike reaksjoner og bruker denne energien til bl.a. oppbygging av biomasse. Mest energi får mikroorganismer hvis de kan bruke oksygen til å oksidere organisk materiale. Noe mindre energi genereres hvis det nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) brukes og enda mindre ved å bruke treverdige jern, Fe(III), fireverdige mangan (Mn(IV)), sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) eller oksidert organisk materiale (se vedlegg 3).



I naturen kan vi derfor observere at aerobe forhold med oksygen til stede, går over til nitrat-reduserende forhold når alt oksygen er brukt opp. Deretter følger mangan-, jern- og sulfatreduserende forhold, før en får metanogene forhold.

Under metanogene forhold observerer man den langsomste nedbrytningen av organisk materiale, og minst oksidering av metallgjenstander. Raskest foregår nedbrytning av organiske gjenstander under aerobe forhold. Nedbrytningshastigheten vil som oftest avta i rekkefølge nitrat-, mangan-, jern-, sulfatreduserende til metanogene forhold. Oksidative og nitratreduserende forhold kan som regel karakteriseres som dårlige bevaringsforhold, mens sulfatreduserende og metanogene forhold kjennemerket bra til utmerket bevaringsforhold. Imidlertid må stedsspesifikke forhold tas i betraktning og ikke minst temperaturer. I vedlegg 3 er det illustrert en enkel oversikt som viser generelt hvordan kulturlagene vurderes på bevaringsforhold. I flere tilfeller vil man få grense-overganger. I det oransje markerte område vises nivåer av målte kjemiske parameter for typisk oksiderende forhold, men reduserende forhold er vist med blått.

Redoksforhold i grunnen kan karakteriseres ved å måle redoks-sensitive elementer i jord og porevann (oksygen, nitrat, ammonium, mangan (II), mangan (IV), jern (III), jern (II), sulfat, sulfid, metan): Høye oksygenkonsentrasjoner indikerer for eksempel at forholdene er oksidative og at mikro-organismene bruker oksygen til å bryte ned organisk materiale. Ved slike forhold kan vi forvente at nitrogen foreligger i stor grad som nitrat og ikke som ammonium, jern foreligger som oksidert jern (III) og konsentrasjon av sulfid vil som regel være svært lavt. Hvis forholdene derimot er jern-reduserende, vil all oksygen og nitrat allerede vært brukt opp av mikroorganismer og nitrogen vil foreligge som ammonium. Det vil kunne måles høyere konsentrasjoner av jern (II) i porevann og jord, men det er heller ikke ventet høye sulfidkonsentrasjoner. Ved sulfatreduserende forhold vil jern alltid være i redusert form.

Andre miljøforhold som vil påvirke bevaring av kulturlag er massenes permeabilitet og vannmetning. Dette vil styre gjennomstrømming av (oksygenrikt) vann gjennom massene og diffusjon av oksygen i porene. Dessuten vil tilstedeværelse av giftige forbindelser kunne hemme nedbrytningen av organisk materiale.

Syre og løselige salter medfører korrosjon av metalloverflater. Økende surhet og saltkonsentrasjon vil framskynde korrosjon av metallgjenstander og forvitring av bein.

## Grunnleggende analyseparameter S1 analyser

Ledningsevne og pH verdi: 25 ml oksygenfritt vann ble tilsatt til 10 g jordprøve. Prøven ble ristet i 1 time uten tilgang av oksygen. Etter at partikkelfasen hadde sedimentert, ble elektrisk ledningsevne målt i vannfasen.

Ledningsevnen ble multiplisert med en faktor 3,6 i henhold til (Shirokova, et al. 2000) for å estimere ledningsevnen i jordmettet ekstrakt. Deretter ble pH-verdien målt i samme prøve.

Tørrstoffinnhold: En våt jordprøve med kjent vekt ble tørket ved 105 °C i 24 timer. Vekttapet etter tørkingen tilsvarende vannmengden i prøven. Tørrstoffbestemmelsen ble foretatt med tre replikanter per prøve.

Glødetap: Tørket jordprøve ble forbrent ved 550 °C i seks timer. Vekttapet, også kalt glødetap er et mål for andel organisk materiale.

## Miljøparameter S2 analyser

Analyser i henhold til analysepakke S2 inkluderer S1 analyser i tillegg til følgende uorganiske parameter:

Bestemmelse av to- og treverdig jern (Fe II, Fe III): Jern (II) og jern (III) bestemmes i henhold til en metode utviklet av (Stookey, 1970) som bruker ferrozine til bestemmelse av jern (II). Jordprøven ekstraheres med 0,5 molar saltsyre i anaerobt miljø.

Jern(II) som lager en fargekompleks med ferrozine bestemmes fotometrisk. Jern (III) som befinner seg i ekstraktet blir deretter redusert til jern (II) ved hjelp av hydroxylamin og total mengde jern bestemt på

samme måte som nevnt ovenfor. Jern (III) bestemmes som differanse av total jern og jern (II) i ekstraktet.

Sulfid: Sulfid ble bestemt i henhold til EPA-standardmetode 9030 og 9034. Jord ble inkubert med 6 molar saltsyre i 60 min i nitrogenatmosfære. Sulfid ble frigjort som hydrogensulfid som transporteres med nitrogen gjennom to sulfidfeller fylt med sinkacetat.

Sulfid ble deretter bestemt titrimetrisk ved å oksidere sulfid til svovel ved hjelp av jod og tilbake titrere med natriumtiosulfat.

Ekstraksjon av sulfid med 6 molar saltsyre (uten koking) vil kvantifisere den andelen av sulfid som relativt raskt oksideres til sulfat i nærvær av oksygen (Rickard og Morse, 2005). I tillegg til amorf sulfid vil dette være mackinawit og greignit. Kun en liten del av pyritt (4-10 %) løses med denne prosedyren.

Pyritt er kjent å være relativt stabil også i nærvær av oksygen og vil bare langsomt reagere til sulfat/svovelsyre. Hvis en vil karakterisere de aktuelle redoksforholdene i grunnen, er det ønskelig å løse så lite pyritt som mulig ut av prøven.

Sulfat: Jordprøven ble ekstrahert med vann og ekstrahert sulfat analysert ved hjelp av ionekromatografi. Analysen ble gjennomført ved Eurofins AS.

Nitrat og ammonium: Prøven ekstraheres med 2 mol/l KCl og analyseres ved hjelp av en TRAACS-800 auto analysator som bruker en fargereaksjon til bestemmelse av nitrat- og ammoniumkonsentrasjon. Analysen ble gjennomført ved Eurofins AS.

## 2.4 Feltarbeid i forbindelse med miljøovervåking

Feltarbeidet i forbindelse med miljøovervåking ble utført i september 2015 av NIBIO. Profilen var ferdig gravet før prøver ble tatt og utstyr for overvåking satt inn og montert sammen i et måleskap. En oversikt i tabell 4 viser plassering og feltmålinger for installasjonene. Utstyret og datalogging ble kontrollert før profil ble fylt igjen etter at bentonitt duk ble lagt inntil profilveggene for å beskytte kulturlag og utstyr.

## 2.5 Miljøovervåking av arkeologiske kulturlag

Jordas varmekapasitet defineres som den varmemengden som skal til for å øke temperaturen i ett kilo jord med en grad. Vann har svært høy varmekapasitet (4,19 KJ/kg). Varme-konduktiviteten (evnen til å lede varme) vil derfor være svært avhengig av vanninnholdet i jorda. En vannmettet jord med høy vannkapasitet (dvs. stor evne til å holde på vann, for eksempel leirjord) vil ha mye større evne til å lede varme enn en tørr jord. Temperatur-svingningene i tette jordarter (silt- og leirholdige) vil derfor være mindre enn for eksempel i sandjord og organisk jord.

I det aktuelle område ønsker NIKU og Riksantikvaren i Trøndelag overvåking av temperatur, jordfuktighet og redoksforhold i 5 år for å se om de påviste arkeologiske kulturlag er utsatt for svingninger og forandringer. Økt temperatur og svingninger i tørt og vått klima kan virke inn på nedbrytingen av de arkeologiske kulturlag.

## 2.6 Installering av sensorer i kulturlag

Sensorer for måling av temperatur og fuktighet som ble installert var av typen TRIME-PICO 32 fra IMKO Modultechnik GmbH. Sensorene kan installeres horisontalt eller vertikalt i jord. Informasjon om sensorene på [www.imko.de](http://www.imko.de).

Sensorene ble installert i ulike høyder av kulturlag i utgravde profiler i september 2015 (Figur 2 og 3). Plasseringen av sensorene var steder hvor arkeologiske prøver ble tatt ut for videre fysisk-kjemisk analyse. Ved siden av jordfuktighet/temperatur sensor, ble også redoks-sensorer fra Ecotech (EKT 950) satt inn. Disse er levert av fra IMKO Modultechnik GmbH. Platina elektroder (EKT 9500201020) ble

satt inn på ulike steder i profilen. I tillegg ble en felles 3M Ag/AgCl Ref. elektrode (EKT 9500201022) satt inn i representative masser som vil kommunisere og redoks verdier fra platina elektrodene. Ref. elektroden ble plassert i et beskyttende rør med gel av 3M Ag/AgCl som skal gi god kontakt med jord og beskytte elektroden. Alle redoksverdiene (Eh.) ble omregnet med +210mV ut fra målt middeltemperatur i kulturlagene.

Måling av redokspotensialet gir informasjon om hvor gode bevaringsforholdene er i området som blir overvåket. Jordfuktighet og temperatur vil vise eventuelle fluktuasjoner når større mengder nedbør og frost påvirker profilen. Ut fra disse målingene vil det være mulig å se hvor stabile forholdene er i kulturlagene.

Veksling mellom tørre og våtere perioder vil medføre at porene i profilen tilføres oksygen. Redoksmålinger vil si mer om hvordan bevaringsforholdene er i kulturlagene. Oksiderende forhold med mye oksygen vil medføre nedbryting av organisk materiale.

Sensorene ble installert i de ulike lagene ved først å bore opp et hull med jordbor med diameter som sensoren i ønsket dybde. Deretter ble sensoren trykket forsiktig på plass i bunn av hullet slik at metallstengene (lengde 11 cm, diameter 0,35 cm) hadde god kontakt med jorda. Sensorer ble stabilisert med masse slik at spenn og press på sensorhodene skulle unngås. Etter at datalogging var startet ble alle sensorer kontrollert med feltmåleutstyr slik at de viste samme jordtemperatur og fuktighet (se tabell 1). Hele profilveggen ble dekket til med bentonitt duk før den ble gjenfylt. Koordinatene hvor sensorene ble plassert er vist i vedlegg 3.

## 2.7 Installering av datalogger

Ledningene fra sensorene ble ført til et beskyttende skap (Vedlegg 1) og koblet sammen til datalogger. Dataloggeren var en UniL og Com fra SEBA Hydrometrie (<http://www.seba-hydrometrie.de/en/applications.html>). Data overføres fra logger via GPRS (datatrafikk over mobil nettet) til internett. På denne måten kan utviklingen i redoks, temperatur- og fuktighetsforhold følges kontinuerlig fra en webside. For at god overføring av signaler skal kunne skje er en spesiell antenne koblet til. Loggeren tilføres strøm via et 12V batteri med lang levetid.

Plassering av de forskjellige sensorene i hver sin profil er vist ved foto i Vedlegg 1.

