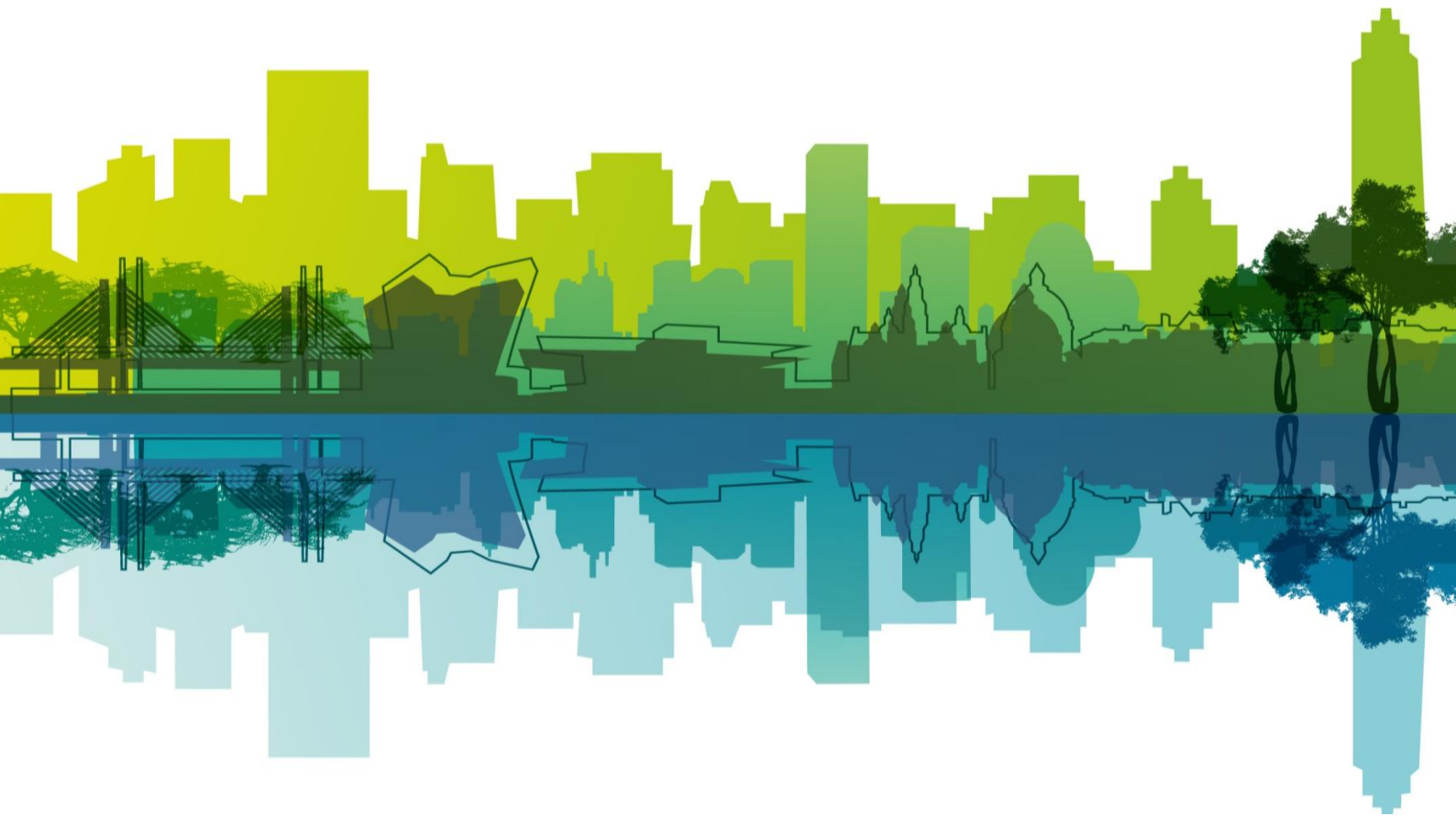


# Udviklingsprojekt: Kontrolleret Poreluftmåling



20. Juni 2025



## Stamoplysninger

|           |                                                |
|-----------|------------------------------------------------|
| Titel     | Udviklingsprojekt: Kontrolleret Poreluftmåling |
| Dato      | 20. Juni 2025                                  |
| Forfatter | Kenneth Larsen, Nordiq Miljø Vest ApS          |

## Indholdsfortegnelse

|                                                                                                     |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Indledning                                                                                          | Side 3  |
| Indsamlet viden                                                                                     | Side 4  |
| Indsamlet viden: sammenfatning og konklusion                                                        | Side 5  |
| Feltarbejde og dataindsamling                                                                       | Side 6  |
| Dataanalyser                                                                                        | Side 7  |
| a. Iltindhold i den atmosfæriske luft og i poreluften, set i forhold til differencen i iltindholdet | Side 7  |
| b. Vurdering af kvaliteten af hhv. O <sub>2</sub> og CO <sub>2</sub> som markør                     | Side 8  |
| c. Vurdering af geologiens indflydelse                                                              | Side 9  |
| d. Vurdering af lufttrykkets indflydelse                                                            | Side 10 |
| e. Vurdering af nedbørens indflydelse                                                               | Side 11 |
| Konklusion                                                                                          | Side 12 |
| Praktisk anvendelse i felten                                                                        | Side 13 |
| Litteraturliste                                                                                     | Side 14 |

