

Guldborgsund kommune

AKTOR innovation ApS
Engsvinget 34
2400 København NV

Telefon 57807060
mobil 40212824
E-mail aktor@aktor.dk

PRIORITERING AF INDSATS

Sårbarhedsvurdering ud fra kemiske data og statens udpegning af Nitrat Følsomme Indvindingsområder (NFI) og Indsatsområder (IO)

28. maj 2014

Indhold

1.	Indledning.....	2
1.1	Baggrund	2
1.2	Formål	2
2.	Metoder og datagrundlag.....	4
2.1	Dataudtræk	4
2.2	ANAFLOW	4
2.3	Geokemiske randbetingelser	5
2.4	Særlige forhold på Østlolland	6
3.	Resultater.....	8
3.1	Resultater af alderssimulering med ANAFLOW	8
3.2	Forslag til prioritering af indsats opdelt på boringer	8
3.3	Fokusområder.....	11
4.	Appendiks om ANAFLOW.....	13
5.	Appendiks om klorid diffusion.....	16
6.	Appendiks om sporstoffer i skrivekridt	20
7.	Referencer.....	21
Bilag 1	ANAFLOW model for aktive vandværksboringer	
Bilag 2	Strontium data (Guldborgsund kommune)	
Bilag 3	Oversigtskort – Klassificering af sårbarhed, prioritering af indsats og fokusområder	

1. Indledning

1.1 Baggrund

Guldborgsund Kommune har modtaget statens kortlægning af indsatsområde Lolland. Lolland er opdelt i et stort område, der ligger i Lolland Kommune (Vestlolland) og et lidt mindre område, der ligger i Guldborgsund Kommune (Østlolland).

Data for indsatsområde i Guldborgsund Kommune

Areal:	386 km ²
OSD:	189 km ²
Vandværker:	20
Boringer:	52
Boringer i NFI:	41
Boringer i IO:	39

Store dele af arealet i Guldborgsund Kommune er vurderet som nitratfølsomme indvindingsområder i statens nye endelige kortlægning. Dette skyldes hovedsageligt et relativt tyndt lerdæklag flere steder (nogen sårbarhed). Der er fundet nitrat i 12 indvindingsboringer.

Det vil være meget store områder, hvor der i givet fald skulle træffes dyrkningsaftaler med landmænd, hvis dette skal ske i hele IO.

Guldborgsund kommune ønsker at undersøge, om det er muligt at skelne imellem forskellige grader af behov for indsats indenfor de områder som kortlægningen har udpeget (IO). Dette kunne f.eks. være 3 kategorier:

1. Områder der er meget sårbare, hvor der kræves umiddelbar indsats
2. Områder med nogen sårbarhed, hvor det må forventes at blive nødvendigt med indsats inden for en overskuelig tidshorisont (30 – 100 år)
3. Områder hvor tidshorisonten for indsats overfor nitratudvaskning er større end 100 år.

Til det formål har Guldborgsund kommune bedt AKTOR innovation om at vurdere, om de eksisterende grundvandskemi data kan anvendes til en yderligere prioritering og opdeling af IO.

1.2 Formål

Dette projekts formål har været:

- At gennemføre en videregående analyse af de eksisterende kortlægningsdata for at graduere behovet for indsats med henblik på at effektivisere og prioritere ressourcer i indsatsens planlægningsfase.

- At analysere grundvandskemien for indvindingsboringer i indsatsområde Lolland, placeret i Guldborgsund Kommune, for at identificere de overordnede forhold af betydning for beskyttelsen af grundvandsressourcen i Guldborgsund Kommune
- At anvende modellen ANAFLOW til analysen af den tidsmæssige udvikling af grundvandskemidata for at vurdere grundvandets opholdstid i dæklag og grundvandsmagasin
- At identificere særligt sårbare grundvandsmagasiner eller hydrogeologiske forhold, der giver anledning til en særlig indsats

2. Metoder og datagrundlag

2.1 Dataudtræk

Databehandlingen er udført på et udtræk fra Jupiter databasen for hele Guldborgsund Kommune d. 25 februar 2014.