**Tabell 1. Oversikt over plassering av sensorene i moh. og merknader, feltmålinger på jord temperatur og fuktighet i nærheten av der sensorene ble satt inn.**

Skap sensor nr	Type	Plassering/ hull/ Prøve Nr	Z Koordinater (masl)	Lag nr	SOPS NIKU	Merknader ved prøvetaking	Sensor verdier 20- 30 cm inn	Felt målinger nær
Kobling 1	Redox	4.1	10.10	4.1/2	A2/A3	oksiderende	599 mV	
Kobling 2	Redox	4.2	9.62	4.1/3	A2 ?	reduserende	-40 mV	
Kobling 3	Redox	4.4	8.34	4.1/6	A2	reduserende	-75 mV	
Kobling 4	Redox	4.5	7.88	4.1/7	A2	reduserende	-119 mV	
Kobling 5	Redox	1.1	9.26	1.1/1	A2	oksiderende	486 mV	
Kobling 6	Redox	1.3	8.59	1.1/5	A2	reduserende	-63 mV	
Kobling 7	Temperatur	4.1	10.10	4.1/2	A2/A3		12 °C	
Kobling 8	Fuktighet	4.1	10.10	4.1/2	A2/A3		35.5%	41 %
Kobling 9	Temperatur	4.2	9.62	4.1/3	A2 ?		11.7 °C	
Kobling 10	Fuktighet	4.2	9.62	4.1/3	A2 ?		37.5%	36 %
Kobling 11	Temperatur	4.3	9.10	4.1/4	A1-A2		12 °C	
Kobling 12	Fuktighet	4.3	9.10	4.1/4	A1-A2		40.0%	38 %
Kobling 13	Temperatur	4.4	8.34	4.1/6	A2	Sterk sulfid lukt	10.9 °C	
Kobling 14	Fuktighet	4.4	8.34	4.1/6	A2	Sterk sulfid lukt	44.4%	53 %
Kobling 15	Temperatur	4.5	7.88	4.1/7	A1	Sterk sulfid lukt	11.3 °C	
Kobling 16	Fuktighet	4.5	7.88	4.1/7	A1	Sterk sulfid lukt	45.8%	49 %
Kobling 17	Temperatur	1.1	9.10	1.1/1	A2		13.2 °C	
Kobling 18	Fuktighet	1.1	9.10	1.1/1	A2		45.8%	41 %
Kobling 19	Temperatur	1.2	8.75	1.1/3	A2	øft Lys brun mass	13 °C	
Kobling 20	Fuktighet	1.2	8.75	1.1/3	A2	Latrine ??	48.3%	49 %
Kobling 21	Temperatur	1.3	8.63	1.1/5	A2		12.3 °C	
Kobling 22	Fuktighet	1.3	8.63	1.1/5	A2	Oljeforurensset	72.0%	54 %
Ref elektrode	Redox	Høyre 4.2	9.70	4.1/3				

Ofte kan dataserier fluktuerer mye og derfor beregner vi også medianen\* på dataseriene sammen med gjennomsnitt verdier. Denne verdien gir en mer riktig verdi hvis datamaterialet svinger mye.

\* Median verdi: I statistikk er median et sentralitetsmål som defineres som verdien til tallet som deler et utvalg i to deler slik at hver del har like mange elementer. Fordelen ved å bruke median i forhold til middel eller gjennomsnittverdi er at median er stabil overfor ekstreme observasjoner (som blant annet kan fremkomme ved målefeil).

## 2.8 Stabilitet og nedbryting ved undersøkelse av jordprøver fra midten og bunnen ved Profil 1 Hull 4

Tre flasker (120mL) ble tilført 5 gram jord fra hvert av kulturlagene med god bevaring SOPS verdi A4 (9.10 moh og 7.88 moh).

Anaerob veske (2 ml) ble tilsatt til hver flaske med jordprøve og alle flasker ble opparbeidet i anaerob atmosfære. Flaskene ble satt ved 10°C i vannbad. Innholdet av produsert CO<sub>2</sub> inne i hver flaske ble målt ca hver måned på en GC-gassanalysator Agilent micro gas chromatograph (Agilent Technologies 3000A). Hensikten med disse forsøkene er å se hvor stabilt det organiske materialet er, om det brytes ned med luft (aerobt) og når luft ikke er tilstede (anaerobt) ved lav temperatur.

Etter gassmålingene inne i flasken ble det beregnet akkumulert CO<sub>2</sub> i hver av flaskene. Ut fra disse målinger ble decay raten (nedbrytingsraten) beregnet over tid i mg karbon (CO<sub>2</sub>) per g organisk material (OM) per dag. Forsøket er en langtidsstudie på 500 dager utført parallelt med overvåkingen på tomten in situ i 5 år.

## 3 Resultater og diskusjon

### 3.1 Forundersøkelse, vurdering av bevaringsforholdene i begge profiler

En detaljert beskrivelse av bevaringsforhold og bevaringstilstand er beskrevet i NIKU/NIBIO rapport (Petersen og Bergersen 2017). Tabell 2 viser oversikt over kjemiske- og bevaringsforhold ved installasjon og oppstart av overvåkingen høsten 2015. Jordprøvene viste gode bevaringsforhold fra 9.10 moh. og ned i dypere lag selv om det organiske innholdet var lavt, men med middels vanninnhold som hindrer luft å trenge ned.

**Tabell 2. Kjemiske og fysiske forhold i prøver hentet fra Profil 1 Hull 1 og 4 etter S2 analyse sammenstilt med bevaringsforhold for organisk og uorganisk materiale.**

Prøver	Dyp (moh)	Lag	Tørrstoff (%)	Organisk materiale (%)	Vann innhold (%)	pH	Lednings- evne uScm <sup>-1</sup>	Bevarings forhold			
								Organisk material	Inorganisk material	Redoks forhold *	Arkeologiske tilstand *
<b>Profil1 Hull 4</b>											
4.1	10.10	4.1/2	64	13	36	7.3	584	Dårlig	Middels	A2	A2 - A3
4.2	9.62	4.1/3	62	14	38	7.1	904	Middels	Middels	A2-A3	A2
4.3	9.10	4.1/4	65	19	35	7.0	670	Bra	Middels	A4	A1-A2
4.4	8.34	4.1/6	68	10	32	7.1	499	Bra	Middels	A4	A2
4.5	7.88	4.1/7	52	21	48	6.8	695	Bra	Middels	A4	A1-A2
4.6 Ref.	9.70	4.1/3	77	5	23	6.7	792	Dårlig	Middels	A2	A2
<b>Profil1 Hull 1</b>											
1.1	9.10	1.1/1	55	17	45	6.8	2606	Middels	Middels	A2-A3	A2
1.2	8.75	1.1/3	66	11	34	6.8	2059	Bra	Middels	A4	A2
1.3	8.63	1.1/5	61	14	39	7.0	767	Bra	Middels	A3-A4	A2
1.4 **	8.63	1.1/5	82	3	28	6.7	1271	Bra	Middels	A3-A4	A2

	Lavt organisk materiale 10%
	Middels organisk materiale 10-25%
	Høyt organisk materiale 30-40%
	Lavt vanninnhold 10-20%
	Middels vanninnhold 30-40%
	Høyt vanninnhold 50-60%

	Elendig til dårlig
	Middels
	Bra til utmerket

	Oksiderende forhold
	Reduserende forhold
	* SOPS : NS 9451:2009
	** Diesel forurenset

## 3.2 Jordtemperaturen målt i kulturlag i profil 1 Hull 1 og Hull 4

Det er målt små endringer i jordtemperatur i profil 1 Hull 1 & Hull 4. Gjennomsnittstemperaturen målt det første år er alle under 10°C og 7°C i 2017 i Hull 1 og Hull 4 (Tabell 3 & 4, Figur 2). I løpet av 2018 har beregnet gjennomsnittstemperatur sunket 1 grad til 5-6 °C i Hull 1 (Tabell 4). I Hull 4 ligger fortsatt temperaturen på 6-7 °C gjennom 2018. Dette viser at jordtemperaturen ikke har økt etter at nye bygg er satt opp i 2017 og 2018. Max temperaturen i kortere periode om sommeren har ikke økt vesentlig i 2018. Den har sunket en grad i Hull 1 og er uforandret i Hull 4. Liten forskjell i temperatur mellom øvre og nedre profil 1 i begge hull er observert i 2018. Det er kun små svingninger observert i bunnen av Hull 4 som sannsynligvis skyldes fluktuerende tilførsel av vann.

**Tabell 3. Min, maks-, median og gjennomsnittsverdier av jordtemperatur målt fra Hull 1 og 4 i måleperioden fra sept. 2015 til sept. 2016.**

Temperatur	Temp 1. 1	Temp 1. 2	Temp 1. 3	Temp 4.1	Temp 4.2	Temp 4.3	Temp 4.4	Temp 4.5
2015-2016	Hull 1	Hull 1	Hull 1	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4
°C	9.10 moh	8.75 moh	8.63 moh	10.10 moh	9.62 moh	9.10 moh	8.34 moh	7.88 moh
Min	2,6	3,6	3,9	1,2	1,9	3,4	4,5	5,0
Maks	14,5	13,7	12,8	14,3	12,7	12,2	11,5	11,9
Median	8,8	9,2	9,0	6,6	7,3	8,1	8,5	8,8
Gjennomsnitt	8,8	9,1	8,9	7,3	7,4	8,1	8,3	8,7

**Tabell 4. Min, maks-, median og gjennomsnittsverdier av jordtemperatur målt fra Hull 1 og 4 i måleperioden 2017 og 2018.**

Temperatur	Temp 1. 1	Temp 1. 2	Temp 1. 3	Temp 4.1	Temp 4.2	Temp 4.3	Temp 4.4	Temp 4.5
2017	Hull 1	Hull 1	Hull 1	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4
°C	9.10 moh	8.75 moh	8.63 moh	10.10 moh	9.62 moh	9.10 moh	8.34 moh	7.88 moh
Min	2,3	3,6	3,8	1,3	1,9	3,1	3,9	4,0
Maks	12,0	11,4	10,9	13,2	11,9	11,4	10,3	10,4
Median	6,2	6,7	6,5	4,6	4,7	5,8	6,2	6,5
Gjennomsnitt	6,7	7,2	7,2	5,8	5,8	6,5	6,7	7,0

Temperatur	Temp 1. 1	Temp 1. 2	Temp 1. 3	Temp 4.1	Temp 4.2	Temp 4.3	Temp 4.4	Temp 4.5
2018	Hull 1	Hull 1	Hull 1	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4
°C	9.10 moh	8.75 moh	8.63 moh	10.10 moh	9.62 moh	9.10 moh	8.34 moh	7.88 moh
Min	1,4	2,1	2,2	0,0	1,1	2,3	2,9	2,8
Maks	10,3	10,0	9,8	13,2	12,0	11,6	10,6	11,8
Median	5,7	5,5	5,1	9,3	7,8	7,1	6,3	6,5
Gjennomsnitt	5,5	5,9	5,8	7,2	6,6	6,8	6,6	6,8