## Bilag

|          |                                                                                      |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Bilag 1: | Udviklingsprojekt: Kontrolleret Poreluftmåling, tilgang for udviklingsprojekt. 2021. |
| Bilag 2: | Registreringsskema. 2024                                                             |
| Bilag 3: | Skema til anvendelse ved feltarbejde.                                                |



## Indledning

Projektet "Kontrolleret Poreluftmåling" har det overordnede formål at undersøge om gasmålinger kan anvendes som en markør for tæthed i opsætningen ved poreluftundersøgelser, for på den måde at sikre, at undersøgelsesresultater bliver troværdige og valide. O<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub> vurderes at være de mest oplagte markører. Projektet er startet op i 2021 og oplægget "Udviklingsprojekt Kontrolleret Poreluftmåling, tilgang for udviklingsprojekt", findes i bilag 1.

Der er løbende indhentet relevant viden og erfaringer fra en række forskellige kilder, herunder regioner, rådgivere samt andet tilgængeligt materiale. Indsamling af viden er foregået mellem 2022 og 2024, hvor der i første omgang er indhentet en mere generel viden om emnet. I slutningen af forløbet har der været fokus på viden, der kan anvendes ift. de forandringer som projektet løbende har undergået (måling af værdier både i atmosfærisk luft og i poreluft. Dette forklares nærmere nedenfor).

Den oprindelige tilgang i udviklingsprojektet var at have fokus på selve indholdet af gasarter i jordmatricen (absolutte værdier af gasarterne). Der er derfor indledningsvist afsøgt viden om dette, og udført feltarbejde, hvor der har været fokus på registrering af absolutte værdier.

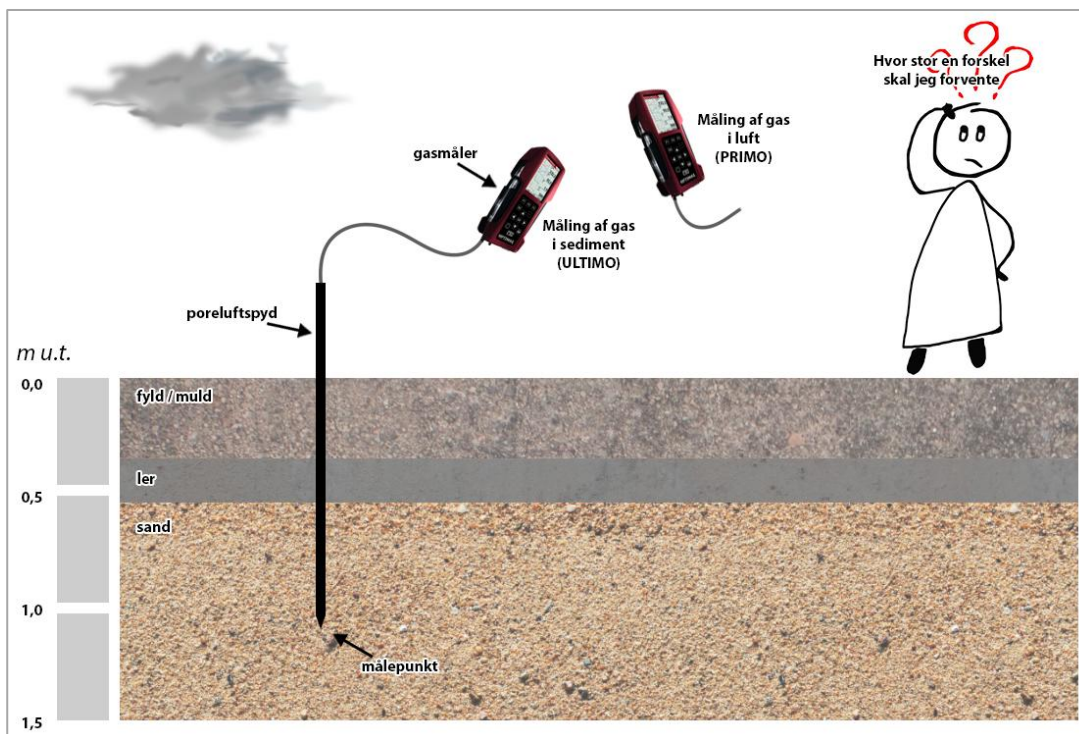
En indledende databehandling viste dog, at det absolutte indhold (jf. målingerne) har så store udsving, at små variationer næppe vil kunne registreres. Udsvingene i de absolutte værdier oversteg altså de variationer, som det var planen at undersøge. Årsagen til udsvingene er ikke kendte, men det kan fx være usikkerheder i forbindelse med kalibrering af måleinstrumentet eller varierende gasindhold i poreluften under forskellige jordbundsforhold eller atmosfæriske forhold.

Derfor blev der, fra primo 2024, foretaget en udvidelse i registrering af målinger, så der fremover blev registreret absolutte værdier både i atmosfæren og i jordmatricen, ved hver måling, og altså ikke som hidtil kun i jordmatricen. Herved blev det muligt at differentiere mellem de absolutte gasværdier fra den overliggende atmosfæriske luft og fra luften i sedimentet (nyt registreringsskema findes i bilag 2).

Herefter blev der ved feltarbejde, i løbet af 2024 (februar-august), indsamlet data fra i alt 115 poreluftundersøgelser fordelt på 15 lokaliteter. Ved disse blev det reviderede registreringsskema fra 2024 (bilag 2) anvendt.