2.2 ANAFLOW

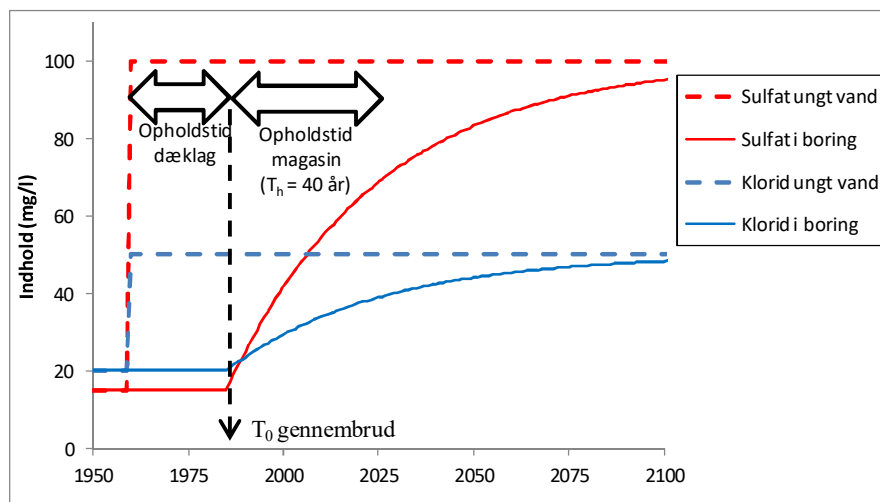
Den praktiske udførelse, af de dynamiske analyser af kemitidsserier fra aktive indvindingsboringer for nitrat, klorid, sulfat, fluorid og nikkel, er gennemført med ANAFLOW modellen /Aktor, 2011/. Her simplificeres overgangen til den intensive landbrugsdrift som en brat stigning af stofindholdet i det unge grundvand – beliggenheden er fastlagt til 1960 (se også afsnit 4: Appendiks om ANAFLOW).

ANAFLOW:

$$C_{boring} = \begin{cases} C_0 & t < t_0 \\ C_{ung} + (C_0 - C_{ung})e^{-\frac{t-t_0}{T_h}} & t \geq t_0 \end{cases}$$

Hvor:

C_{boring} er blandingskoncentrationen i boringen
 C_0, C_{ung} er stofindhold i det oprindelige hhv. unge grundvand
 t_0 er starttidspunktet for infiltration af ungt grundvand
 T_h er den hydrauliske opholdstid i grundvandsmagasinet



Figur 1. ANAFLOW modellen beskriver udviklingen i kemitidsserier i en boring som en funktion af de geokemiske randbetingelser (stofindhold i oprindeligt og ungt grundvand) samt de hydrogeologiske randbetingelser (hydraulisk opholdstid i dæklag og grundvandsmagasinet).

Indhold af nitrat i ungt grundvand vil i praksis variere tidsmæssigt såvel som på markblokniveau sammen med parametrene klorid og sulfat. I perioden før det moderne landbrugs intensive gødnings-tilførsel er det unge grundvands sammensætning domineret af tilførsel af klorid, svovl og kvælstof fra atmosfære, husdyrgødning og

importeret gødning. Derefter stiger udvaskningen indenfor en kort årrække (1960 – 1980).

2.3 Geokemiske randbetingelser

De anvendte geokemiske randbetingelser er samlet i Tabel 1. Dog er der i nogle tilfælde anvendt andre randbetingelser baseret på en konkret vurdering.

De hydrogeologiske randbetingelser for udviklingen i grundvandets sammensætning er givet af opholdstid i dæklag og i grundvandsmagasinet og fastlagt ved tilpasning af modelkurverne til kemitidsserierne – jf. Figur 1.

Tabel 1. Typiske geokemiske randbetingelser for klorid, sulfat og nitrat

Sediment	Klorid (mg/l)	Nitrat (mg/l)	Sulfat (mg/l)
Oprindelig vandtype før 1960, fersk	20	0	20
Oprindelig vandtype før 1960, salt	200	0	20
Ungt vand efter 1960, spændt vandspejl	40	0	100
Ungt vand efter 1960, frit vandspejl	40	0 – 50	100 – 400
Bynært, ungt vand efter 1960, frit vandspejl påvirket af vejsalt	100-150	0 – 50	100 – 400

Forhøjet indhold af salt i grundvandet, der ikke skyldes indtrængende havvand, optræder primært i områder med lille grundvandsdannelse, hvor diffusion af klorid fra dybt liggende residualt salt grundvand får betydning. Denne diffusion kan vurderes til ca. 0,5 g klorid pr. m² pr. år (se afsnit 5 Appendiks om klorid diffusion).

Grundvandsmagasiner af opsprækket kalk eller skrivekridt er sårbare overfor mobilisering af nikkel pga. pyritoxidation. Dette skyldes et mindre indhold af mineraler, der kan tilbageholde frigivet nikkel. Denne pyritoxidation kan både skyldes, at vandindvindingen har ført til frit vandspejl eller, at grundvand med højt nitratinhold trænger ned gennem dæklagene til grundvandsmagasinet.

Hvis grundvandsdannelsen er så lav, så opholdstiden i grundvandsmagasinerne bliver betydningsfuld, kan indholdet af naturlige sporstoffer stige. Dette gælder f.eks. strontium og fluorid i skrivekridtmagasiner og arsen, metan og svovlbrinte mere generelt. I afsnit 6 (Appendiks om sporstoffer i kalk fra Hinsby et al.) er der gengivet generelle data om sporstofindhold i skrivekridt sammenlignet med Danienskalk og Grønsandskalk.

