



Metoden og KS af kortlægning af redoxgræsen og beregning af tykkelsen af reduceret ler

Kortlægningen af redoxgræsen og beregningen af tykkelsen af reduceret ler indgår i den kemiske grundvandskortlægning, som proceduremæssigt er beskrevet i Geovejledning 6 /1/ og i vejledningen Nitratsårbarhed og afgrænsning af NFI og IO /2/. I dette notat beskrives i afsnit 1 metoden for kortlægning af redoxgræsen samt kvalitetssikring af denne kortlægning. I afsnit 2 beskrives metoden for beregning af tykkelse af reduceret ler samt kvalitetssikring af disse beregninger.

1. Kortlægning af redoxgræsen

Kortlægningen af redoxgræsen foretages dels ved en mere eller mindre manuel gennemgang af interesseområdets boringsmasse og vandkemi, og dels en tolkningsproces i et modelleringssoftware eller et GIS-program med en efterfølgende maskinel interpolation. Den modellerede redoxfront anvendes efterfølgende til beregningen af den reducerede lertykkelse. Dette er beskrevet i afsnit 2.

De vandkemiske prøver udgør i sagens natur en direkte måling af redoxforholdene i magasinet, mens sedimentfarven tolkes som et udtryk og konsekvens af denne. Det bedste datagrundlag for redoxforholdene i magasinet er derfor principielt de vandkemiske data, men da der i et givent område typisk er markant færre vandprøver end lagfølge- og farvebeskrivelser, er farvebeskrivelserne også vigtige for beskrivelsen af redoxforholdene i magasinet. I forhold til beskrivelse af dæklagenes redoxforhold vil der oftest være få eller ingen sediment- eller vandkemiske data til rådighed, hvorimod der vil være væsentligt flere boringer med lagfølge- og farvebeskrivelser. Derfor udgør farvebeskrivelserne i praksis det primære datagrundlag for en bestemmelse af redoxgræsen i dæklagene i et område.

1.1 Datagrundlag

Datagrundlaget omfatter som nævnt primært lagfølge- og farvebeskrivelser og vandkemiske prøver i Jupiter-databasen, men andre datatyper kan med fordel inddrages.

Farveskift i lagbeskrivelser

Beskrivelser af den gennemborede lagfølge udgør det primære datagrundlag for bestemmelsen af redoxdybden. I den litologiske beskrivelse er det specielt beskrivelsen af sedimenternes farver, som er vigtige, mens selve litologierne kun i mindre grad inddrages.

Princippet ved at anvende de gennemborede lags farve til bestemmelse af redoxgræsen bygger på, at der er en stor grad af sammenhæng imellem redoxforholdene og farven i geologiske sedimenter.

Automatisk gennemgang af farveskift i boringer

Der kan i et interesseområde indgå mange tusinde boringer, og derfor har det været forsøgt at foretage en automatiseret bestemmelse af farveskift i boringer.

De enkelte bornings lagbeskrivelser er i Jupiter gemt i tabellen **LITHSAMP**, hvor også top og bund af de enkelte lag fremgår.

Det er imidlertid erfaringen, at en automatiseret gennemgang ikke er effektiv, da den har mange fejl og mangler. Den primære grund til dette er, at der oftest er stor uoverensstemmelse imellem de oplysninger, som er tabellært lagret i Jupiter, og i de oplysninger, som fremgår af de analoge brøndborerjournaler, som kan downloades som pdf fra Jupiter. Førstnævnte oplysninger er traditionelt indtastet på baggrund af prøvebeskrivelser hos GEUS – en beskrivelse, som i mange tilfælde er foretaget lang tid efter opboringen. Sidstnævnte er derimod i sagens natur foretaget meget hurtigt efter opboring. Specielt med hensyn til netop farvebeskrivelserne, er dette en væsentlig faktor, da farverne efter lang tids iltning og evt. udtørring kan forandre sig meget inden GEUS' prøvebeskrivelse.

Mange boringers lagfølge er desuden slet ikke indtastet, og de fremgår kun af dokumenter, typisk borerapporter eller geotekniske prøvebeskrivelser, som er tilknyttet boringerne som indscannede pdf-filer.