I september/oktober 2024 blev de indsamlede feltdata samlet og systematisk indført i et regneark. Herefter blev data behandlet, og der blev foretaget forskellige analyser af data.





Figur 1. Principskitse.

## Indsamlet baggrundsviden

I forbindelse med vidensopsamling, har vi haft kontakt med Region Midtjylland, Region Nordjylland, Region Syd og Region Sjælland.

Geologien er en betydende faktor for resultaterne /5/ af målte  $O_2$  og  $CO_2$  værdier. Geologien er afgørende for vandindhold, hvor stort et volumen luft der er til rådighed og hvorledes en stoftransport kan finde sted. Desuden vil et lavpermeabelt lag over en forurening føre til et højere indhold med  $CO_2$  pga. biologisk nedbrydning af forureningsstoffer (en forskydning af forholdet mellem  $O_2$ ,  $/CO_2$  mod  $CO_2$ ). En grovere geologi vil muligvis betyde, at differencen mellem iltindholdet i sedimentet og i den atmosfæriske luft vil blive mindre, da luften i jorden vil have en hurtigere og større "udveksling" med luften over jorden.

Det atmosfæriske tryk spiller en rolle /3/. Ved lavtryk vil der være en opadrettet strømning af poreluft og en hævnning af grundvandsspejl. Den omvendte situation ses ved højtryk. I begge tilfælde vil der, afhængig af dybde og sedimenttype, være en vis forsinkelse for påvirkningen. En ændring af grundvandsspejlet kan blotlægge/skjule impermeable/permeable lag. F.eks. vil differencen mellem iltindholdet i sedimentet og i den atmosfæriske luft forventeligt være større, hvis der er et impermeabelt lag, da udvekslingen med den overliggende luft vil blive formindsket.

$CO_2$ -indholdet i sedimentet kan variere forholdsmæssigt meget. Dette kan være ved tilfælde af forurening i jordlagene, hvor  $CO_2$  dannes ved nedbrydningen af forureningsstoffer.  $CO_2$ -indholdet vil derfor variere meget, og derfor være mindre velegnet som markør for pålidelige poreluftmålinger.

Atmosfærisk luft består af ca. 21%  $O_2$  (ilt) og af ca. 0,03%  $CO_2$  /1/. Derudover består den atmosfæriske luft af en række andre gasarter. Det har ikke været muligt at finde ensartede og tilstrækkelige data, der peger på, at man kan forvente bestemte indhold af gasarter i bestemte sedimenttyper.



Der er jf. /6/ fundet at måleusikkerheden på  $O_2$  for Optima 7-måleapparatet er på  $\pm 0,2$  volumenprocent, mens den for  $CO_2$  er på 3 procent af aflæsningsværdien. Med et fokus på differencen i aflæsningerne, i stedet for absolutte værdier, bør der derfor være rimelig sikkerhed for at to resultater, foretaget for samme punkt og med relativt kort interval, er sammenlignelige, da det vurderes at potentielle fejl som følge af kalibreringsvariationer kun vil kunne ses ved målinger med lange tidsrum imellem sig.

### Indsamlet baggrundsviden: Sammenfatning og konklusion

Den indsamlede viden bekræfter relevansen af de fleste parametre, som registreres i den aktuelle dataindsamling. Dette gør sig gældende for registrering af  $O_2$ ,  $CO_2$ , geologi, trykforhold og nedbør. Derudover registreres også metan-indhold, modtryk samt temperaturforhold.

Det vurderes, at der med et større datagrundlag end i dette projekt vil kunne undersøges for sammenhænge imellem de forskellige parametre, primært om der kan findes mønstre mellem den målte difference i  $O_2$ -indhold og de øvrige parametre.



## Feltarbejde og dataindsamling

Feltarbejdet blev iværksat primo 2024 og er gennemført fra februar til august. Der er i denne periode udført i alt 115 målepunkter, fordelt på 15 lokaliteter. Der er registreret gasdata både for den atmosfæriske luft og for luft i jordmatricen (jf. skemaet, bilag 2). Derudover er der registreret geologi for hvert prøvepunkt. Det har været målet at registrere geologien mellem terræn og 1 m u.t. med intervaller på 10 cm.

Efterfølgende er der via DMI's landsdækkende arkiv indhentet meteorologiske data fra de pågældende dage, hvor undersøgelserne er udført. Temperatur er indhentet for selve undersøgelsesdagen. Lufttryk er indhentet og der er anvendt differencen fra 3 dage før og til undersøgelsestidspunktet. Nedbør er indhentet og summeret for en periode på 7 dage op til undersøgelsesdagen.

Der er beregnet difference mellem atmosfærisk luft og poreluft for hhv. iltindhold og kuldioxidindhold.