Den geokemiske beskyttelse, overfor udvaskning og nedsivning af nitrat, er sedimenternes indhold af reducerede mineraler – f.eks. Fe^{2+} -holdige mineraler som pyrit, siderit og silikater (lermineraler) samt organisk stof. Det vigtigste mineral under grundvandsspejlet er uden tvivl pyrit, som forekommer i både ler og sand, men sammenligning af indholdet hhv. over og under redoxgrænsen viser, at de øvrige mineraler også er af betydning jf. Tabel 2.

Ved at sammenholde forskellen mellem sedimenternes indhold af reducerede mineraler, er det muligt at beregne nitratreduktionskapaciteten i reducerede sediment. Nitratreduktionskapaciteten i sand ($1,8 \text{ kg N/m}^3$) kombineret med maksimal kvælstof flux på 100 kg N/ha/år ($= 0,01 \text{ kg N/m}^2/\text{år}$) svarer til, at redoxgrænsen flyttes 1 meter pr. 180 år.

Redoxgrænsen kan dog flyttes hurtigere gennem sprækker i dæklag af moræneler eller, hvis strømmingen i grundvandsmagasinet domineres af hældende eller foldede lag. Tilsvarende kan frit vandspejl betyde, at atmosfærisk ilt trænger ned i grundvandsmagasinet, og dermed formindsker puljen af reducerede mineraler.

For skrivekridtet er reduktionskapaciteten noget mindre pga. et mindre pyrit indhold og fordi indholdet af reaktivt organisk stof er meget lavt pga. skrivekridt sedimenternes høje alder.

Tabel 2. Middelværdier for geokemiske parametre i ler og sand /Aktor, 2002/ samt skrivekridt /Hinsby et al., 2003/

Sediment	TOC (% C)	Fe^{II} (% Fe)	Fe^{III} (% Fe)	Pyrit (% FeS_2)
Moræneler oxideret	0,08	0,2	1,1	0,05
Moræneler reduceret	0,15	0,5	0,8	0,25
Sand oxideret	0,04	0,3	0,5	0,02
Sand reduceret	0,10	0,4	0,5	0,17
Skrivekridt, reduceret	?	0,06	?	0,05

2.4 Særlige forhold på Østlolland

Der er to betydende typer af grundvandsmagasiner på Østlolland:

- Skrivekridt (opsprækket), der har betydning som grundvandsmagasin i den nordøstlige del af området.
- Sandmagasiner, der har tilknytning til en begravet dal eroderet i skrivekridtoverfladen, og primært er udbredt mod syd og vest.

Dæklagene over skrivekridtet er af begrænset mægtighed i området nord for Sakskøbing Å og Flintinge Å (en linje gennem Sakskøbing og Toreby).

Kloridindholdet ligger generelt noget højere, end man ser andre steder i landet – ofte omkring $50 - 80 \text{ g/m}^3$ – hvilket formentlig skyldes den begrænsede grundvandsdannelse i området. Det forholdsvist flade landskab giver en ret lille grundvandsdannelse i kombination med den udbredte dræning og afvanding af området.

I skrivekridtet ses i områderne med tynde dæklag og ungt nitratholdigt grundvand også et stigende indhold af nikkel, der kan overskride grænseværdierne for nikkel i drikkevand (20 µg/l). Det betyder, at nikkel – snarere end nitrat i sig selv – kan give anledning til behov for indsats overfor nitratudvaskning.

3. Resultater

3.1 Resultater af alderssimulering med ANAFLOW

Resultaterne af databehandlingen med ANAFLOW er samlet i bilag 1. I tidsserierne er der anvendt data for klorid, sulfat, fluorid, nitrat og nikkel. ANAFLOW model parametrene har flg. betydning:

- t_o Model start tid, se Figur 1
- t_h Model opholdstid i grundvandsmagasin
- Cl_o Kloridkoncentration ved start tid
- Cl_{ung} Kloridkoncentration ungt vand
- F_o Fluoridkoncentration ved start tid
- F_{ung} Fluoridkoncentration ungt vand
- Ni_o Nikkelkoncentration ved start tid
- Ni_{ung} Nikkelkoncentration ungt vand
- $NO_{3,o}$ Nitratkoncentration ved start tid
- $NO_{3,ung}$ Nitratkoncentration ungt vand
- $SO_{4,o}$ Sulfatkoncentration ved start tid
- $SO_{4,ung}$ Sulfatkoncentration ungt vand
- T Transmissivitet (fra specifik kapacitet)
- Q_v Gennemsnitlige indvinding (sidste 5 år)

3.2 Forslag til prioritering af indsats opdelt på boringer

På baggrund af resultaterne fra ANAFLOW er samtlige undersøgte boringer prioriteret med hensyn til behovet for indsats (jf. Tabel 3 nedenfor). Ved vurderingen af behovet for indsats er der primært anvendt den model opholdstid, som fremkommer fra ANAFLOW simuleringen af kemitidsserier.

En lav model alder indikerer en kort opholdstid og stor lokal grundvandsdannelse. Dette betyder, at opholdstid i dæklag (og dermed beskyttelse overfor forurening) også er begrænset.