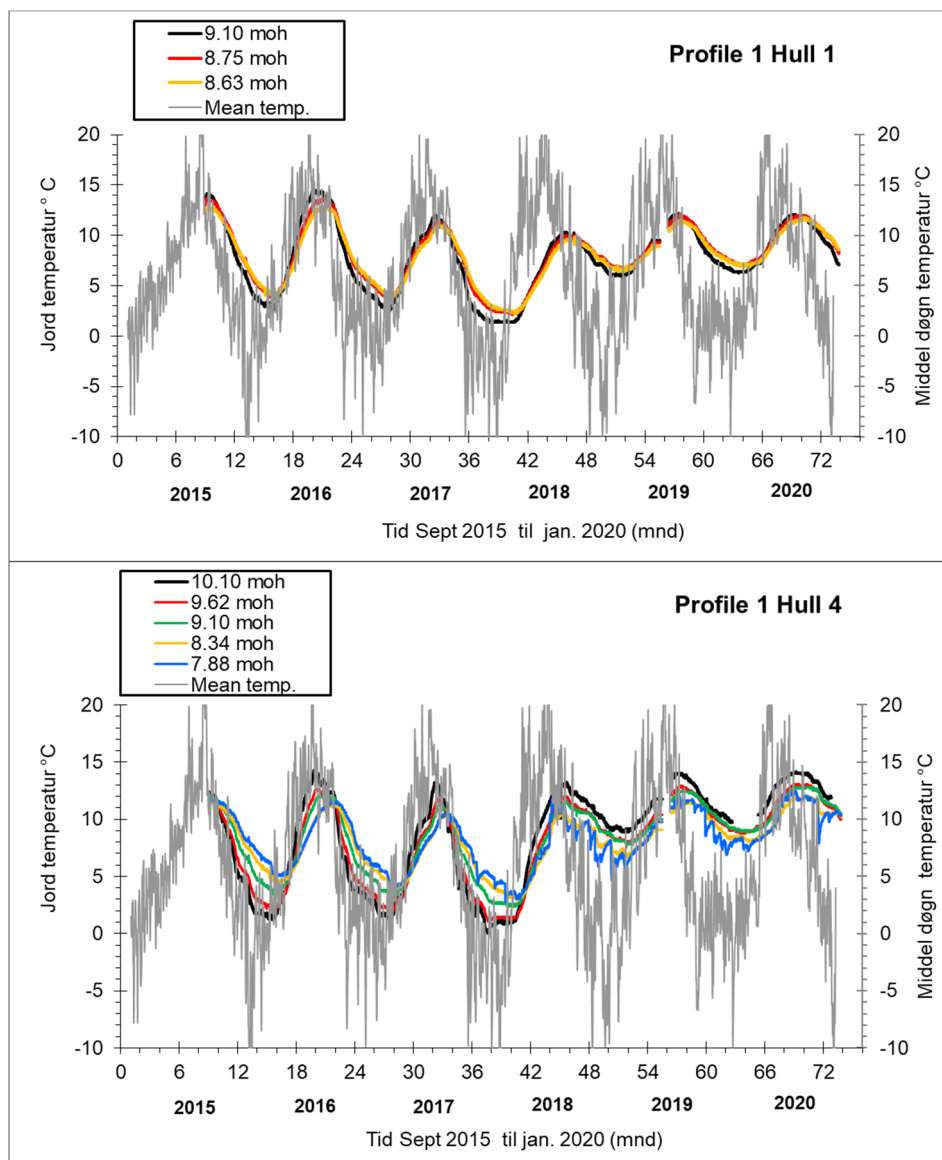
Gjennomsnittstemperaturen målt fra gjennom 2019 og 2020 viser en gradvis økning i hull 1 og hull 4 på 2-4 grader (Figur 2, Tabell 5). Begge profiler fra hull 1 & 4 i øvre del er blitt påvirket noe etter at nye bygg og stenheller er lagt, selv om maks temperaturen disse årene ikke har økt vesentlig. Heldigvis ligger ikke temperaturen mye over 10 grader. Figur 2 viser tydelig at temperaturen ikke synker like mye og påvirkes mindre av vinterperiode som etter at nybygg er satt opp. Dette kan medføre en høyere gjennomsnittstemperatur. Medianen er derfor noe lavere i begge profiler de to siste årene.

Tabell 5. Min, maks-, median og gjennomsnittsverdier av jordtemperatur målt fra Hull 1 og 4 i måleperioden 2019 og 2020.

Temperatur	Temp 1. 1	Temp 1. 2	Temp 1. 3	Temp 4. 1	Temp 4. 2	Temp 4. 3	Temp 4. 4	Temp 4. 5
2019	Hull 1	Hull 1	Hull 1	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4
°C	9.10 moh	8.75 moh	8.63 moh	10.10 moh	9.62 moh	9.10 moh	8.34 moh	7.88 moh
Min	5,8	6,6	6,4	8,9	7,5	7,8	6,7	4,7
Maks	12,2	12,1	11,5	14,0	13,0	12,5	11,6	12,1
Median	8,3	8,7	8,4	10,8	9,8	9,5	8,7	8,8
Gjennomsnitt	8,6	8,9	8,7	11,1	10,1	10,0	9,1	8,9

Temperatur	Temp 1. 1	Temp 1. 2	Temp 1. 3	Temp 4. 1	Temp 4. 2	Temp 4. 3	Temp 4. 4	Temp 4. 5
2020	Hull 1	Hull 1	Hull 1	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4
°C	9.10 moh	8.75 moh	8.63 moh	10.10 moh	9.62 moh	9.10 moh	8.34 moh	7.88 moh
Min	6,3	7,1	6,8	9,7	8,7	8,9	8,0	6,9
Maks	12,1	12,0	11,8	14,2	13,1	12,8	12,0	12,5
Median	9,1	9,5	9,1	12,8	10,9	10,5	9,6	9,4
Gjennomsnitt	9,0	9,4	9,2	12,4	10,9	10,8	9,9	9,7



Figur 2. Jordtemperatur målt i 3 ulike kulturlag fra Hull1 (over) og 5 ulike dyp fra Hull 4 (under) sammenstilt med middel utetemperatur per dag i Trondheim sentrum (data fra [www.yr.no](http://www.yr.no)) i perioden 2015 til 2020.



Temperaturmålingene følger middel utetemperatur (Figur 2). Lav temperatur er gunstig for bevaring av organisk materiale både med og uten nærvær av oksygen. Ved slike temperaturer skjer det lite oksidering av organisk materiale både med kjemisk eller mikrobiologisk aktivitet. Studier på nedbryting av organisk materialet fra Schultz gt i Trondheim (Petersén & Bergersen 2016) og undersøkelser utført ved Nationalmuseet i Danmark (Hollesen & Matthiesen, 2011) viser at ved omkring 10°C skjer det svært lite, men økning fra 10 og 15°C øker nedbrytingshastigheten vesentlig, spesielt med oksygen tilgjengelig spesielt i kulturlag med dårligere bevaringsgrad. Uten oksygen til stedet vil tungt nedbruttbart materiale, som for eksempel trevirke, være beskyttet over tid. Nye undersøkelser på prøver fra Munkhaugveita 5-7 viser svært lite destruksjon av karbon under anaerobe forhold ved 10°C (Bergersen, 2016), og videre forsøk i 2017 gjennomført med luft til stede viser samme resultat (kap 3.5 Figur 8).

### 3.3 Jordfuktigheten målt i kulturlag i Profil 1 i Hull 1 og Hull 4

Jordfuktigheten registrert i profilene på tomten Munkhaugveita 5-7 i Trondheim ligger noe høyere i profil 1 Hull 1 sammenlignet med profil 1 Hull 4 første år av overvåkingen (Tabell 6). Gjennomsnittlig jordfuktighet beregnet i Hull 1 var 60-70 %. I øvre lag ble fuktigheten målt noe lavere omkring 50 % i de første måneder, men steg og fluktuerte mye i siste del av måleperioden av 2017 med økt nedbør som tydelig påvirker mer det øvre kulturlaget mer enn i dypere lag i Hull 1 (Figur 3 over). Derfor er det også observert en økning i gjennomsnittlig jordfuktighet i øvre del av profilen på 9.10 moh. fra 2016 til 2017 (Tabell 6). Jordfuktigheten er redusert i lag 1.1 (9.10 moh.) fra 60 til 53 % i 2018 under bygging av nytt bygg med fortsatt grad av fluktuasjoner (Figur 3 over og Tabell 7). Senere i 2019 og 2020 har sistnevnte lag en økning til gjennomsnitt 71 % (Tabell 8). De øvrige lag i Hull 1 har også en gjennomsnittlig økning de to siste år.

**Tabell 6** Min, maks-, median og gjennomsnittsverdier av jordfuktighet målt fra Hull 1 og 4 i måleperioden fra sept. 2015 til sept. 2016.

Jord fuktighet 2015-2016 %	Fukt. 1 .1 Hull 1 9.10 moh	Fukt. 1 .2 Hull 1 8.75 moh	Fukt. 1 .3 Hull 1 8.63 moh	Fukt. 4.1 Hull 4 10.10 moh	Fukt. 4.2 Hull 4 9.62 moh	Fukt. 4.3 Hull 4 9.10 moh	Fukt. 4.4 Hull 4 8.34 moh	Fukt. 4.5 Hull 4 7.88 moh
<b>Min</b>	46	48	62	32	37	37	39	45
<b>Maks</b>	98	67	73	36	75	39	42	100
<b>Median</b>	59	60	68	34	44	38	40	87
<b>Gjennomsnitt</b>	60	60	68	34	49	38	40	85

I hull 4 har fluktuasjonen avtatt i bunnen av profilen og viser stabil høy jordfuktighet (Figur 3 under og Tabell 7). Tabell 7 & 8 viser at i overvåkingsperioden fra 2018 til 2020, var fuktigheten gjennomsnittlig lik i de ulike kulturlag fra Hull 4. En svak økning fra 84 % til 99 % ble observert i kulturlag 4.5 (7.88 moh.). De øvrige sensorer viser fortsatt mer stabil jordfuktighet omkring 40 til 50% i toppen (10.10) og midten (9.62 ned til 8.34 moh.) av profilen i hele måleperioden fram til 2020 (Figur 3, under).

Figur 3 viser en svak nedgang i jordfuktighet fra den midtre del av profilen fra 2018 og frem til 2020 etter at nytt hus er bygget ferdig. Ingen av kulturlagene i begge hullene viser tegn til redusert jordfuktighet gjennom overvåkingsperioden på 5 år.

Det kan også se ut som om vann (evt. innsig eller mulig grunnvann) samler seg i bunnen av profilene. Ved installasjon ble profilen ved Hull 1 og Hull 4 fylt med vann i bunnen uten at det kom nedbør.

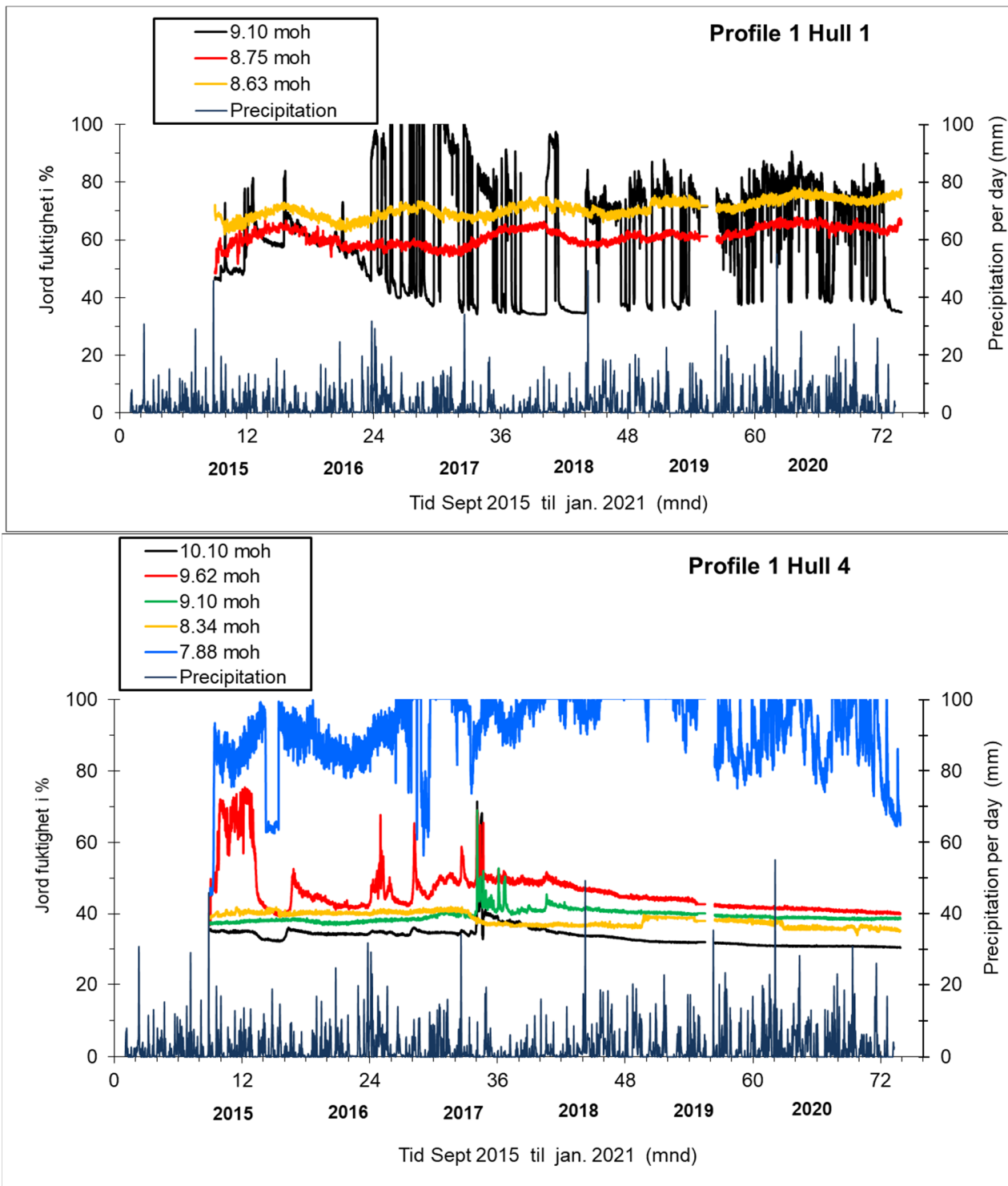
Over tid er det sensoren i bunnen av Hull 4 på 7.88 moh. som påvirkes mest med høy jordfuktighet siden sensoren 4.5 ligger omkring en meter dypere enn i sensor 1.3 Hull 1 (8.63 moh.). I sistnevnte Hull 1 er det påvist et høyere gjennomsnitt i jordfuktighet i de dypere lagene.