Manuel gennemgang af farveskrift i boringer

En manuel gennemgang af farveskrift i boringerne ud fra både brøndborerjournaler og geologibeskrivelser giver derfor det mest valide resultat. I det følgende gennemgås derfor en metode og procedure, som tager udgangspunkt i en manuel gennemgang af alle relevante data, som findes i Jupiter.

Som udgangspunkt vægtes gennemgangen af borerapporterne, samt øvrige indscannede, relevante dokumenter, højere end de tabellære prøvebeskrivelser.

Dokumenterne kan tilgås enkeltvis direkte fra boringens hjemmeside, men dette er en tidskrævende proces. Alternativt kan der anvendes software, som kan downloade alle ønskede dokumenttyper for alle de ønskede boringer.

Registrering af farveskrift

Registreringen af farveskriftene i boringerne er i princippet enkel og ligetil.

Farvebeskrivelserne tolkes i henhold til Geovejledning 1 /3/ og omsættes til redoxforhold ud fra følgende principper:

- Røde, brune, gule farver og blandingsnuancer heraf antages at repræsentere oxiderede lag.
- Grå, grønlig, sorte og blandingsnuancer heraf antages at repræsentere reducerede lag.

Visse litologier – f.eks. røde plastiske lerarter – har dog så kraftig og markant en egenfarve, at farven ikke nødvendigvis repræsenterer redoxforholdene. Det er derfor nødvendigt at inddrage litologiske oplysninger og ikke ukritisk omsætte farver til redoxforhold.

Dybden, hvor der registreres et farveskrift fra oxiderede til reducerede farver, indskrives herefter i en tabel – f.eks. Excel-ark – sammen med boringens XY-koordinater og terrænkote. Herefter kan XYZ-punktet for farveskriftet let beregnes.

Flere farveskrift

Hvis der kun er ét farveskrift i en boring (fra oxideret til reduceret), kan dybden for farveskriftet anvendes som redoxydybden. Ofte ses dog flere farveskrift i en boring, som er tegn på, at redoxforholdene skifter flere gange. Således kan reducerede lag underlejres af oxiderede lag, som endnu dybere igen underlejres af reducerede lag. I disse tilfælde registreres alle dybder med farveskrift. I tilfælde af flere farveskrift, skal den øverst beliggende overgang fra oxiderede til reducerede lag, ifølge Nitratsårbarhed og afgrænsning af NFI og IO /2/ benyttes. Modsat anbefaler Geovejledning 6, at det dybeste farveskrift anvendes /1/.

Det er vigtigt at være bevidst om, at sandsynligheden for at finde flere end ét farveskrift i en boring er mindre, hvis boringen er meget kort. Således vil en dyb og en kort boring i et område

med flere redoxgrænser kunne indikere meget forskellige redoxdybder, hvorfor anvendelsen af den øverste redoxgrænse mindsker risikoen for at korrelere forskellige grænser med hinanden.

Det bør angives, om der i en boring er registreret flere farveskift, evt. med antallet af overgange fra oxiderede til reducerede lag. Denne information gemmes i en selvstændig kolonne i Excel-tabellen.

Upræcise farveskift

Mange farveskift ses meget tydeligt i en boringsbeskrivelse, og de ses ofte mere eller mindre sammenfaldende med en laggrænse. I disse tilfælde er redoxdybden velbestemt, og dette markeres sammen med dybdeangivelsen som metadata til registreringen.

Det antages altid, at lagene i en boring er oxiderede i toppen og i en vis dybde reducerede. Første farveskifte vil derfor principielt altid være fra oxideret til reduceret og i tilfældet af, at lagene er reducerede fra terræn angives dybden til 0 mut. Denne dybde vil også være velbestemt. Flere forhold kan dog nedsætte dybdeangivelsens præcision, og i det følgende gennemgås de typiske situationer.

Oftes ses ikke et skarpt og entydigt farveskift i boringen, men snarere et gradvist farveskift. Her angives redoxdybden så godt som muligt med en usikkerhedsbemærkning.