Boringerne er inddelt i 5 klasser, hvor 1 svarer til laveste prioritering, og 5 svarer til den højeste prioritering eller behov for indsats. For at lette sammenligning med prioritering i Naturstyrelsens kortlægning, er denne klassificering også medtaget i Tabel 3 (farvekoder samt placering i nitratfølsomme indvindingsområder – NFI og indsatsområder – IO).

Der er ikke anvendt faste aldersgrænser for prioriteringen, da grundvandsmagasinet hydrogeologi samt data for nikkel, fluorid og miljøfremmede stoffer er inddraget i vurderingen.

Tabel 3. Resultater af ANAFLOW model alder (t_h) med rating af sikkerheden i bedømmelsen og prioriteringsklasse fra denne undersøgelse. Dette er sammenlignet med prioriteringsfarvekoder fra Naturstyrelsens kortlægning (NST), samt placering i nitratfølsomme indvindingsområder (NFI) og indsatsområder (IO)

Boring (DGU og vandværk)	Magasin	t_h	rating	Årsag til prioritering	klasse	NST	NFI	IO
241. 112 Døllefjelde-Musse	sand3/k	20	sikker	Nikkel	5		Ja	Ja
241. 131 Døllefjelde-Musse	sk	60	usikker	Alder	4		Ja	Ja
237. 106 Fjelde Vv	sk	200	usikker	Alder (utæt boring?)	2		Nej	Nej
237. 370 Fjelde Vv	sk	200	sikker	Alder	1		Nej	Nej
241. 63 Frejlev klokkemose	g/k	50	sikker	Alder (Bentazon)	3		Ja	Ja
241. 101 Frejlev klokkemose	s	60	sikker	Alder (Bentazon)	3		Ja	Ja
241. 149 Frejlev klokkemose	sand3	20	sikker	Alder (Bentazon)	4		Ja	Ja
241. 126 Godsted	ds	100	sikker	Alder	1		Ja	Ja
241. 147 Godsted	ds	90	sikker	Alder	1		Ja	Ja
237. 103A Grænge	sk	70	sikker	Alder	2		Ja	Ja
237. 103C Grænge	sk	300	sikker	Alder	1		Ja	Ja
237. 274 Grænge	sk	90	sikker	Alder	2		Ja	Ja
241. 64 Herritslev	g	20	sikker	Alder (Nitrat)	5		Ja	Ja
241. 130 Herritslev	ds	30	sikker	Alder	3		Ja	Ja
241. 148 Herritslev	dg	30	sikker	Alder	3		Ja	Ja
241. 152 Kettinge falkevej	sand3	60	sikker	Alder (Bentazon)	3		Ja	Ja
241. 129 Kettinge falkevej	sand3	90	sikker	Alder	1		Ja	Ja
237. 354 Majbølle	sk-s-sk	250	usikker	Punktkilde	5		Ja	Ja
237. 366 Majbølle	k	300	sikker	Alder	1		Ja	Ja
241. 99 Nysted	ds	30	sikker	Alder (Bentazon)	4		Ja	Ja
241. 170 Nysted	s/g	25	sikker	Alder	4		Ja	Ja
237. 101 Radsted	k	15	sikker	Alder (Nikkel)	5		Ja	Ja
237. 276 Radsted	sk	15	sikker	Alder (Nikkel)	5		Ja	Ja
237. 373 Radsted	sk	15	sikker	Alder (Nikkel)	5		Ja	Ja
237. 181 Rørbæk	sk	15	sikker	Alder (Nitrat)	5		Ja	Ja
237. 270 Rørbæk	sk	40	sikker	Alder (Nitrat)	5		Ja	Ja
237. 277 Rørbæk	k	40	sikker	Alder (Nitrat)	5		Ja	Ja
237. 337 Rørbæk	dg-ms	50	usikker	Alder	4		Ja	Ja
237. 363 Sakskøbing	sk	300	sikker	Alder	1		Nej	Nej
237. 364 Sakskøbing	sk	300	sikker	Alder	1		Nej	Nej
237. 365 Sakskøbing	sk	300	sikker	Alder	1		Nej	Nej
231. 165 Guldborgland	k	300	sikker	Alder	1		Nej	Nej
237. 190 Guldborgland	k	100	sikker	Alder	1		Nej	Nej
237. 319 Toreby	sk	20	usikker	Alder (Nikkel+BAM)	5		Ja	Ja
237. 350 Toreby	k	50	sikker	Alder (Nikkel+BAM)	5		Ja	Ja
237. 317 Tårs	k	15	sikker	Alder (Nikkel+BAM)	5		Ja	Ja
237. 362 Tårs	k	40	usikker	Alder (Nikkel+BAM)	5		Ja	Ja
237. 371 Tårs	sk	40	sikker	Alder (Nikkel+BAM)	5		Ja	Ja
237. 355 Vandf. Østlolland	sk	40	sikker	Alder (Lav strontium)	4		Ja	Ja
237. 541 Vandf. Østlolland	sk	40	sikker	Alder (Lav strontium)	4		Ja	Nej
237. 542 Vandf. Østlolland	sk	40	sikker	Alder (Lav strontium)	4		Ja	Nej
237. 567 Vandf. Østlolland	sk	40	usikker	Alder (Lav strontium)	4		Ja	Ja
237. 599 Vandf. Østlolland	sk	40	usikker	Alder (Lav strontium)	4		Ja	Ja
241. 91 Vantore-Tågense	ds	300	sikker	Alder	1		Ja	Ja
241. 145 Vantore-Tågense	ds-k	300	sikker	Alder	1		Ja	Ja
241. 123 Vantore-Tågense	ds	300	sikker	Alder	1		Ja	Ja
241. 28 Vester Ulslev	ds-g	500	sikker	Alder	1		Nej	Nej
241. 121 Vester Ulslev	s	500	sikker	Alder	1		Nej	Nej
237. 326 Våbensted	sk	100	usikker	Alder (utæt boring ?)	1		Nej	Nej
237. 353 Våbensted	ds/dg	150	sikker	Alder	1		Nej	Nej
241. 119 Øster Ulslev	s	100	sikker	Alder	2		Ja	Ja
241. 150 Øster Ulslev	ds	70	sikker	Alder	2		Ja	Ja