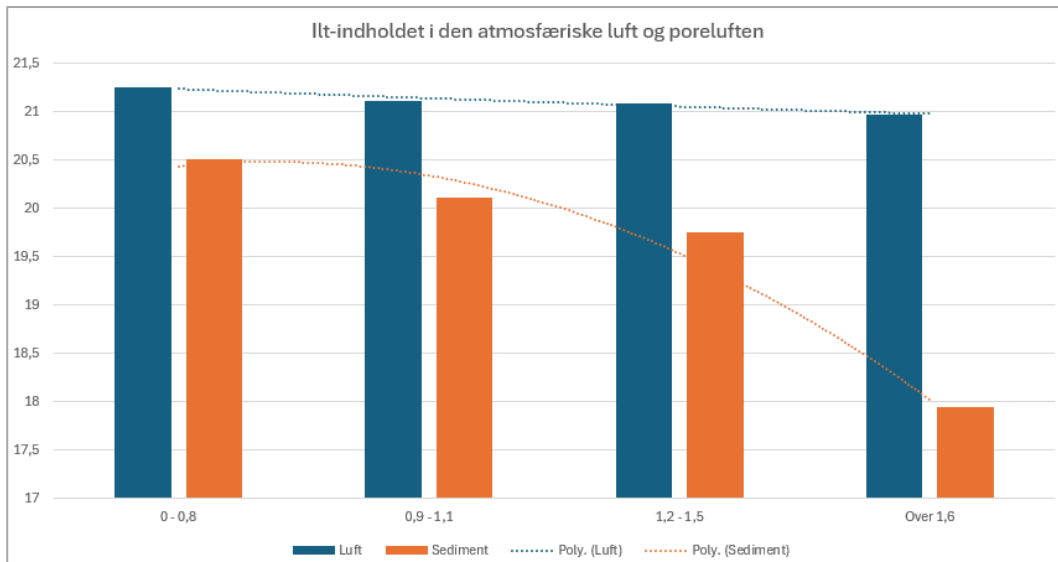
For de geologiske data, er der givet en værdi på mellem 1 og 5, hvor 1 er sand og 5 er ler. Ved grovere/finere materiale end hhv. sand og ler, er der anvendt værdier mellem 1 og 5. Der er slutteligt beregnet et gennemsnit for hvert prøvepunkt.

De indsamlede data er efterfølgende samlet i et regneark.



## Dataanalyse

### a. Iltindhold i den atmosfæriske luft og i poreluften, set i forhold til difference i iltindholdet.



Figur 2. Iltindhold i atmosfærisk luft (Luft) og i poreluften (Sediment) grupperet ift. difference mellem de to 4 kategorier. Tendenslinjer "poly" (polynomisk) er tilføjet. X-aksen viser difference (absolut indhold), y-aksen viser absolut iltindhold. Gruppering af difference er foretaget, så der er cirka samme antal punkter i hver gruppe.

Søjlerne viser det absolutte indhold af ilt målt i hhv. den atmosfæriske luft samt i poreluften i sedimentet. Der er valgt at inddele i 4 kategorier med den laveste difference (0-0,8) længst til venstre og den højeste difference (>1,6) til højre.

Det ses på grafen, at der er en større forskel (difference) mellem det absolutte iltindhold i atmosfæren og i poreluften i jordmatricen (difference), jo lavere det absolutte iltindhold i atmosfæren er.

Det kan konkluderes at:

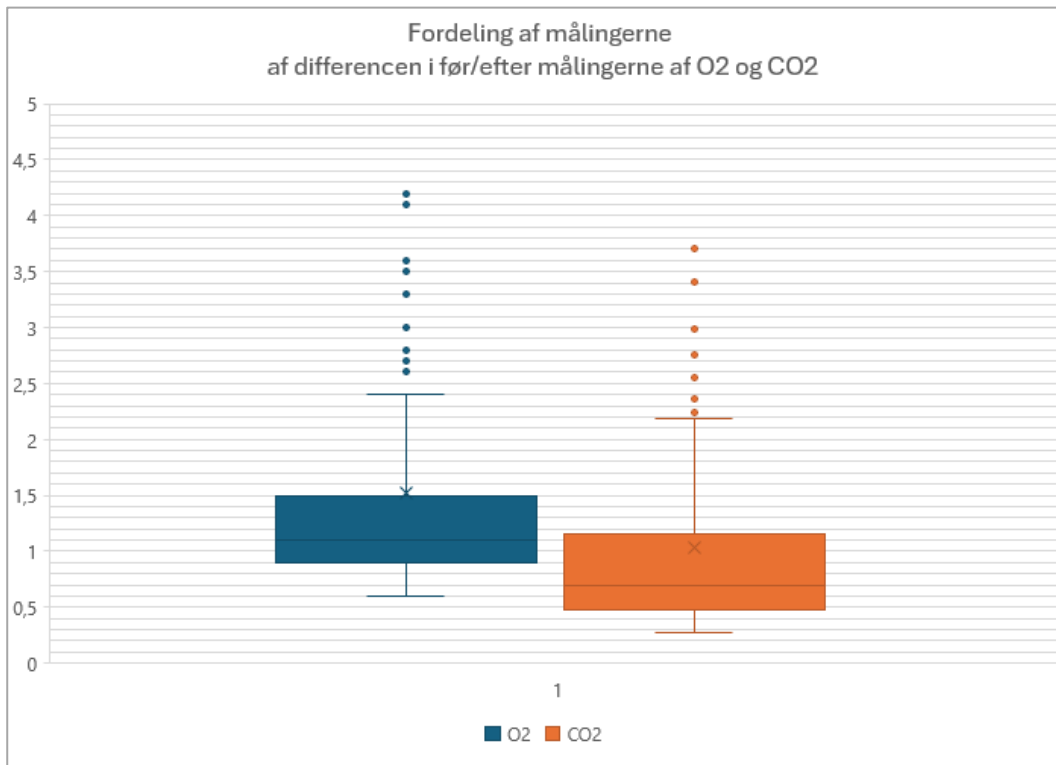
- Der observeres et tydeligt fald i iltindhold mellem atmosfærisk luft (Luft) og i poreluften (Sediment)
- Ved et højere iltindhold i den atmosfæriske luft, ses der et højere iltindhold i poreluften.
- Ved et højere iltindhold i den atmosfæriske luft, ses der en mindre difference imellem iltindholdet i den atmosfæriske luft og iltindholdet i poreluften.