I andre tilfælde kan overgangen fra oxiderede til reducerede lag af andre grunde ikke angives præcist. Mange boringer er udført i ældre brønde, hvorfor lagserien ikke er beskrevet for den øvre del af boringen, som svarer til den oprindelige dybde af brønden. Hvis jordlagene i boringen er reducerede fra bunden af brønden, betyder det, at farveskiftet findes et sted imellem terræn og bunden af brønden. Tilsvarende ses ofte beskrivelser, hvor der ikke er angivet farver i de øvre dele af boringen, og hvor første farvebeskrevne lag er beskrevet som reduceret. I disse tilfælde anvendes bunden af brønden/top af første farvebeskrevne lag som redoxdybden med den bemærkning, at det er en maxdybde. Farveskiftet findes altså maksimalt i denne dybde og sandsynligvis højere oppe.

Andre boringer anfører slet ikke reducerede lag, ofte fordi de ikke er udført særligt dybt. I disse tilfælde angives boreddybden som redoxdybde med en bemærkning om, at det er en minimumsdybde. Således findes redoxdybden mindst i den angivne dybde og sandsynligvis endnu dybere.

I Tabel 1 ses anbefalinger til metadata, som i tabellen indskrives i selvstændige kolonner - tilhørende hver sin redoxdybde.

Tabel 1: Oversigt over anbefalede metadata vedrørende registrerede redoxdybder.




Metadata	Betydning
N/A	Boringen har en mangelfuld eller ingen farvebeskrivelse, og den kan ikke anvendes.
BEST	Farveskiftet er tydeligt, og dybden er sikker.
USIKKER	Farveskiftet er utydeligt eller medfører af anden grund, at dybden er usikker. Den faktiske redoxdybde kan således være højere eller dybere.
MAX	Det faktiske farveskift kan ikke observeres, men findes maksimalt i den angivne dybde. Den faktiske dybde kan ligge tættere på terræn.
MIN	Det faktiske farveskift kan ikke observeres, men findes minimum i den angivne dybde. Den faktiske dybde kan ligge dybere nede.

I Figur 1 herunder vises et eksempel på registrering af farveskift i boringer. Det ses, at der er gjort plads til i alt syv farveskift med tilhørende usikkerhedsangivelse af dybden (under kolonnen "Type").

Indsæt data fra BOREHOLE-tabellen					Nederste Redox-gr.			1. OX->RED		1. RED->OX		2. OX->RED		2. RED->OX		3. OX->RED		3. RED->OX		4. OX->RED	
DGUNr	Dyb	EB9X	EB9Y	ZDVR90	Dbd	Type	Farveskift	Type	Dbd	Type	Dbd	Type	Dbd	Type	Dbd	Type	Dbd	Type	Dbd	Type	Dbd
Ø8 . 59	114	566600	6222072	1,7	0,00	BEST	1	BEST	0												
Ø8 . 60	57	566447	6221913	2,5	9,00	MIN	1	MIN	9												
Ø8 . 69	60	566619	6219039	82,0	3,00	BEST	1	BEST	3												
Ø8 . 72	49	566408	6221923	3,5	0,00	BEST	1	BEST	0												
Ø8 . 86	31	566500	6222910	3,0	0,00	BEST	1	BEST	0												
Ø8 . 212	82	566449	6221335	48,6	6,10	BEST	1	BEST	6,1												
Ø8 . 214	67	566493	6221148	58,4	47,80	BEST	3	BEST	3,1	BEST	13,9	BEST	47,8								
Ø8 . 389	18	566734	6218633	78,0		N/A	0	N/A													
Ø8 . 431	58	566539	6221940	2,2	21,20	MAX	1	MAX	21,2												
Ø8 . 797	71	566464	6221385	48,0		N/A	0	N/A													
Ø8 . 1260	66	566743	6222167	2,2	0,50	BEST	1	BEST	0,5												
Ø8 . 1287	3	566739	6219733	76,0	3,70	BEST	1	BEST	3,7												
Ø8 . 1288	9	566659	6219683	79,1	4,45	BEST	1	BEST	4,45												
Ø8 . 1289	11	566569	6219633	78,5	4,60	BEST	1	BEST	4,6												
Ø8 . 1290	10	566479	6219583	77,8	4,15	BEST	1	BEST	4,15												
Ø9 . 26	51	570332	6221438	3,0	4,50	MAX	1	MAX	4,5												
Ø9 . 28	59	566825	6222889	2,0	12,70	MAX	1	MAX	12,7												
Ø9 . 30A	64	567722	6223166	5,0	2,50	MAX	1	MAX	2,5												
Ø9 . 30B	27	567606	6223340	6,5	6,45	MAX	1	MAX	6,45												
Ø9 . 55	44	571124	6222238	4,0	0,00	BEST	1	BEST	0												
Ø9 . 56	40	570180	6222016	1,6	0,00	BEST	1	BEST	0												
Ø9 . 57	44	569231	6222585	2,0	17,70	MIN	3	BEST	0	BEST	6,8	MIN	17,7								