Sand/grus grundvandsmagasiner er mere robuste overfor nitratpåvirkning, da strømningshastighederne er væsentligt lavere, sammenlignet med det opsprækkede skrivelid. Samtidigt har disse magasintyper et højere indhold af lerminerale og organisk stof, der begrænser mobiliteten af forureningskomponenter som nikkel og miljøfremmede stoffer. Samlet betyder disse forhold, at sand/grus magasiner generelt er blevet tildelt en lavere prioritering i forhold til kridt magasiner med en sammenlignelig aldersfordeling (t_h). Indsatsen bør primært rettes mod anvendelse af sprøjtemidler.

Ved vurdering af alderen er der medtaget oplysninger om strontium i skrivelid, som er samlet af Guldborgsund Kommune i forbindelse med denne undersøgelse (bilag 2). Strontium er en forholdsvis sikker indikator for opholdstid i uforvitret skrivelid. Desuden indgår ANAFLOWs model resultater for fluorid også som en kvalitativ aldersindikator.

Dette har bl.a. medført, at vi vurderer borerne, der tilhører Vandforsyning Østlolland til at repræsentere forholdsvis ungt vand på trods af meget lavt sulfatindhold. Vi vurderer, at det lave sulfatindhold skyldes et højt indhold af ungt organisk kulstof i dæklagene, da borerne også indeholder en del metan. Vi vurderer derfor, at der er risiko for forurening af skrivelidet med miljøfremmede stoffer på denne kildeplads som følge af tynde dæklag og stor lokal grundvandsdannelse.

Majbølle Vandværks boring DGU 237.354 repræsenterer en forholdsvis gammel vandtype, men har meget klare indikationer på en nærliggende punktkilde (pesticidrester og stigende klorid indhold). Kilden vurderes at være meget tæt på indvindingsboringen.

En række vandværker, med indvinding fra skrivelidet nord for Saksbøbing Å og Flintinge Å (Radsted, Toreby og Tårs) samt Døllefjelde-Musse syd herfor, har problemer med nitrat, miljøfremmede stoffer og især nikkel. Disse vandtyper vurderes som ret unge, og forebyggende indsats bør prioriteres højt (er også vurderet i NSTs kortlægning).

Bentazon findes i en del borer ligesom BAM og dette mobile pesticid hhv. nedbrydningsprodukt, kan give problemer for vandforsyningerne, hvor grundvandets alder er lav (eks. Nysted og Kettinge-Frejlev).

Modelresultaterne for ANAFLOW er ikke lige entydige på alle indvindingsboringer – vi vurderer at utætte boringsafslutninger kan være en medvirkende årsag. Det bør undersøges om de mange mindre forsyninger i området, har afstemte pumpeydelse i forhold til vandforsyningernes størrelse. Dette har både betydning for risikoen for forurening (skorstenseffekt) og optimal udnyttelse af vandbehandlingsanlægget.

3.3 Fokusområder

Resultaterne af vores forslag til prioriteringen er vist samlet på kort bilag 3. På kortet har vi vist de enkelte indvindingsboringers klassificering i forhold til vores forslag til prioritering af indsatsen. Det fremgår, at der er to fokusområder:

- Den højtliggende kalk med tynde dæklag nord for Saksøbing Å og Flintinge Å. Dette område har forøget risiko for nikkel, nitrat og gennemslag af miljøfremmede stoffer – primært pesticider.
- Det lidt højere liggende morænelandskab nord for Nysted omkring tunneldalsystemet, hvor grundvandsdannelsen ifølge ANAFLOW (og NST kortlægning) er relativt høj til den begravede dal. I dette område er risikoen primært gennemslag af pesticider

Generelt vurderes dæklag og grundvandsmagasinerne i Indsatsområde Lolland (Øst) at have en høj nitratreduktionskapacitet, fordi trykniveauet i grundvandsmagasinerne står tæt ved terrænoverfladen. Dette begrænser tykkelsen af den oxiderede zone, der primært skyldes diffusion af atmosfærisk ilt i den umættede zone.