**Tabell 7. Min, maks-, median og gjennomsnittsverdier av jordfuktighet målt fra Hull 1 og 4 i måleperioden 2017 og 2018.**

Jord fuktighet	Fukt. 1 .1	Fukt. 1 .2	Fukt. 1 .3	Fukt. 4.1	Fukt. 4.2	Fukt. 4.3	Fukt. 4.4	Fukt. 4.5
2017	Hull 1	Hull 1	Hull 1	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4
%	9.10 moh	8.75 moh	8.63 moh	10.10 moh	9.62 moh	9.10 moh	8.34 moh	7.88 moh
Min	34	54	65	33	42	38	37	56
Maks	100	65	73	71	69	69	42	100
Median	64	58	69	35	49	39	40	97
Gjennomsnitt	65	59	69	36	49	40	40	94
2018	Hull 1	Hull 1	Hull 1	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4
%	9.10 moh	8.75 moh	8.63 moh	10.10 moh	9.62 moh	9.10 moh	8.34 moh	7.88 moh
Min	34	57	66	33	44	40	36	86
Maks	98	66	75	38	52	45	38	100
Median	38	61	71	34	48	41	37	100
Gjennomsnitt	53	61	71	35	48	41	37	99

**Tabell 8. Min, maks-, median og gjennomsnittsverdier av jordfuktighet målt fra Hull 1 og 4 i måleperioden 2019 & 2020.**

Jord fuktighet	Fukt. 1 .1	Fukt. 1 .2	Fukt. 1 .3	Fukt. 4.1	Fukt. 4.2	Fukt. 4.3	Fukt. 4.4	Fukt. 4.5
2019	Hull 1	Hull 1	Hull 1	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4
%	9.10 moh	8.75 moh	8.63 moh	10.10 moh	9.62 moh	9.10 moh	8.34 moh	7.88 moh
Min	36	59	69	31	41	39	36	75
Maks	88	66	76	33	45	41	40	100
Median	72	61	72	32	44	40	38	100
Gjennomsnitt	65	62	72	32	43	40	38	94
2020	Hull 1	Hull 1	Hull 1	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4	Hull 4
%	9.10 moh	8.75 moh	8.63 moh	10.10 moh	9.62 moh	9.10 moh	8.34 moh	7.88 moh
Min	35	61	72	31	40	38	34	66
Maks	91	68	78	31	42	40	38	100
Median	75	65	75	31	41	39	36	92
Gjennomsnitt	68	65	75	31	41	39	36	91



Figur 3. Jordfuktighet målt i 3 ulike kulturlagdyp fra Hull 1 (over) og 5 ulike dyp fra Hull 4 (under) sammenstilt med mm nedbør per dag i Trondheim sentrum (data fra [www.yr.no](http://www.yr.no)) i perioden 2015 til 2020.

### 3.4 Redoksførhold målt i kulturlag i profil 1 fra Hull 1 og Hull 4 sammenstilt og vurdert sammen med jordfuktighet

Redokspotensialet indikerer hvor mye oksygen som er til stedet i jordens porevolum ved de ulike kulturlagene. Med høy jordfuktighet vil porevolumet til luft bli redusert. For å si det på en annen måte vil det ikke være mye plass til oksygen hvis porene i kulturlagene er fylt med vann. Tette kulturlag med mindre organisk innhold og lavere jordfuktighet kan også hindre at luft trenger ned til kulturlagene. Redoksførholdene i både Hull 1 og Hull 4 profil 1 viser at redoksførholdene har sunket i øvre lag gjennom overvåkingsperioden (Figur 4). Figur 5 & 6 viser også lavere og stabilt redokspotensialet i nedre del av profil 1 i både Hull 4 og Hull 1 hvor jordfuktigheten var høyere i 2016 til 2020.

Beregninger viser at gjennomsnittsverdien målt i begge redokssensorene i Hull 1 viste nedgang fra 2015 til 2018. De to siste årene av overvåkingen har begge målepunktene i profil 1 Hull 1 vist negative verdier; mellom -190 og ned til -250 mV (Tabell 9,10 & 11). Øvre del av profilen som hadde positive verdier de første år fram til 2017 viser nå mer reduserende forhold enn i dypere lag som kan påvirkes noe av grunnvann som siger inn (Figur 4, Tabell 10 & 11). Begge gjennomsnittverdiene er gunstig for bevaring av organisk materiale i profilen. De samme tabeller viser mindre forskjell i beregnet gjennomsnittsverdi fra Hull 4 i 2015 til 2017. I øvre kulturlag ble det observert videre nedgang i redoksførholdene i begge kulturlag i løpet av 2018 fra både profil 1 Hull 4, men størst reduksjon i øvre del av profil 1 Hull 1 (Figur 4). I øvre del av profil 1 Hull 4 ble det påvist mer oksiderende forhold de første 3 år, men er nå nærmere +200 mV som tilsier mindre på virkning av oksygen.

Måledata viser at øverste kulturlag profil 1 Hull 4 på 10.10 moh. gir noe bedre beskyttelse i 2018 enn fra tidligere år ved at redokspotensialet nå er sunket fra +600 mV til +300 mV i overgangen 2018 til 2019 (Tabell 9 & Figur 4). Gjennomsnittsverdier de siste to årene viser at redokspotensialet her sunket under 300 mV i øvre kulturlag og gode reduserende forhold i de dypeste lag på -121 til -164 mV. Kulturlaget i midten av profil 1 Hull 4 på 9.10 moh. viser redokspotensialet i gjennomsnitt omkring +200 mV. Her vil det være midlere bevaringsforhold ved at redoksverdiene ligger i grenseland hvor man kan påvise og måle nærvær av oksygen eller ikke. Dette er beskrevet senere i kap. 3.4 (Figur 7). I nedre lag er det mer stabile beskyttende anoksiske forhold uten oksygen (Figur 4). Dette samsvarer med bevaringsforholdene i Hull 1 for organisk materiale vist i Tabell 2. Figur 4 viser at redokspotensialet ved 9.10 moh som sank i 2019 og steget til samme nivå som i kulturlag på 10.10 moh. gjennom 2020.

**Tabell 9. Min, maks-, median og gjennomsnittsverdier av redoksførholdene målt fra Hull 1 og 4 i måleperioden fra sept. 2015 til sept. 2016.**

Redox- condition	Redox 1.1 9.10 moh	Redox 1.3 8.63 moh	Redox 4.1 10.10 moh	Redox 4.2 9.10 moh	Redox 4.4 8.34 moh	Redox 4.5 7.88 moh
2015 & 2016	mV	mV	mV	mV	mV	mV
Min	339	-140	540	-46	-106	-168
Max	639	31	732	302	-49	-118
Median	412	-99	709	259	-95	-135
Average	433	-78	699	253	-93	-138

Tabell 10. Min, maks-, median og gjennomsnittsverdier av redoksf forholdene målt fra Hull 1 og 4 i måleperioden 2017 & 2018.

Redox- condition 2017	Redox 1.1 9.10 moh mV	Redox 1.3 8.63 moh mV	Redox 4.1 10.10 moh mV	Redox 4.2 9.10 moh mV	Redox 4.4 8.34 moh mV	Redox 4.5 7.88 moh mV
Min	-257	-198	399	157	-108	-146
Max	597	-99	729	343	-94	-120
Median	413	-120	714	244	-101	-137
Average	200	-129	655	229	-102	-136

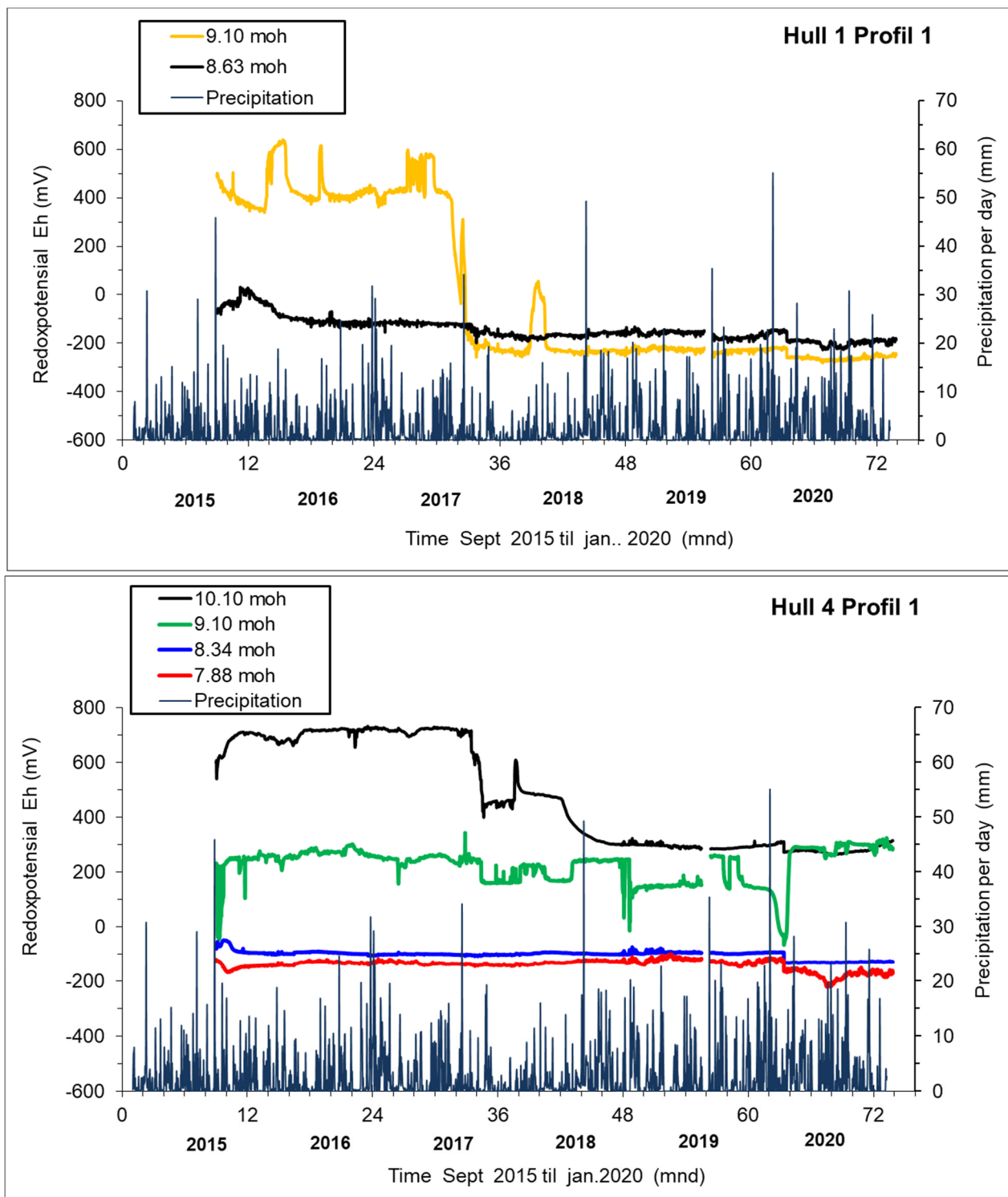
Redox- condition 2018	Redox 1.1 9.10 moh mV	Redox 1.3 8.63 moh mV	Redox 4.1 10.10 moh mV	Redox 4.2 9.10 moh mV	Redox 4.4 8.34 moh mV	Redox 4.5 7.88 moh mV
Min	-256	-192	298	-13	-104	-145
Max	56	-135	609	248	-85	-117
Median	-231	-166	397	224	-99	-132
Average	-206	-165	401	208	-98	-132

Tabell 11. Min, maks-, median og gjennomsnittsverdier av redoksf forholdene målt fra Hull 1 og 4 i måleperioden 2019 & 2020.