Figur 1: Eksempel på registrering af farveskift i borerne. Metadata, der vises i Tabel 1, skrives ind i kolumnen ”Type”.

Når farveskift i borerne er bedømt, kan de indlæses som XYZ-punkter i GeoScene 3D og tematiseres. En anbefalet tematisering fremgår af Figur 2 herunder. Grøn og rød farve indikerer således, at den angivne redoxdybde måske ligger højere hhv. dybere.

Punkt	Betydning
	Registreret redoxgrænse (præcis dybde)
	Registreret redoxgrænse (max-dybde)
	Registreret redoxgrænse (min-dybde)

Figur 2 Anbefalet tematisering af redoxgrænser i GeoScene 3D.

Modellag og grundvandsstand

Ofte vil de bedømte redoxdybder blive indlæst i en eksisterende hydrostratigrafisk model for området, således at den endelige modellering af en sammenhængende flade/grid for redoxdybden kan udføres ved inddragelse af øvrige modeldata.

Principielt kan den færdige modellering af redoxgrænsen foretages ved kun at inddrage terrænoverfladen, men en bedre og mere valid tolkning/modellering opnås ved at inddrage alle modellag.

Ligeledes bør områdets grundvandsspejl inddrages, som pejlinger og/eller potentialekort. Herved kan tolkningen i datatomme områder tage hensyn til de modellerede lag (og tilpasses disses hydrauliske egenskaber) samt kendskabet til vandspejlets niveau.

Vandkemi og vandtyper

I det omfang der findes råvandsanalyser, bør disse naturligvis inddrages, da der ud fra analyserne fås direkte information om redoxforholdene i de specifikke magasiner. Oftest inddrages disse data som beregnede vandtyper, som let kan indlæses og tematiseres i GeoScene 3D. Tematiseringen bør være intuitiv, således at der f.eks. vælges rød og gul for vandtype A og B (oxiderede) og grøn og blå for C og D, som er reducerede.

Øvrige data

Med fordel kan jordartskort desuden inddrages i tolkningsprocessen – naturligvis kun af de øvre jordlags redoxforhold. Specielt vil større områder med organiske jorde (tørv/gytje) som udgangspunkt have reducerede forhold, og disse områder vil derfor have en terrænnær redoxgrænse. Søer vil tilsvarende indikere højtliggende, om end ikke nødvendigvis terrænnære, redoxgrænser.

Begge temaer kan i GeoScene 3D vises som ”draperinger” på terrænoverfladen. Herved kan både søer og jordartsfarver ses direkte på terrænoverfladen i både 3D og på profiler.

1.2 Fladedækkende tolkning med interpolation

Når modelleringen af redoxgrænsen er færdiggjort, udføres interpolationen af redoxgrænsen vha. de tolkede dybder. Som udgangspunkt anvendes samme indstillinger, som er anvendt i den hydrostratigrafiske model. Erfaringsmæssigt ses der dog en del klumpning af data, ligesom der også ofte er større datatomme områder. Disse store forskelle i datatæthed stiller store krav til interpolationen. Det er erfaringen, at inverse distance med en afstands-eksponent på 4 og med en stor søgeradius løser denne opgave godt. Herved prioriteres de nærmeste data meget højt, og de påvirkes ikke meget af data langt fra, samtidig med at der kan trækkes data ind fra lang afstand i ikke-tolkede områder.