#### Delkonklusion:

Når det målte absolutte indhold af  $O_2$  falder i atmosfæren (fra 21,2% mod de normale ca 21%), falder det målte absolutte indhold også i poreluften.



## b. Vurdering af kvaliteten af hhv. O<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub> som markør.



Figur 3. Differencen mellem O<sub>2</sub>-indhold og CO<sub>2</sub>-indhold i den atmosfæriske luft og i poreluften. X-aksen viser de to figurer for hhv. O<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub>. Y-aksen viser difference i det absolutte indhold af den pågældende gas, mellem den atmosfæriske luft og i poreluften.

Figur 3 viser fordelingen af alle målingerne af difference fra gasindholdet i atmosfæriske luft og til poreluft for hhv. O<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub>. Boksene dækker over området mellem 1. og 3. fraktilerne (hvilket udgør 50% af antallet af værdier).

Det ses af figuren, at punkternes difference i O<sub>2</sub>-indhold fordeler sig over et mere "snævert" område end de tilsvarende difference i CO<sub>2</sub>-indhold, altså at værdierne for difference i O<sub>2</sub>-indhold findes indenfor et mindre interval end værdierne for CO<sub>2</sub>. Den laveste, registrerede værdi for difference i O<sub>2</sub>-indhold er 0,6 %-point. Middelværdien er 1,5 %-point. Den laveste, registrerede værdi for difference i CO<sub>2</sub>-indhold er 0,3 %-point. Middelværdien er 1,0 %-point.

Det kan konkluderes at:

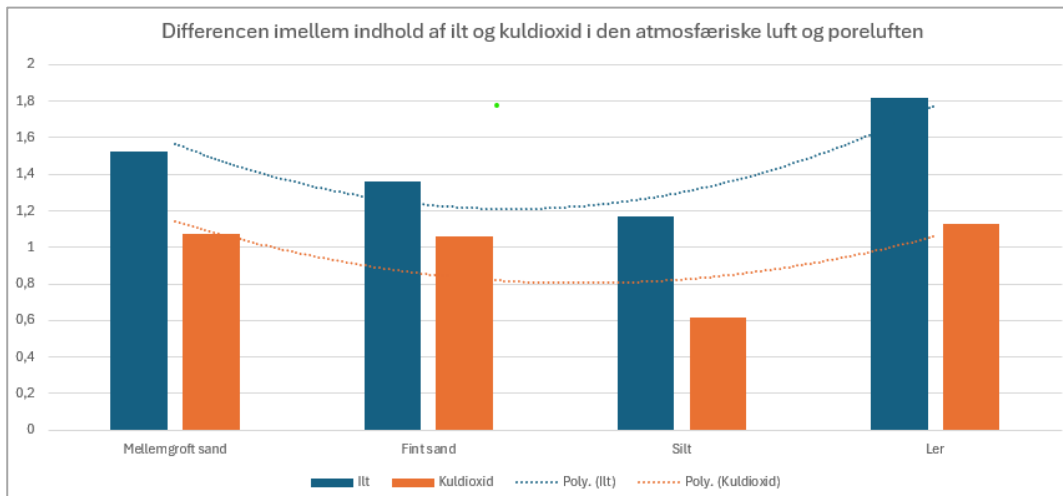
- Ser man på difference mellem atmosfærisk luft og poreluft er variationerne større for CO<sub>2</sub> end for O<sub>2</sub>. Dette både set absolut, men i særdeleshed når man ser dem i forhold til værdien 0. Varierer fra 0,9-1,5 (en stigning på 67% for O<sub>2</sub>) og fra 0,5-1,15 (en stigning på 130% for CO<sub>2</sub>).
- Forskellen i værdierne, mellem atmosfærisk luft og poreluft, er mindre for CO<sub>2</sub> end O<sub>2</sub>.

### Delkonklusion:

Variationerne i difference i O<sub>2</sub>-indholdet holder sig i et mere snævert interval end difference i CO<sub>2</sub>-indholdet. Værdierne for O<sub>2</sub> har dermed den mindste spredning og vurderes derfor at være den mest præcise markør.



### c. Vurdering af geologiens indflydelse.



Figur 4. Differencen i iltindholdet og kuldioxidindholdet mellem den atmosfæriske luft og poreluften. Differencerne er vist for forskellige kornstørrelser i sedimentet. X-aksen viser de forskellige sedimenttyper. Y-aksen viser differencen mellem den atmosfæriske luft og poreluften. Tendenslinjer "poly" (polynomisk) er tilføjet. Grupperingen er foretaget efter geologien, og der er cirka samme antal punkter i hver gruppe (dette er tilfældigt, og var ikke tilsigtet).