I skrivekridtet nord for Saksøbing Å og Flintinge Å kan der dog som beskrevet tidligere være særligt sårbare forhold. Dette skyldes sprækker – både i de tynde morænelerdæklag og i selve skrivekridtet, der gør det muligt for nitrat at udbredes til større dybde og i omfang fra evt. sårbare områder. Den væsentligste risiko stammer dog fra den sekundære effekt ved mobilisering af nikkel pga. pyritoxidation.

I det sydlige område nord for Nysted, hvor grundvandsmagasinet består af sand- og grus-sedimenter med geokemisk beskyttelse fra pyrit og organisk kulstof, er risikoen ikke nitrat men primært mobile pesticider.

Den videre og mere detaljerede udpegning af indsatsområder kan gennemføres på baggrund af den hydrogeologiske modellering udført for Naturstyrelsen (numerisk strømningssmodel). Dette kombineres med mere detaljerede målinger af trykgradienterne på kildepladserne og egentlige prøvepumpinger de enkelte indvindingsboringer.

ANAFLOW alder simuleringerne kan anvendes som input til indflydelsesafstand fra boringen ved at vurdere grundvandsmagasinet's mægtighed. Dette kan gøres med udgangspunkt i de metoder, der anvendes til fastsættelse af boringsnære beskyttelsesområder (BNBO).

Man kan anvende ANAFLOW modellens simulering af opholdstiden som et skøn for den signifikante størrelse af grundvandsmagasinet. Ved at antage en magasinetykkelse (*magasinets geologi ned til filteret eller borehuls underkant*) og porøsitet (*skrivekridt 40 % og sand 35 %*), er det muligt at få en uafhængig vurdering af størrelsen af det grundvandsdannende opland.

Klassificering af indvindingsboringernes sårbarhed i Tabel 3 kan så danne et eventuelt udgangspunkt for i hvor stor en del af dette areal, der planlægges og i sidste ende igangsættes en indsats.

Sammenlignes kloridindholdet med den forventede klorid flux pga. diffusion fra dybtliggende salt grundvand ($0,5 \text{ g klorid/m}^2/\text{år}$), er grundvandsdannelsen mange steder i området i størrelsesorden $5 - 15 \text{ mm/år}$. Vores analyse af grundvandets alder viser, at opholdstiden i dæklagene er meget kort, og derfor er strømning i sprækkerne i morænelerdæklagene formentlig af stor betydning, og dæklagenes beskyttelse begrænset. Der er dog også en del indvindingsboringer med ret betydelige alder.

4. **Appendiks om ANAFLOW**

Den historiske udvikling i vandkvalitetens sammensætning er af central betydning for vurdering af bæredygtigheden af vandindvindingen. Det er derfor vigtigt at kunne beskrive den relative betydning af grundvandsdannelse og kildestyrkerne for sulfat, klorid, nitrat eller pesticider.

Der er til dette formål anvendt en analytisk model ANAFLOW til vurdering af dynamiske effekter på vandkvaliteten på kildepladserne. Det teoretiske udgangspunkt for modellen er beskrevet i *faktaboks* om ANAFLOW, og valg af modelparametre er tidligere beskrevet i afsnit 2.3. Resultaterne af modellen for de enkelte vandværker og kildepladser ses i bilag 1.

Faktaboks ANAFLOW: Analytisk stoftransportmodel for et homogent grundvandsmagasin

I forbindelse med vandspejlssænkningerne vil grundvandets aldersfordeling ved kildepladserne ændres pga. infiltration af ungt grundvand tæt ved kildepladserne. Man får således en blanding af ungt og gammelt vand i den blanding af vandpartikler, der indvindes på kildepladserne.

Denne model er baseret på en antagelse om, at aldersfordelingen af grundvandet i kalkmagasinet stort set svarer til et homogent medium med ensartet grundvandsdannelse (vandrette isochroner). Det kan vises, at denne model svarer til hydraulikken i en ideelt opblandet reaktor.

Anvendelsen af den hydrauliske model for ideelt opblandede reaktorer er begrundet i de typiske gennembrudskurver for sulfat i indvindingsboringerne i området, og kan ses som et yderpunkt i den mulige opholdstidfordeling i grundvandet ved indvindings-boringen.

Det modsatte (hydrauliske) yderpunkt svarer til den ideelt gennemstrømmede reaktor, hvor alt grundvand har den samme alder ved indvindingsboringen. Dette vurderes at være urealistisk. En vandpartikel, der infiltrerer i randområdet til indvindingsoplandet, må nødvendigvis have en væsentlig højere alder, når den når frem til indvindingsboringen, sammenlignet med den vandpartikel, der infiltrerer tæt ved kildepladsen.