Uanset interpolationsmetode og valg af parametre skal celle størrelser og interpolationsområde være identisk med selve lagmodellens, hvis der skal kunne beregnes f.eks. reducerede lertykkelser.

1.3 Kvalitetssikring af redoxgrænsen

Når tolkningen af redoxgrænsen kvalitetssikres, anbefales det at forholde sig til følgende:

- Er der lavet et fuldt udtræk af borerne for det givne område?
- Er brøndborerjournaler inddraget i datagrundlaget (en manuel gennemgang af data)?
- Er farveskift tolket korrekt (stikprøvekontrol af data)?
- Er det noteret, hvis der optræder flere redoxgrænser i lagserien?
- Er upræcis farver (f.eks. gule grå) markeret som usikker?
- Er max- og min-tolkninger anvendt rigtigt ved interpolationen af redoxgrænsen?
- Er det den øvre redoxgrænse, der er anvendt i udarbejdelse af den fladedækkende redoxkort?
- Er øvrige datatyper inddraget i den fladedækkende tolkning?
- Er metodik for benyttelsen af de anvendte data udføreligt beskrevet?
- Er den griddede flade for redoxgrænsen gennemgående, så den kan anvendes i hele området?
- Honorerer den interpolerede flade tolkningspunkterne fra boredata?
- Er der overensstemmelse mellem tolkningen af farveskift og vandtyperne, der er bestemt i det kemiske datagrundlag?
- Er der en fornuftig sammenhæng mellem terræn, landskabselementer, jordartskort og redoxgrænsen?
- Er der observeret stor forskel i redoxgrænsen i borerne, der ligger tæt på hinanden?

I den geologiske model, bør følgende kvalitetssikres ved hjælp af profiler og oversigtskort:

- Er gridningen foretaget korrekt ift. de geologiske/hydrostratigrafiske lag?

2. Beregning af reduceret lertykkelse

Beregning af reduceret lertykkelse er en ren grid-matematisk beregning, hvor terræn- og modellag samt den interpolerede redoxgrænse anvendes. Det er vigtigt, at alle grids er defineret ens, hvad angår celle størrelse, noder og geografisk dækning. Beregningerne kan udføres i f.eks. Surfer ved matematik på grids, hvor princippet er at udregne celleværdier i et outputgrid på baggrund af de tilsvarende cellers værdier i modellag og redoxgrænsen.

Beregningerne foretages altid magasin-specifikt. Figur 3 illustrerer begreberne total lertykkelse og akkumuleret reduceret lertykkelse.

Total lertykkelse

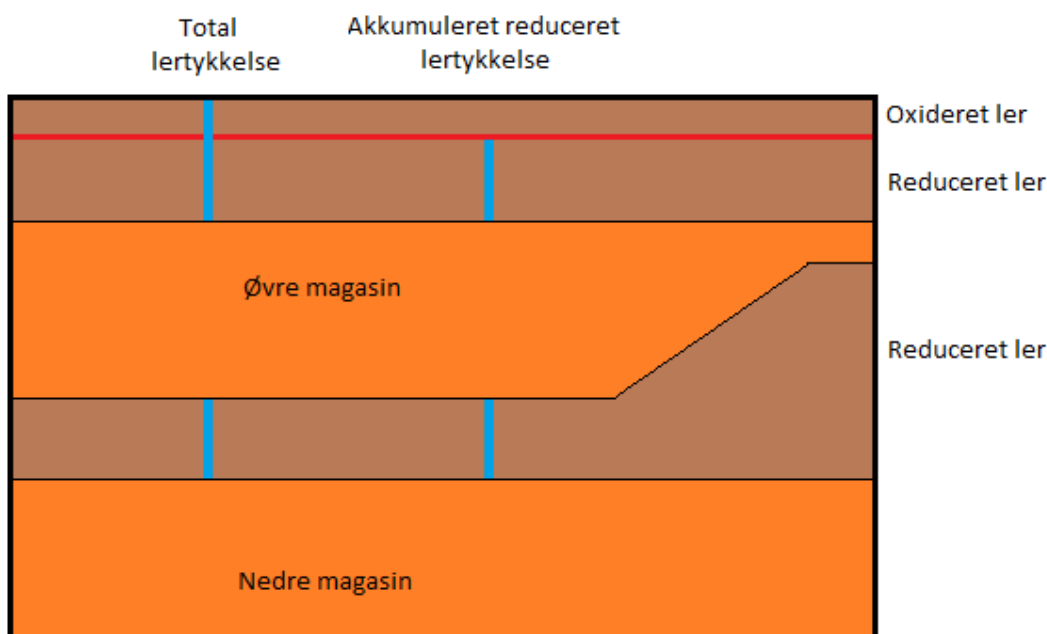
Som det ses af Figur 3, beregnes den totale tykkelse af ler ovenpå det nedre magasin ved helt simpelt at lægge tykkelserne af de to overliggende lerlag sammen.