#### Hypotese:

Differencen mellem ilt- og kuldioxidindholdet forventes at være påvirket af geologien. Lavpermeable lag forventes at medføre en større forskel mellem værdierne i den atmosfæriske luft og poreluften.

Figur 4 viser fordelingen af differencen mellem  $O_2$ -indhold og  $CO_2$ -indhold fra atmosfærisk luft til poreluft i alle målingerne. De er grupperet efter den geologi der blev registreret, hvor prøverne blev udført.

Det kan konkluderes at:

- Der er større difference mellem  $O_{2\text{ atm}}$  og  $O_{2\text{ sed}}$  målt i ler en i sand, hvilket støtter hypotesen. Den samme tendens ses dog ikke i forhold til "Fint sand" og "Silt".
- Der ses ikke noget mønster for differencen i  $CO_2$ -indholdet
- Mulige forskel af differencer mellem indhold i atmosfærisk luft og luft fra sedimentet pga. jordart kan blive overlejret af foregående biologisk nedbrydning dvs. forbrug af  $O_2$  og produktion af  $CO_2$ .

#### Delkonklusion:

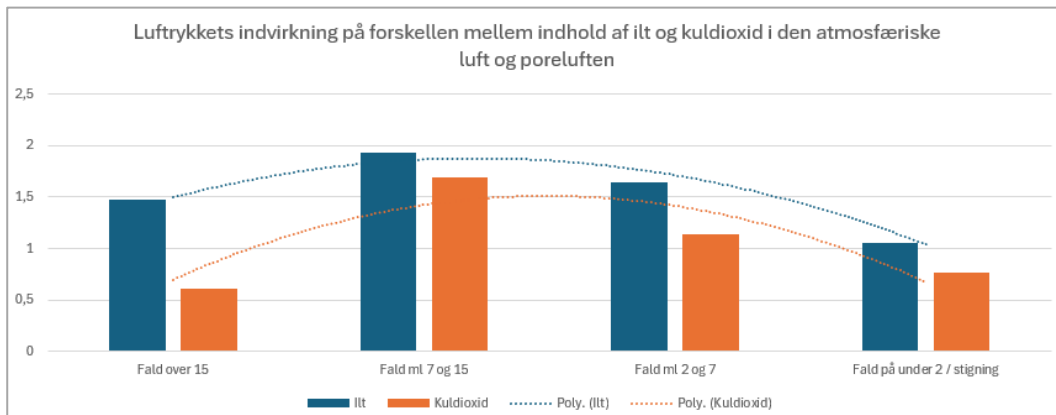
Geologien vurderes at have en betydning for fald i  $O_2$  indhold i poreluften. Differencen mellem atmosfærisk luft og poreluft i  $O_2$ -indholdet, kan forventes at være højere ved meget lerede forhold.

#### Usikkerheder:

Begrænset antal af målepunkter indenfor hver de 4 grupperinger udgør en usikkerhed. Geologien er vurderet visuelt ved håndboringer på hver lokalitet, men ikke på samtlige målepunkter. Udover geologien kan nedbrydning også ændre på indhold af  $O_2/CO_2$  og dermed overlejre evt. effekter pga. geologien.



#### d. Vurdering af indflydelsen af ændringer i lufttrykket.



Figur 5. Differencen i iltindholdet og kuldioxidindholdet mellem den atmosfæriske luft og poreluften. Differencerne er vist for forskellige trykforhold. Tendenslinjer "poly" (polynomisk) er tilføjet. X-aksen viser ændringen i det barometriske tryk (mbar). Y-aksen viser differencen mellem den atmosfæriske luft og poreluften. Grupperingen er foretaget, så der er cirka samme antal punkter i hver gruppe.

#### Hypotese:

Differencen i ilt og kuldioxidindholdet forventes at være påvirket af ændringer i lufttrykket.

Figur 5 viser fordelingen af differencen i O<sub>2</sub>-indhold og CO<sub>2</sub>-indhold fra atmosfærisk luft til poreluft i alle målingerne. De er grupperet efter ændringen i lufttrykket. Der er anvendt ændringen fra 3 døgn (72 timer) før og ind til tidspunktet for prøvetagning.

Det kan konkluderes at:

- Der er ikke en entydig tendens for hverken differencen i O<sub>2</sub>-indhold eller CO<sub>2</sub>-indhold, da værdierne er lavest ved både store og små ændringer i lufttrykket.

#### Delkonklusion:

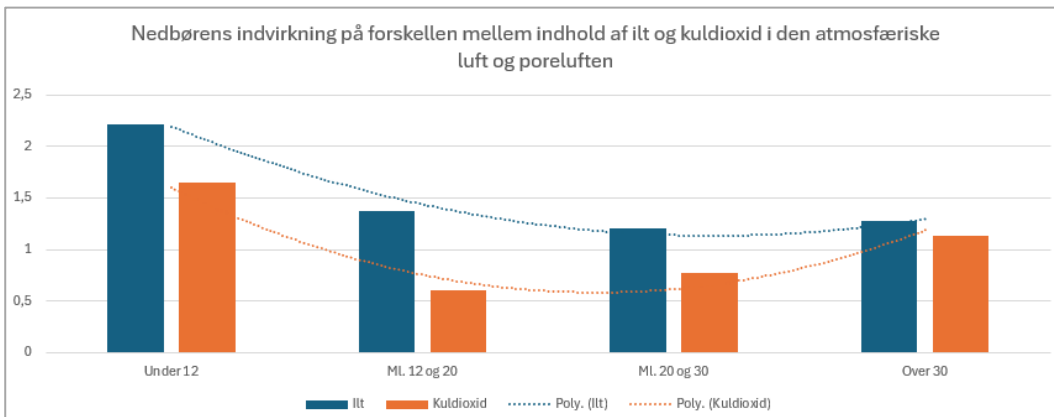
Lufttrykket vurderes ikke at have en signifikant betydning for differencen i indhold af O<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub> mellem atmosfærisk luft og poreluft.