I modellen er det desuden nødvendigt med antagelser (støttet på måledata) om det oprindelige sulfatindhold og sulfatindholdet i ungt grundvand. Sulfat regnes som konservativt stof, som ikke vekselvirker med sedimenterne. Sulfatholdigt ungt grundvand begynder at infiltrere ved start af den intensive vandindvinding på kildepladsen pga. sænkning af vandspejlet.

Faktaboks ANAFLOW: Analytisk stoftransportmodel for et homogent grundvandsmagasin (fortsat)

Indholdet af sulfat eller andet konservativt transporteret stof, der ikke indgår i væsentlige reaktioner med sedimentet (f.eks. klorid eller BAM), beskrives således:

$$C_{boring} = \begin{cases} C_0 & t < t_0 \\ C_{ung} + (C_0 - C_{ung})e^{-\frac{t-t_0}{T_h}} & t \geq t_0 \end{cases}$$

hvor

- i. C_{boring} er blandingskoncentrationen i boringen
- ii. C_0 , C_{ung} er det oprindelige sulfatindhold og i ungt grundvand
- iii. t_0 er starttidspunktet for infiltration af ungt grundvand
- iv. T_h er den hydrauliske opholdstid i grundvandsmagasinet

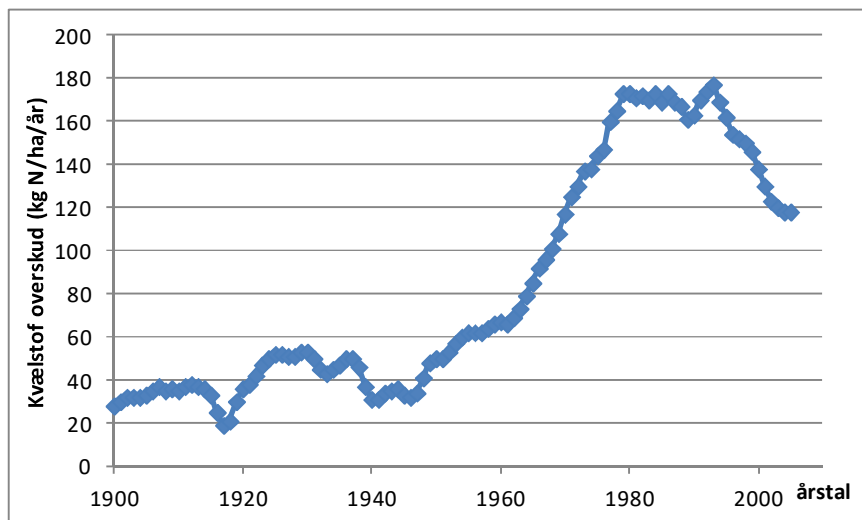
Den hydrauliske opholdstid er den samlede hydrauliske opholdstid fra grundvandets dannelse frem til indvinding, og beregnes som forholdet mellem det samlede volumen af strømmende grundvand i dæklag og grundvandsmagasin (effektiv porøsitet) og grundvandsdannelsen. De typiske tykkelser af dæklag i området på 10 – 30 meter og en skønnet grundvandsdannelse på 0,01 – 0,02 m/år, giver gennemsnitlige opholdstider i de kvartære dæklag på 125 – 750 år (effektiv porøsitet på 0,25). Fra resultaterne i bilag 1 ses ofte gennembrud indenfor nogle få år som tegn på at sprækkestrømning har stor betydning for grundvandsdannelsen

En tilsvarende model for en tidsbegrænset puls af et miljøfremmed stof som BAM eller ved ændring af fluxen f.eks. af sulfat kan opstilles for den ideelt opblandede reaktor.

$$C_{boring} = C_{BAM,inf} \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{T_h}} \right)_{for\ t > t_0} - C_{BAM,inf} \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{T_h}} \right)_{for\ t > t_1}$$

- i. $C_{BAM,inf}$ er BAM koncentration i det infiltrerende grundvand
- ii. t_0 er start tidspunktet for infiltration af forurening
- iii. t_1 er stop tidspunktet for infiltration af forurening

Ved hjælp af ANAFLOW kan vi sammenligne den faktiske historiske udvikling i grundvandskvaliteten med modelberegninger ud fra antagelse om væsentlige parametre som f.eks. grundvandets alder og kildestyrke. Størrelsen af disse parametre er af stor interesse i vores vurdering af den fremtidige udvikling i vandkvaliteten – de er et nøgleværktøj til beskrivelse af bæredygtigheden af den nuværende eller fremtidige vandindvinding.



Figur 2. Opgørelse af landbrugets kvælstofoverskud i forhold til opdyrket areal. I ANAFLOW modellen er den kraftige stigning i perioden 1960 – 1980 forenklet til en momentan stigning.