Akkumuleret reduceret lertykkelse

Den akkumulerede reducerede lertykkelse beregnes som den totale lertykkelse blot fratrukket den totale tykkelse af oxideret ler. Det skal her bemærkes, at tykkelsen af oxideret ler ikke bare kan sættes lig med tykkelsen af den oxiderede zone, idet den oxiderede zone kan indeholde f.eks. sand. I praksis kan en robust måde at beregne den akkumulerede tykkelse af reduceret ler være

at trykke lagene i den hydrostratigrafiske model med redoxgrænsen og dernæst beregne den akkumulerede lertykkelse ud fra de trykkede laggrænser.

Anvendelse af den akkumulerede reducerede lertykkelse som et udtryk for beskyttelsen af magasinet antager implicit, at der ikke er forekomst af geologiske vinduer i dæklagene. I områder med geologiske vinduer og/eller stakkede sekundære magasiner kan det være en fordel at benytte 3D tykkelser af reduceret ler i sårbarhedszoneringsen, se notat *Anvendelse af 3D tykkelser af reduceret ler i forbindelse med sårbarhedszoneringsen* /4/.



Figur 3: Akkumuleret reduceret lertykkelse og total lertykkelse.

Kvalitetssikring af beregnet reduceret lertykkelse

Afhængigt af beregningsmetoden og kompleksiteten af den geologiske model, kan der indgå mange flader i beregningen af den akkumulerede reducerede lertykkelse, hvilket giver en øget risiko for fejlregninger. Derfor bør følgende tjekkes, når den reducerede lertykkelse beregnes:

- Er den valgte beregningsmetode velbegrunderet?
- Er der beregnet negative lertykkelser? (dette tyder på en fejl i beregningen)
- Er den akkumulerede reducerede lertykkelse alle steder lig med eller mindre end den totale lertykkelse? (hvis ikke, er der fejl i beregningerne).
- Har griddet for den akkumulerede reducerede lertykkelse samme udbredelse, projektion og cellestørrelse som de geologiske flader?
- Er den akkumulerede reducerede lertykkelse for et givet magasin, klippet til udbredelsen af det pågældende magasin?

3. Referencer

/1/ GEUS, 2009. Geo-Vejledning 6: Kemisk Grundvandskortlægning. Vejledning kan downloades på: <http://gk.geus.info/xpdf/kemisk-grundvandskortlaegning20110325.pdf>.

/2/ Naturstyrelsen, 2014. Nitratsårbarhed og afgrænsning af NFI og IO. Afgiftsfinansieret grundvandskortlægning.

/3/ GEUS, 2008. Geo-Vejledning 1: Jordprøver fra grundvandsboringer. Vejledningen kan downloades på: http://gk.geus.info/xpdf/geo-vejledning_1_final.pdf

/4/ SVANA, 2016. Notat: Anvendelse af 3D tykkelser af reduceret ler i forbindelse med sårbarhedszoneringsen. Udarbejdet af Rambøll.