#### Usikkerheder:

Undersøgelserne er udført indenfor relativt få perioder, og der er altså en begrænset mængde data.



### e. Vurdering af indflydelse fra nedbørsforholdene.



Figur 6. Differencen i iltindholdet og kuldioxidindholdet mellem den atmosfæriske luft og poreluften. Differencerne er vist for forskellige nedbørsforhold i ugen op til målingen. Tendenslinjer "poly" (polynomisk) er tilføjet. X-aksen viser nedbørsmængden. Y-aksen viser differencen mellem den atmosfæriske luft og poreluften. Værdien "under 12" er ensbetydende med nedbørsmængde lavere end 12 mm, og "over 30" nedbørsmængde højere end 30 mm.

#### Hypotese:

Differencen i ilt og kuldioxidindholdet forventes at være påvirket af nedbør.

Figur 6 viser fordelingen af differencen i O<sub>2</sub>-indhold og CO<sub>2</sub>-indhold fra atmosfærisk luft til poreluft i alle målingerne. De er grupperet efter nedbørsforholdene. Der er anvendt den opsummerede nedbørsmængde (mm) for den seneste uge (7 døgn) op til tidspunktet for prøvetagning.

Det kan konkluderes at:

- Der er en tendens til at differencen i O<sub>2</sub>-indholdet er størst ved lav nedbørsmængde (tørre forhold).
- Samme tendens ses også for CO<sub>2</sub>-indholdet, dog knapt så udtalt som for O<sub>2</sub>-indholdet.

#### Delkonklusion:

Nedbøren vurderes at have en betydning for forskellen i indhold af O<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub> mellem atmosfære og poreluft. Differencen i O<sub>2</sub>-indholdet, og i mindre grad CO<sub>2</sub>-indholdet, kan forventes at være højere ved tørre forhold.

#### Usikkerheder:

Usikkerheden vurderes at være høj i forhold til nedbør. Undersøgelserne er udført indenfor relativt få perioder, og der er altså en begrænset mængde data, og der er derfor en vis sandsynlighed at evt. effekter pga. infiltration bliver overlejret af andre effekter.



## Konklusion

Resultaterne er baseret på 115 poreluftundersøgelser fordelt på 15 lokaliteter, hvilket er medvirkende til at give en "bred" vifte i data, som derfor vurderes at være statistisk anvendelige.

Der er målt differencer i indhold af  $O_2$  og  $CO_2$  mellem atmosfærisk- og poreluft for både  $O_2$  og  $CO_2$ .

Det konkluderes, at en robust markør for udførelse af en kontrolleret poreluftmåling vil være differencen i iltindholdet ( $O_2$ ) mellem den atmosfæriske luft og poreluften. Den tilsvarende værdi for  $CO_2$ , differencen mellem atmosfærisk- og poreluft, har vist sig ikke at være helt så velegnet som  $O_2$  da den er mindre og mere svingende.

I perioden med indsamling af data til undersøgelsen, er der ved omtrent 5% målepunkter konstateret lave forskel af  $O_2$  mellem atmosfæriske luft og poreluften og derfor genudført som nye prøvepunkter. Den laveste, registrerede værdi af forskellen i iltindholdet mellem atmosfæriske luft og poreluften i godkendte poreluftmålinger er 0,6 %-point. Middelværdien er 1,5 %-point på  $O_2$  indholdet.

Det vurderes, at en lavere nedbørsmængde muligvis resulterer i en højere difference. Det vurderes at en finkornet geologi betyder en højere værdi af forskellen i  $O_2$  indholdet mellem atmosfæriske luft og poreluften.

Selvom forskellige parametre, såsom lufttrykket, jordart (sedimenttype), infiltration (jordens vandindhold) samt biologisk nedbrydning potentiel kan påvirke luftsammensætningen i jorden er der altid målt differencer i forhold til sammensætningen i atmosfærisk luft og sammensætningen i poreluft.

Metoden med at måle på differencer i indhold af  $O_2$  mellem atmosfærisk- og poreluft, vurderes at kunne anvendes til at konstatere om poreluftpunkter er tætte, og dermed kvalificere eller diskvalificere et poreluftpunkt, og dermed føre til en kvalitativ afgørelse om, hvorvidt en luftopsamling på f.eks. kulrør, skal eller ikke skal iværksættes. Ved en difference i iltindholdet større end 0,8 - 1,0 procentpoint (afhængig af geologi og vejrforhold) vurderes poreluftpunkter som værende tætte. Dette er illustreret i figur 7.

Til praktisk anvendelse i felten, er nedenstående skema derfor udarbejdet (figur 7), skemaet findes i en udvidet udgave i A4-format i bilag 3.

Gasmåleren, der er anvendt (Optima 7) koster ca. 40.000 kr. Arbejdsgangen med at skulle udføre den ekstra måling vurderes ikke at tage væsentlig ekstra tid, da resultatet kan aflæses indenfor få minutter.