Redox- condition 2019	Redox 1.1 9.10 moh mV	Redox 1.3 8.63 moh mV	Redox 4.1 10.10 moh mV	Redox 4.2 9.10 moh mV	Redox 4.4 8.34 moh mV	Redox 4.5 7.88 moh mV
Min	-258	-197	282	106	-100	-147
Max	-207	-133	323	262	-74	-100
Median	-226	-161	292	150	-95	-126
Average	-226	-164	293	170	-95	-126

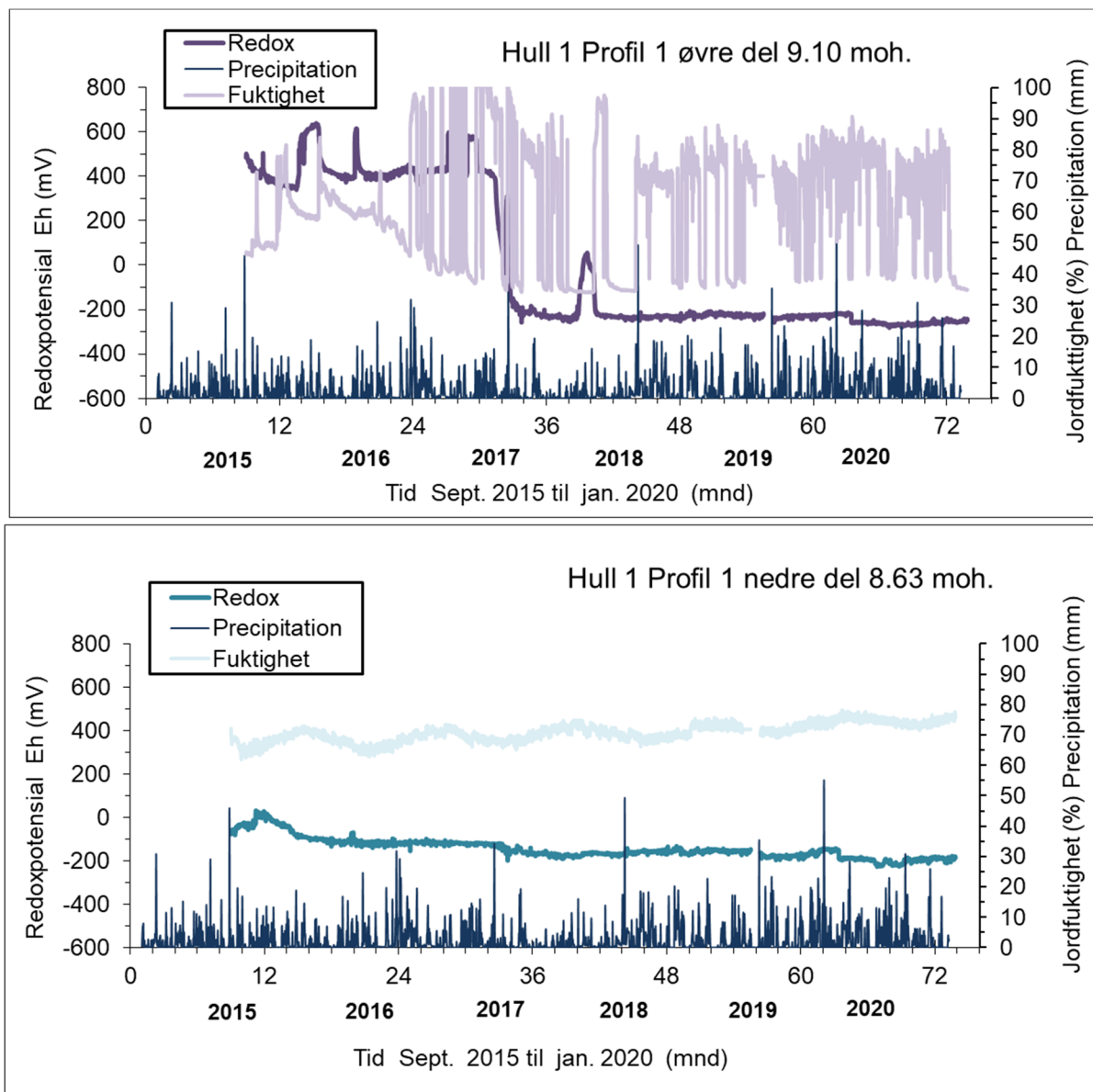
  

Redox- condition 2020	Redox 1.1 9.10 moh mV	Redox 1.3 8.63 moh mV	Redox 4.1 10.10 moh mV	Redox 4.2 9.10 moh mV	Redox 4.4 8.34 moh mV	Redox 4.5 7.88 moh mV
Min	-281	-227	262	-67	-134	-222
Max	-214	-142	312	320	-93	-114
Median	-259	-191	278	289	-131	-169
Average	-253	-189	282	238	-123	-165



Figur 4. Redoksførhold målt fra profil 1 fra Hull 1 (over) og profil 1 Hull 4 (under), sammenstilt med mm nedbør per dag i Trondheim sentrum (data fra [www.yr.no](http://www.yr.no)) i perioden 2015 til 2020.

Redoksførhold sammenstilt med jordfuktigheten på samme høydemeter er illustrert i ulike figurer for å vise øvre og nedre deler av profilveggene fra begge Hull (Figur 5 & 6a&6b). Figur 5 viser at i øvre del av profil 1 Hull 1 (9.10 moh.) har økt nedbør hatt påvirkning og gitt høyere jordfuktighet som fluktuierer, og som over tid har redusert redokspotensialet fra +433 i 2016 til negativ verdi ned til omkring -200 mV i 2018 og som har stabilisert seg på et lavt nivå gjennom 2019 & 2020.

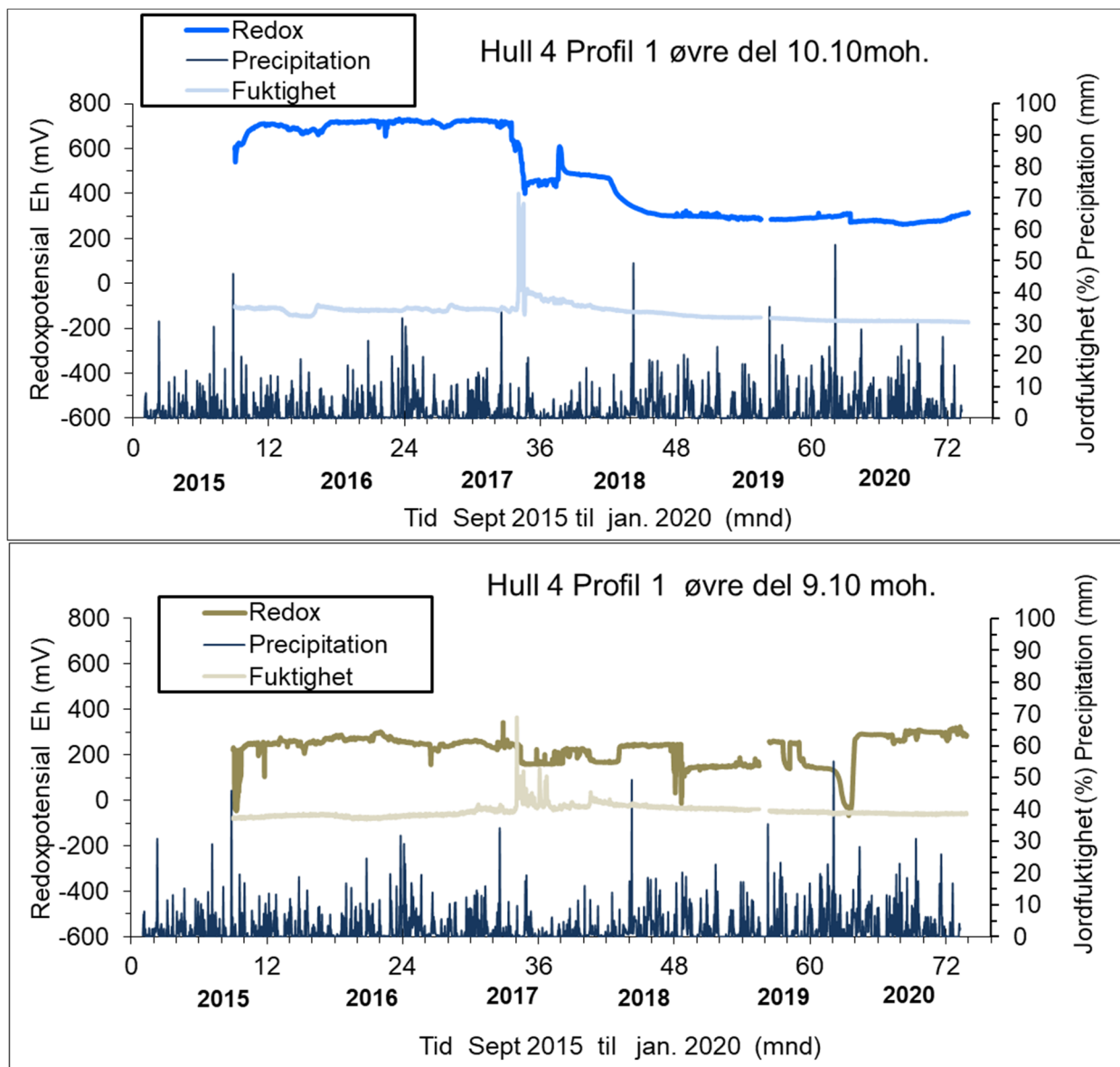


Figur 5. Jordfuktighet og redoksførhold målt i øvre og nedre kulturlag fra profil 1 fra Hull 1 sammenstilt med mm nedbør per dag i Trondheim sentrum (data fra [www.yr.no](http://www.yr.no)) i perioden 2015 til 2020.

I nedre del av profilen på (8.63 moh.) har det skjedd liten forandring hvor redoksførholdene er negative og jordfuktigheten ligger stabilt på 60-70 %.