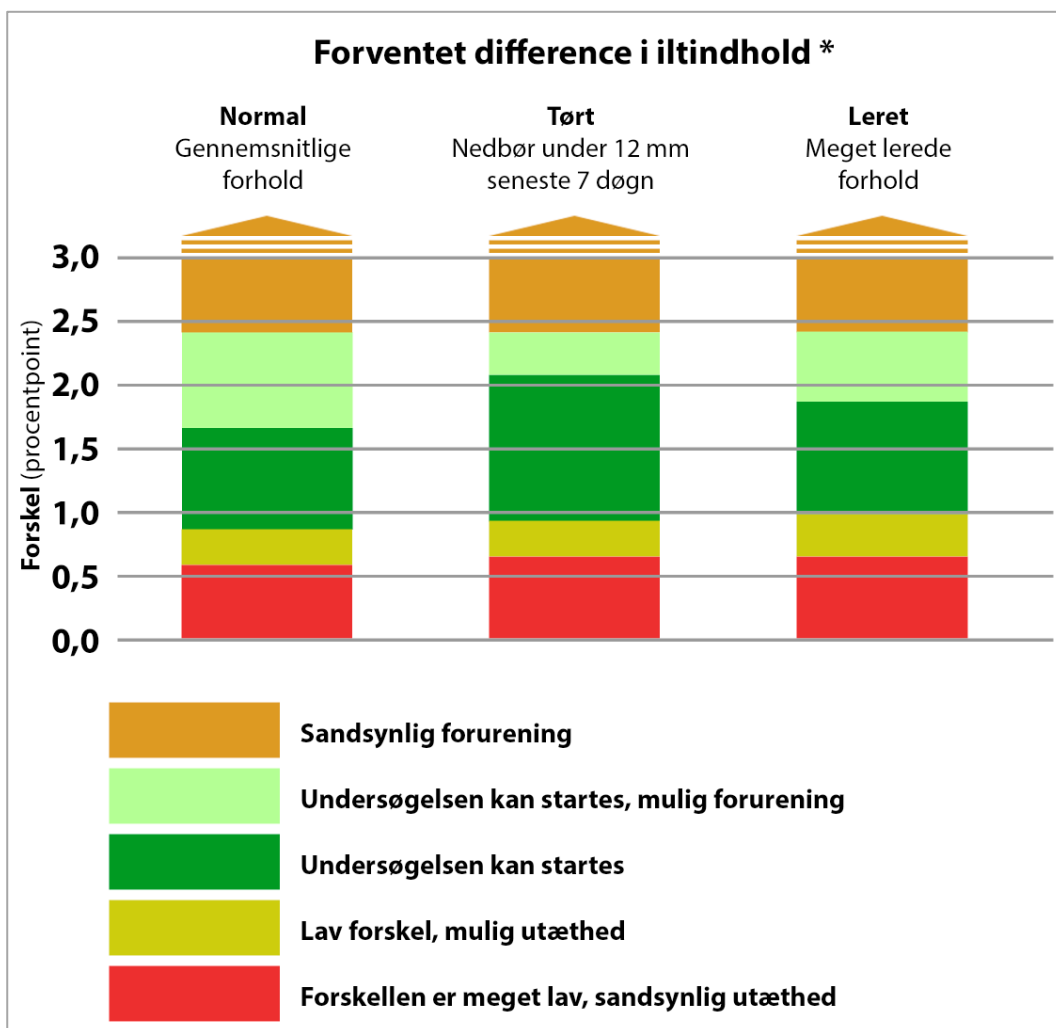


## Praktisk anvendelse i felten

Projektets resultater kan, sammen med en gasmåler af typen Optima 7, anvendes til at kvalificere opstillinger af målepunkter i felten.

Følgende skema (figur 7) er opstillet, ved at sammenholde de forskellige resultater fra undersøgelsen. Det er forsøgt at holde skemaet så enkelt som muligt, således at det vil være praktisk anvendeligt i felten.

I skemaet er der medtaget geologiske forhold og nedbørsforhold, da undersøgelsen viser at disse to forhold påvirker differencen i iltindholdet.



Figur 7. Skema til praktisk anvendelse i felten. Figuren viser de forventede forskelle i iltindholdet (i procentpoint) hhv. ved normale forhold, ved tørre forhold og forhold med en leret geologi. Der er lagt vægt på, at skemaet skal være enkelt og overskueligt stillet op, så det er let og realistisk at anvende i praksis.



## Litteraturliste

/1/ Hvilke gasser består atmosfæren af, Niels Bohr Institutet,  
[https://nbi.ku.dk/spoerg\\_om\\_fysik/fysik/gaslov/](https://nbi.ku.dk/spoerg_om_fysik/fysik/gaslov/)

/2/ Poreluftprojekt - Styrende parametre for tidlige variationer af indholdet af klorerede opløsningsmidler i sand- og lerjorde, Miljøministeriet. 2006

/3/ Transport af gasformig forurening i umættet zone og i bygninger, Amternes videnscenter for jordforurening. 2004

/4/ Effektive poreluftstrategier, Miljøministeriet. 2014

/5/ Variationer i poreluftens forureningsindhold, Miljøstyrelsen. 2011

/6/ Optima 7 Biogas analyser, technical specs.