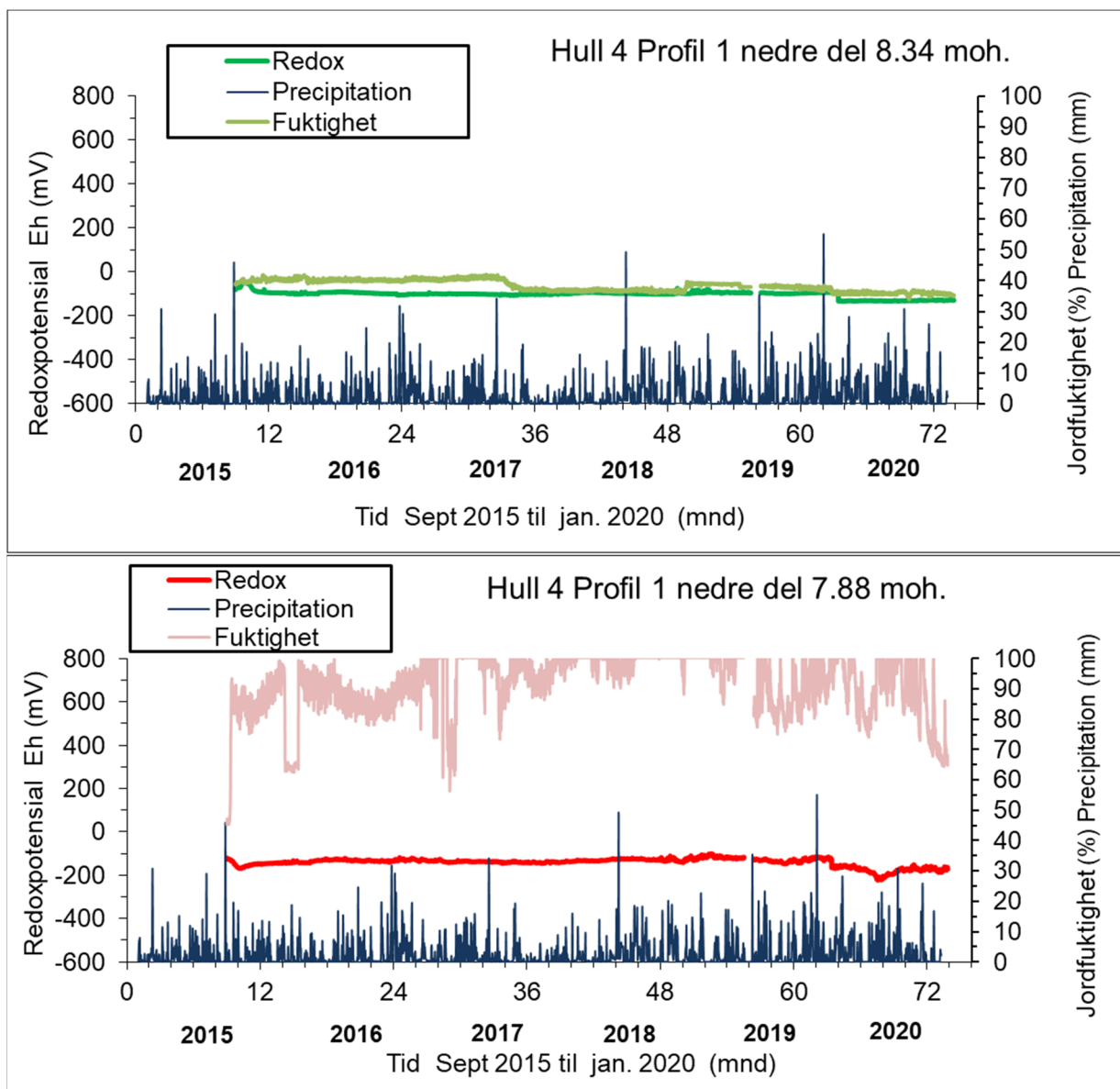
Figur 6a fra øvre del av profil 1 Hull 4 viser at lavere jordfuktighet gir noe mer oksiderende redoksførhold med målt redoksverdier opp mot +700 mV (10.10 moh.) og ned til +252 mV (9.10 moh). Både jordfuktighet og redokspotensialet varierer lite med nedbør. Gledelig er at redokspotensialet har sunket til ca +300 mV mot slutten av 2018 og videre inn i 2019 og 2020 etter at nytt bygg er satt opp. I løpet av 2020 har redokspotensialet ved 9.10moh. steget til samme nivå som 10.10moh, men nærmere +200 enn +300mV. Ellers er det små forandringer fra de ulike lag.

Øvre del i profil 1 Hull 4 har fortsatt mindre oksiderende forhold sammenlignet med de tidligere år 2015-2018. Nedre del under 9 moh. viser nå lavere negative redoksverdier (Figur 6b & Tabell 11).



Figur 6a. Jordfuktighet og redoksforhold målt i øvre kulturlag fra profil 1 fra Hull 4 sammenstilt med mm nedbør per dag i Trondheim sentrum (data fra [www.yr.no](http://www.yr.no)) i perioden 2015 til 2020



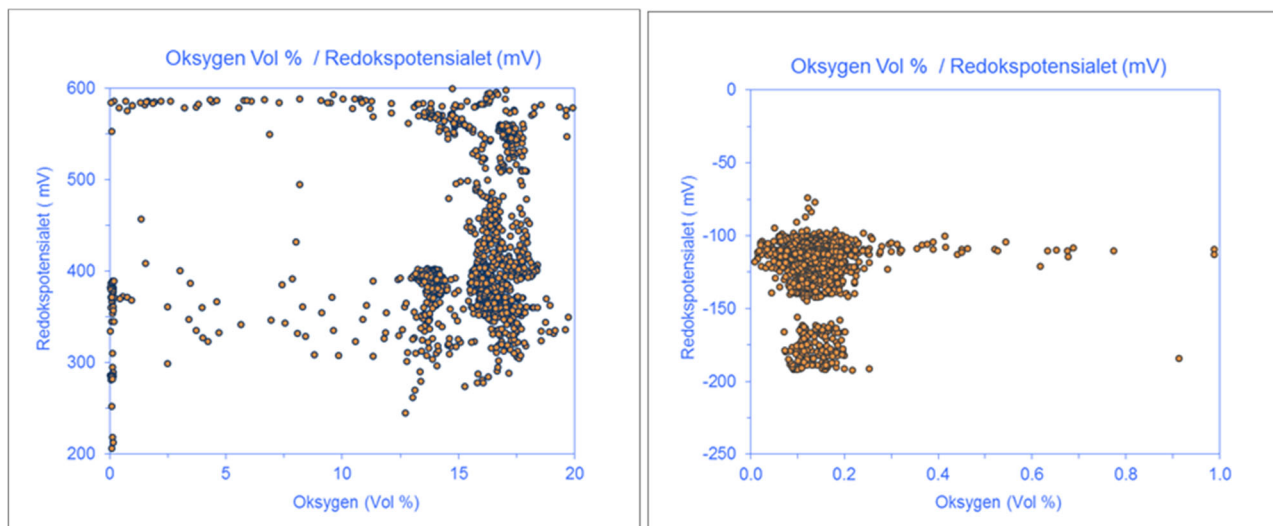


Figur 6b. Jordfuktighet og redoksforhold målt i nedre kulturlag fra profil 1 fra Hull 4 sammenstilt med mm nedbør per dag i Trondheim sentrum (data fra [www.yr.no](http://www.yr.no)) i perioden 2015 til 2020

Hva sier måling av redokspotensialet om hvor mye oksygen som er til stedet i en profil? Overvåking utført i miljøbrønner fra mettede kulturlag med og uten inntrenging av grunnvann, hvor oksygen og redokspotensialet er målt samtidig, viser at redokspotensialverdier lavere enn +200 mV ikke gir store målbare forskjeller. Forskjellen fra +200 mV til -400 mV viste løst oksygen 0,3 til 0,1 Vol %. Verdier over + 200 mV viste økt oksygeninnhold i vannet (Bergersen, 2014). Dette viser at et mulig grenseskille ligger i området +200 mV i grunnvannsbrønner som indikerer hvor mye oksygen som er løst i vannet (data ikke vist).

Målinger i umettet sone fra Oslo har vist at redokspotensialet fra +300 mV og oppover ga et innhold av oksygen fra 12 til 18 Vol % oksygen (Figur 7). Ved målte redoksverdier fra -75 mV og ned til -200 mV viste målinger med optiske sensorer, oksygeninnhold på 0,2 ned til 0,05 Vol % i umettet kulturlag hvor måleusikkerheten øker siden man er i ytterkant av måleområdet for optisk oksygen sensorer.

Som våre tidligere målinger i vann indikerte, viser også målinger i umettet sone at redokspotensialet ved +200 mV kan være en slags kritisk grenseverdi for hvor mye oksygen som er tilstede i kulturlagenes porer, og som igjen kan påvirke nedbryting av organisk materiale i kulturlag. Stiger redokspotensialet fra +300 til +600 mV øker målt Vol% oksygen raskt fra 12- 18 % (Figur 7).



**Figur 7.** Punktdiagram og korrelasjon mellom målt redokspotensialet og innhold av oksygen i umettet profil fra to ulike kulturlag. Hovedtyngden av verdiene fra +300mV og oppover viser høyere oksygenverdier på 12 til 18 Vol %, mens med negative redoksverdier fra -75 mV og ned til -200 mV viser hovedtyngde av oksygen målt, å ligge mellom 0,1 til 0,2 Vol % og er i nedre skal hvor måleusikkerheten blir større.

Derfor er det kun øvre lag av kulturlagene på 10, 10 og 9.10 moh. i Munkhaugveita 5-7 som ligger nærmere denne grense (Tabell 11). De siste gjennomsnittverdiene i 2020 viser +280 mV til +230 mV.

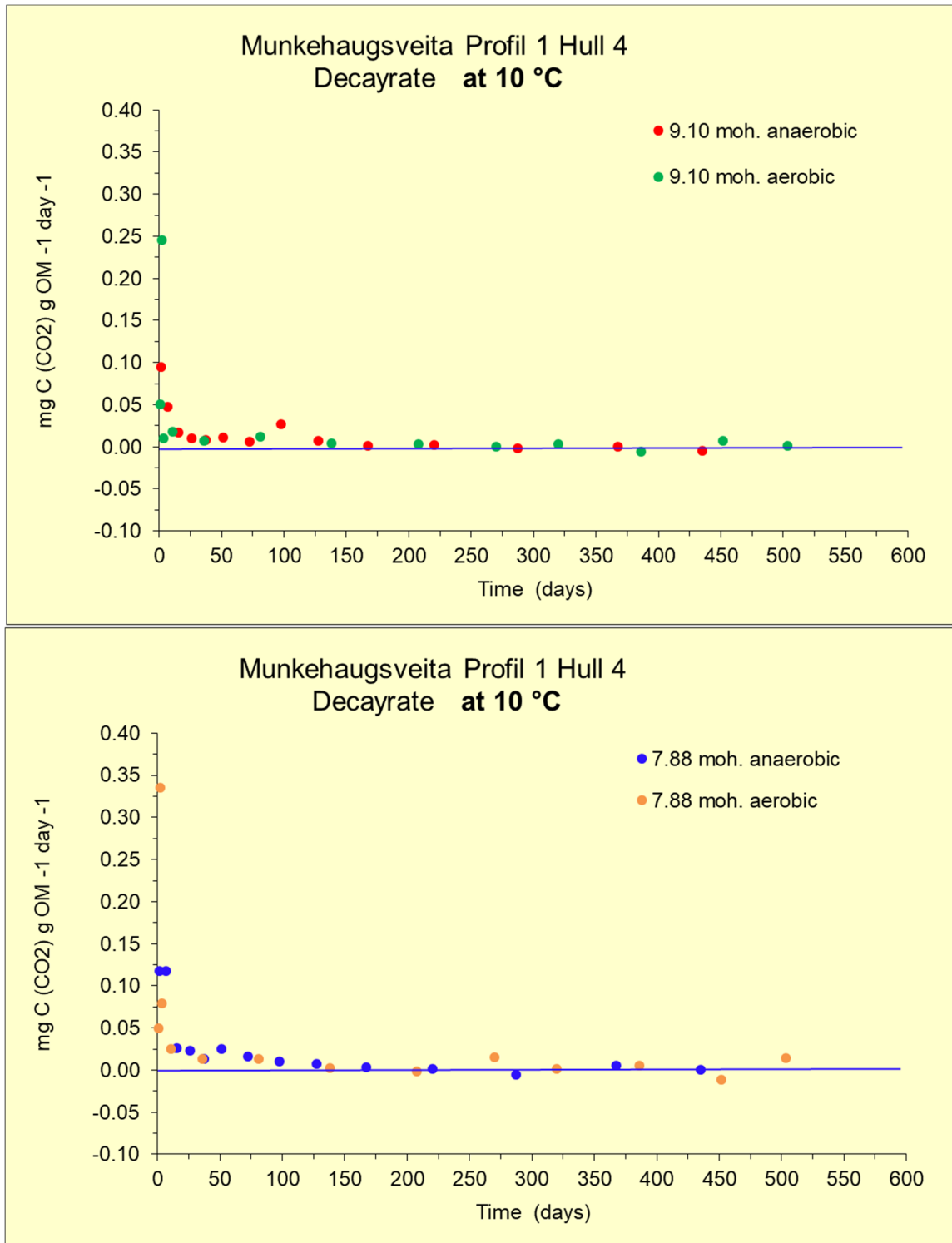
### 3.5 Nedbrytningsstudier av kulturlagsprøver fra Munkhaugveita 5-7 Profil 1 Hull 4

Tidligere nedbrytningsstudier utført på kulturminneprøver med ulik bevaringsgrad A1 og A5 fra Schultz gate i Trondheim inkubert ved 20°C uten luft viste forskjeller i akkumulert nedbryting av organisk materiale og beregnet nedbrytingsrate. Nedbrytingsgraden av organisk materiale var 6 ganger høyere i den dårlig bevarte prøven sammenlignet med den godt bevarte ved 20°C. Dette viser at høyere temperatur, mangel av oksygen og ulik bevaringsgrad påvirker hvor raskt organisk materiale kan brytes ned over tid (Petersén & Bergersen 2016).

Sistnevnte studier er blitt utført av jordprøver fra kulturlag i Munkhaugveita 5-7 Profil 1 Hull 4 fra 9.10 moh. og ned til 7.88 moh. Begge disse prøvene ble valgt siden innhold av organisk materiale var 20 %, kjemisk gode bevaringsforhold, for å se hva som skjer med organisk materiale over tid ved 10°C - med og uten oksygen til stede. Nedbrytingsraten i alle prøvene viser lave konsentrasjoner av CO<sub>2</sub> i starten og som ble redusert til nærmere null over tid (Figur 8). Data er illustrert med standard avvik og vist i vedlegg 5. Jordprøvene målt over tid, viste begge meget lave nedbrytingsrater.

Etter 450-500 dager kan en ikke se noen forskjell i økt nedbryting (målt som CO<sub>2</sub>) av organisk materiale med eller uten oksygen tilstede i noen av prøvene. Dette viser at organisk materiale i eldre kulturlag som holdes ved lav temperatur (10°C), fuktig og med eller uten oksygen tilstede ser ut til å ligge stabilt med minimal nedbryting. Dette gjelder spesielt kulturlag med godt bevart organiske materiale og som er mulig å bevare fremover i tid. Prøver som er dårligere bevart kan inneholde høyere andel mikroorganismer som vil kunne bli aktive og bryte ned organisk materiale hvis tilgang på oksygen eller økt temperaturen inntreffer i kulturlagene (Petersén & Bergersen 2016). Dette viser også at kulturlag som ligger stabilt og ikke har blitt påvirket av større svingninger i temperatur, evt. røtter fra store trær, luft og vekslende nedbør er mere beskyttet. Også nytt bygg over kulturlagene kan virke beskyttende siden stabiliteten øker. Senkning i redokspotensialet i øvre del av profil 1 Hull 4 kan tyde på det.

Mikrobiologisk forskning på naturlig nedbryting av organisk materiale viser at temperatur påvirker hastigheten, og spesielt fra 15 °C og oppover. Ved 10°C skjer dette langsomt med oksygen til stede. Studier på nedbryting av organisk materialet utført ved Nationalmuseet i Danmark (Hollesen & Matthiesen 2011) viser at ved omkring 10°C skjer det svært lite, men økning fra 10 og 15°C øker nedbrytningshastigheten vesentlig, spesielt med oksygen tilgjengelig. Uten oksygen vil tungt nedbrytbart materiale, som for eksempel trevirke, være beskyttet over tid.



Figur 8. Nedbrytingsraten beregnet over tid mg karbon (CO<sub>2</sub>) per g organisk material per dag (under) hvor kulturlagsprøve fra midten (9.10 moh.) og bunnen (7.9 moh.) av profil 1 Hull4 ble undersøkt ved 10 °C med og uten oksygen tilstede. Begge prøver var godt bevarte A4.

## 4 Konklusjon

- Miljøovervåking av arkeologisk kulturlag på tomten Munkhaugveita 5-7 i Trondheim (Profil 1 Hull 4) i perioden september 2015 til desember 2020 viser reduserende og gode bevaringsforhold fra under 9.10 moh. Oksiderende forhold som ble påvist i øvre kulturlag på 10.1 moh. i perioden 2015 og 2017 er halvert fra +600 mV til +280 mV i slutten av 2020 som gir lavt innhold av oksygen i jordporene til kulturlaget.
- Profilen i Hull 1 viser høyere jordfuktighet sammenstilt med Hull 4 og redoksforholdene i øvre del av profilen er i ferd med å bli anoksisk og reduserende i 2017. Igjenom 2018 og ut måleperioden til 2020 sank redoksforholdene ytterligere, og viser nå negativt redokspotensialet i hele profilen fra 9.10 til 8.63 moh. Dette gir gode bevaringsforhold for organisk materiale.
- Beregnet gjennomsnittstemperatur i begge profiler var omkring 5-7 °C før nytt bygg var ferdigstilt, noe som er gunstig for bevaring av organisk materiale. Når det i tillegg er anoksiske og reduserende forhold i kulturlagene, vil muligheten for bevaringen øke ytterligere. Gjennomsnittstemperaturen har økt de 2 siste årene av overvåkingen etter at nye bygg er ferdigstilt på tomten. Mest utsatt er kulturlag øvre del av Hull 4 på 10.10 moh hvor gjennomsnittstemperaturen nå er målt til 11-12°C.
- *NIBIO mener at resultatet fra overvåkingen før og etter nye bygg er ferdigstilt på tomta i Munkhaugveita 5-7 har gitt et godt grunnlag for å vurdere eventuelle endringer i bevaringsforhold.* I Profil 1 Hull 1 har det vært reduserende forhold, høy jordfuktighet og fortsatt lav temperatur selv om den har steget de to siste årene fra 6-9°C. Profil 1 Hull 1 har fortsatt gode bevaringsforhold for organisk materiale etter at nytt hus er ferdigstilt. I Profil 1 Hull 4 ser vi samme forhold i nedre del av profilen. I øvre del av profilen ser en at et nytt bygg har gitt høyere temperaturøkning. Fuktigheten har ikke forandret seg under overvåkingsperioden.
- *Nye bygg over områder med verneverdige kulturlag i Munkhaugveita 5-7 har ikke påvirket de kulturlag som er overvåket direkte negativt.* Vi ser av dataene at alle temperaturkurver ligger noe høyere i forhold til de første år med overvåking før byggestart, men med mindre svingninger sommer og vinter. Kun øvre del av profil 1 Hull 4 kan bli påvirket hvis temperaturen øker eller holder seg over 12 °C.

# Litteraturreferanser

- Bergersen O. og Petersén, A. (2009). Forundersøkelse med grunnboring for tilstandsanalyse av bevaringsforhold for kulturlag, Munkhaugsveita 3-7, Trondheim – Arkeologisk og jordfaglig analyse. NIKU (37) og Bioforsk rapport Vol 4 (29). 29 sider.
- Bergersen O. (2014). Ett års miljøovervåking av grunnvann omkring kulturminner i området Anders Madsens gate i Tønsberg. Bioforsk rapport Vol 9 (104). 14 sider.
- Bergersen O. (2016). Jordkjemisk forundersøkelse og miljøovervåking av arkeologiske kulturminner fra middelalderen på tomten Munkhaugveita 5-7 i Trondheim. Statusrapport I per september 2016. NIBIO rapport Vol 2 (17). ISBN 978-82-17-01577-2
- Bergersen O. (2018). Jordkjemisk forundersøkelse og miljøovervåking av arkeologiske kulturminner fra middelalderen på tomten Munkhaugveita 5-7 i Trondheim. Statusrapport II per oktober 2017. NIBIO rapport Vol 4 (18/00079)
- Bergersen O. (2019). Jordkjemisk forundersøkelse og miljøovervåking av arkeologiske kulturminner fra middelalderen på tomten Munkhaugveita 5-7 i Trondheim. Statusrapport III per mars 2019. NIBIO rapport Vol 5 (19/00079)
- Brock, T.D. *Biology of microorganisms*. 11ed. Prentice Hall International editions, London, UK, 992 pp. 2006
- Hollesen, J. og Matthiesen, H. (2011). The effect of temperature on the decomposition of urban layers at Bryggen in Bergen. Nationalmuseet in Denmark. Report no. 11031048. 2011.
- NS 9451.2012: Norwegian Standard: Cultural Property. Requirements on Environmental Monitoring and Investigation of Archaeological Deposits (2012). Krav til miljøovervåking og -undersøkelse av kulturlag. Norsk Standard 9451. 2012 tilgjengelig:  
<http://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/176273#.UzqbI571TyU.email>.
- Petersén, A.H. og Bergersen, O. (2016). In situ preservation in the unsaturated zone: Results from environmental investigations at the “Schultz gate” case study in the medieval town of Trondheim, Norway. *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 2015; Vol. 18 Nos 1–3, 2016, s 181-204.
- Rickard D, Morse JW. 2005. Acid volatile sulfide (AVS). *Marine Chemistry* 97:141-197.
- Shirokova Y, Forkutsa I, Sharafutdinova N. 2000. Use of electrical conductivity instead of soluble salts for soil salinity monitoring in Central Asia. *Irrigation and Drainage Systems* 14:199-205.
- Stookey L.L. 1970. Ferrozine - A New Spectrophotometric Reagent for Iron. *Analytical Chemistry* 42:779-781.
- Yr : [http://www.yr.no/sted/Norge/Sør-Trøndelag/Trondheim/Trondheim\\_sentrum/](http://www.yr.no/sted/Norge/Sør-Trøndelag/Trondheim/Trondheim_sentrum/)

# Vedlegg

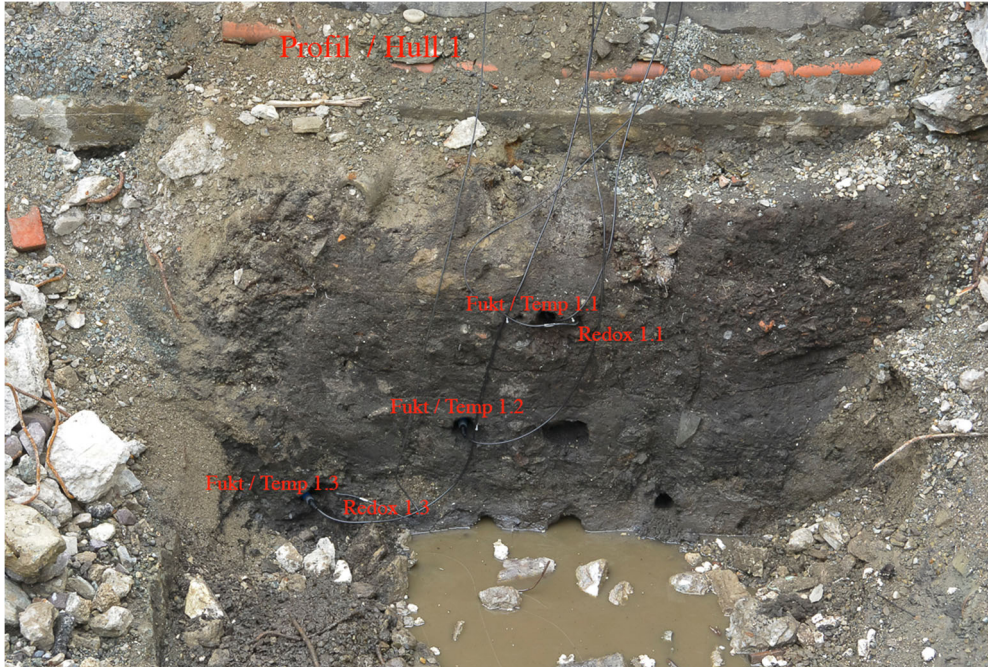
Nr Tema

---

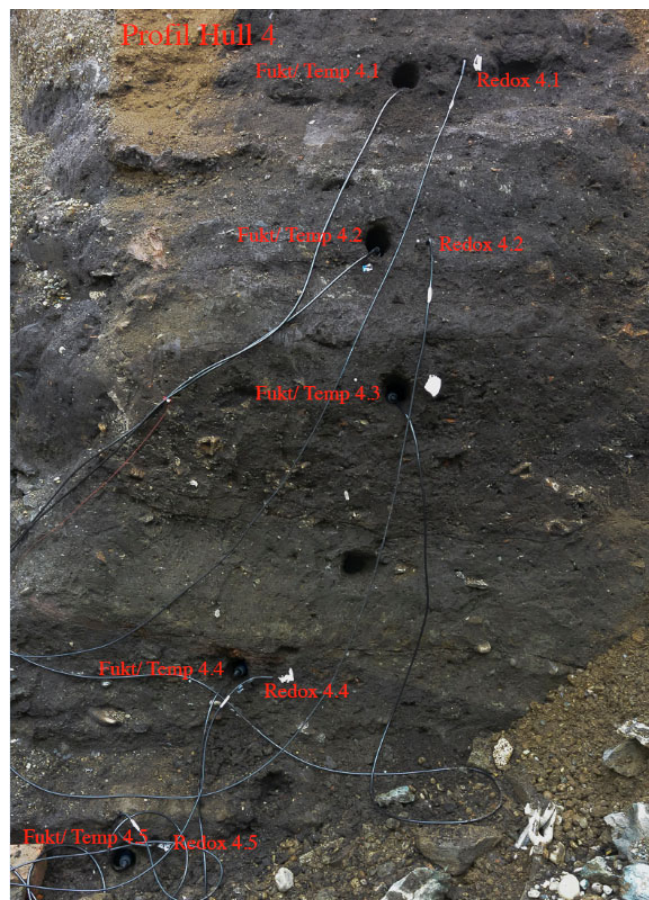
- 1 Illustrering av profiler med plassering av sensorer
- 2 Foto fra start og under overvåking
- 3 Koordinater fra Hull 1 og Hull 4
- 4 Bevaringsskala (SOPS) av kulturlag og redoksforhold ved standard aktivitet fra ulike mikroorganismer
- 5 Nedbrytningsstudier av organisk materiale i godt bevarte prøver fra Munkhaugveita 5-7 profil  
1 Hull 4 fra ulike dyp i nesten 2 år ved 10 grader med og uten luft

## Vedlegg 1

Foto av Hull 1 og 4 og etter nytt bygg ferdigstilt på tomten i 2018



Hull 1 Profil 1 Munkhaugveita 5-7 med sensor plassert i profilvegg.



Hull 4 profil 1: Munkhaugveita 5-7 med sensorer



## Vedlegg 2

Foto ved start og etter nytt bygg ble ferdigstilt på tomten i 2018



Munkhaugveita 5-7 2018 fotografert av Lasse Weiseth, NIBIO Kvithamar

## Vedlegg 3

### Koordinater profil 1 Hull 4

MUNKVHULL4-SAMPLES, 04.01.2016, Page 1						
FID	Shape	PT_ID	NORTHING	EASTING	ELEVATION	DESCRIPTIO
0	Point	7	7034179,35	569712,4651	7,8884	4.5
1	Point	6	7034178,9707	569712,7201	8,3383	4.4
2	Point	5	7034178,6218	569712,6751	8,5685	4.6
3	Point	4	7034178,4218	569712,6296	9,1035	4.3
4	Point	2	7034178,5263	569712,7968	9,622	4.2
5	Point	1	7034178,269	569713,1589	10,0979	4.1

### Koordinater profil 1 Hull 1

MUNKVHULL4-SAMPLES, 04.01.2016, Page 1						
FID	Shape	PT_ID	NORTHING	EASTING	ELEVATION	DESCRIPTIO
0	Point	7	7034179,35	569712,4651	7,8884	4.5
1	Point	6	7034178,9707	569712,7201	8,3383	4.4
2	Point	5	7034178,6218	569712,6751	8,5685	4.6
3	Point	4	7034178,4218	569712,6296	9,1035	4.3
4	Point	2	7034178,5263	569712,7968	9,622	4.2
5	Point	1	7034178,269	569713,1589	10,0979	4.1

## Vedlegg 4

### Bevaringsskala (SOPS) av kulturlag og redoksforhold ved standard aktivitet fra ulike mikroorganismer

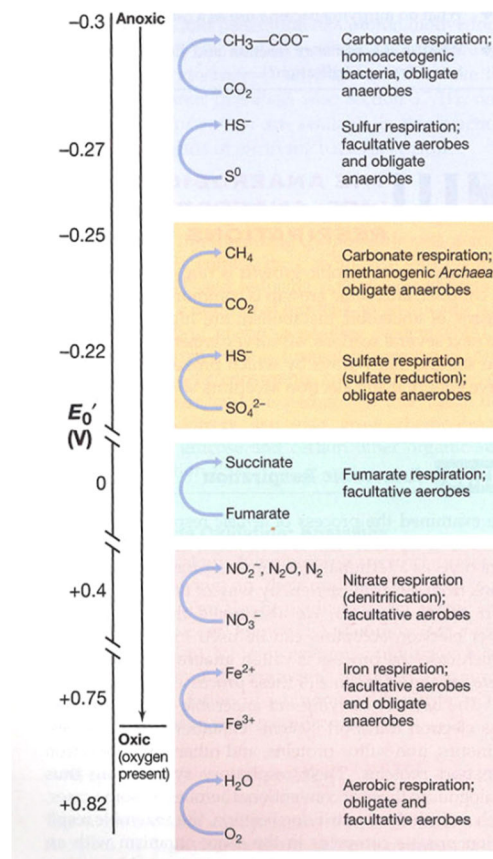
*State of the preservation scale (SOPS) after Norsk Standard (NS 9451:2012), under concentration levels for S2 parameters used to evaluate preservation conditions*

Position related to ground water	Preservation scale					
	0	1	2	3	4	5
		Loisy	Poor	Medium	Good	Excellent
Saturated	A0	A1	A2	A3	A4	A5
Fluctuation zone	B0	B1	B2	B3	B4	B5
Unsatutated	C0	C1	C2	C3	C4	C5
Material later than 1900	D0	D1	D2	D3	D4	D5

#### Bevaringsskala av kulturlag målt kjemisk

Nitrat	Ammonium	Sulfid	Jern (II)	Jern (III)	Redoksforhold	Bevaring
NO3	NH4	H2S	Fe2	Fe3		
Lav	Lav	Lav	Lav	Høy	Oksiderende	Elendig
Høy	Lav	Lav	Lav	Høy	Nitrat til oksiderende	Dårlig
Høy	Lav	Lav	Høy	Lav	Nitrat til jernred.	Middels
Lav	Lav	Lav	Høy	Lav	Jernreducerende	Middels
Høy	Høy	Høy	Høy	Lav	Nitrat til sulfatred.	Bra
Lav	Høy	Høy	Lav	Lav	Sulfatreducerende	Bra
Lav	Høy	Høy	Høy	Lav	Sulfatred. til metanogene	Utmerket

Reduserende forhold  
 Oksiderende forhold

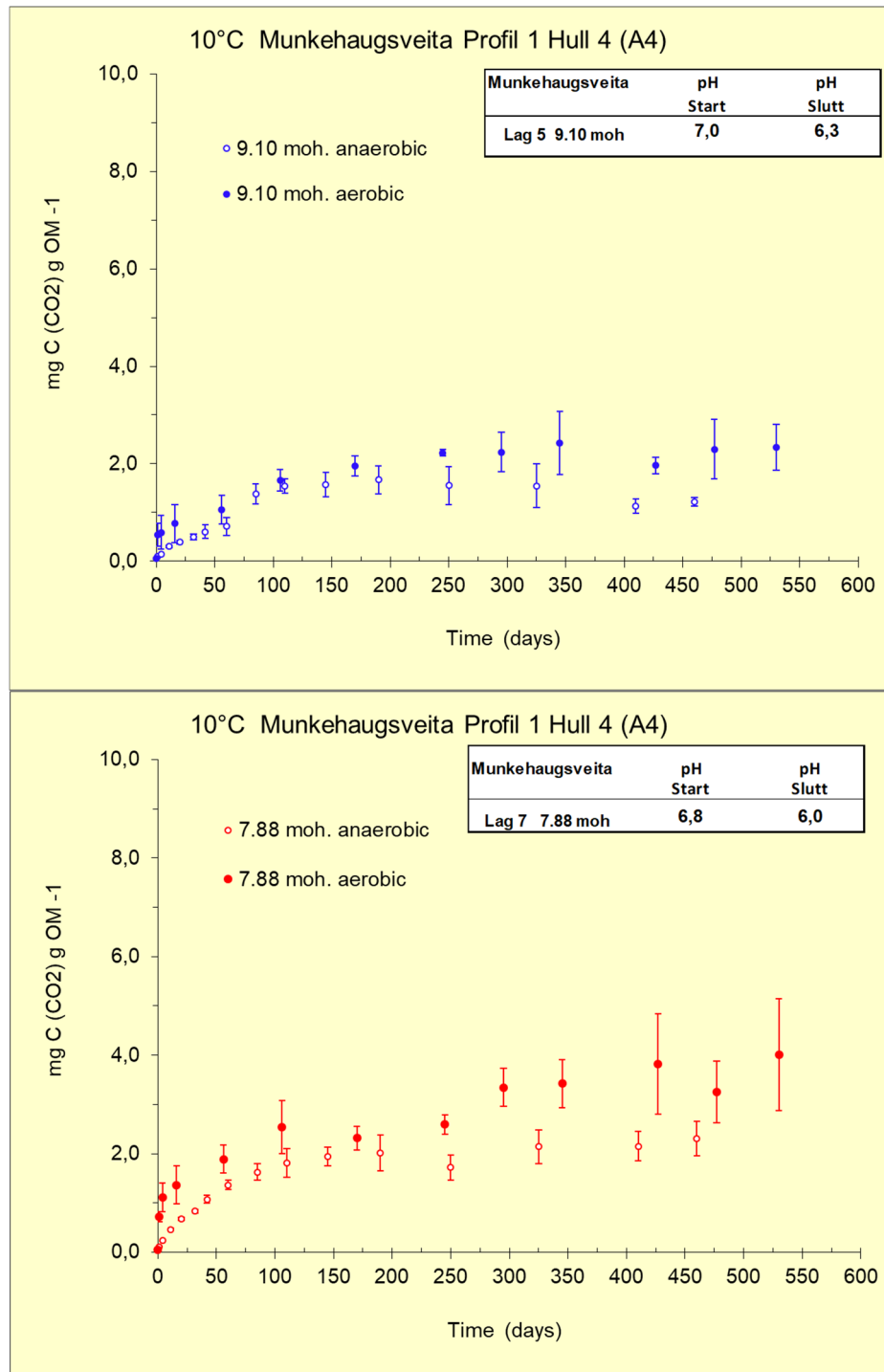


Redoksforshold ved standard aktivitet fra ulike mikroorganismer (Brock, 1996).

## Vedlegg 5

### Nedbrytningsstudier av organisk materiale

Figuren viser resultater fra nedbrytningsstudier av organisk materiale i godt bevarte prøver fra Munkhaugsveita 5-7 profil 1 Hull 4 fra ulike dyp i 450-500 dager ved 10 grader med og uten luft. Senkning i pH kan tyde på dannelser av organiske syrer i prøver med luft tilstede. Målt CO<sub>2</sub> er noe høyere aerobt enn anaerobt, men har ikke økt særlig over tid.



Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) ble opprettet 1. juli 2015 som en fusjon av Bioforsk, Norsk institutt for landbruksøkonomisk forskning (NILF) og Norsk institutt for skog og landskap.

Bioøkonomi baserer seg på utnyttelse og forvaltning av biologiske ressurser fra jord og hav, fremfor en fossil økonomi som er basert på kull, olje og gass. NIBIO skal være nasjonalt ledende for utvikling av kunnskap om bioøkonomi.

Gjennom forskning og kunnskapsproduksjon skal instituttet bidra til matsikkerhet, bærekraftig ressursforvaltning, innovasjon og verdiskaping innenfor verdikjedene for mat, skog og andre biobaserte næringer. Instituttet skal levere forskning, forvaltningsstøtte og kunnskap til anvendelse i nasjonal beredskap, forvaltning, næringsliv og samfunnet for øvrig.

NIBIO er eid av Landbruks- og matdepartementet som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter og eget styre. Hovedkontoret er på Ås. Instituttet har flere regionale enheter og et avdelingskontor i Oslo.