Hvis dæklagene indeholder pyrit, omdannes nitrat til frit kvælstof og pyrit oxideres, hvorved der bl.a. dannes sulfat:



Ved oxidationen af pyrit produceres 103 g sulfat pr. 100 g nitrat – altså i praksis 1:1.

5. Appendiks om klorid diffusion

På baggrund af de målte værdier af klorid ved opstart af kildepladserne, er det muligt at vurdere den *naturlige lokale* grundvandsdannelse før starten af vandindvindingen. I dette afsnit bestemmes grundvandsdannelsen på baggrund af en række referencer til analytiske/teoretiske betragtninger og feltforsøg.

Det forhøjede indhold af klorid i grundvandet fra kildepladserne i indsatsområdet er en central problemstilling for vandindvindingen. Ofte vurderes saltvandsproblemerne at stamme fra dybtliggende saltvand, der strømmer langs forkastninger og sprækker. Dette er ikke den anvendte hypotese i dette arbejde.

Vi mener at det forhøjede kloridindhold i er et naturligt fænomen pga. en naturlig lav grundvandsdannelse. Den lave eller manglende naturlige grundvandsdannelse betyder, at transport af klorid vha. diffusion fra den dybe og tætte dele af Skrivekridt kan få betydning.

Selvom den naturlige transport af klorid ved diffusion over store afstande er en meget langsom proces, så kan denne proces alligevel blive betydningsfuld for grundvandets kloridindhold. Hvis den naturlige grundvandsdannelse – og dermed fortynding med nedbør – bliver tilstrækkelig lille, kan man vha. en massebalance over transporten af klorid med grundvandets afstrømning påvise, at det fører til forhøjede indhold af klorid.

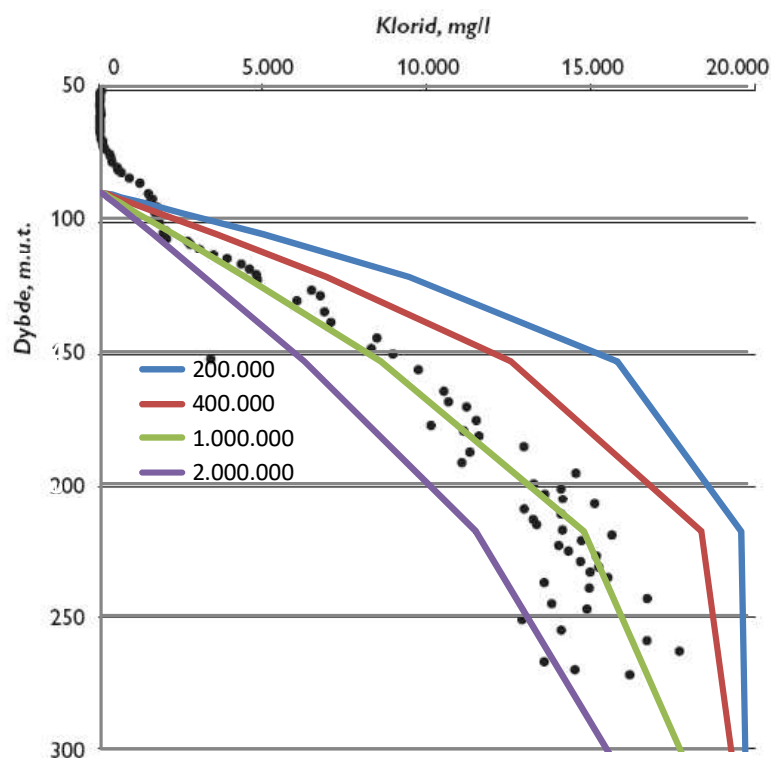
Den diffusionskontrollerede transport af klorid fra residualt saltvand i kalkbjergartens primære porer (primær porøsitet) fra de dybtliggende kalkmagasiner er påvist ved geofysiske undersøgelser af saltvandsgrænsens beliggenhed i en række sjællandske borer.

Man ser ikke en egentlig skarp saltvandsgrænse, men snarere en jævnt stigende koncentration med dybden (se Figur 3). Denne jævnt stigende koncentration af klorid kan forklares med den naturlige diffusion af klorid i kalkens porevæske. I faktaboksen om klorid **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** er en analytisk model til beskrivelse af saltvandsgrænsens udvikling over tid opstillet.

I den højtliggende skrivekridt strømmer grundvandet typisk i sprækker, fordi kalkbjergartens matrix er opbygget af små partikler, der gør den lige så tæt som ler – eller tættere. Fra 75 – 100 m u.t. er der en overgangszone, hvor betydningen af kloridtransporten med det strømmende grundvand får mindre og mindre betydning.

I det dybtliggende skrivekridt – dvs. dybder større end 100 meter – kan transport kun ske gennem kalkmatrix, fordi sprækker i skrivekridtet lukker pga. forskydningsspændinger fra vægten af de overliggende sedimenter (> 1,5 – 2,0 MPa /8/). De naturlige trykgradienter i den dybtliggende kalk er for små til at give en egentlig

grundvandsstrømning, og derfor bliver transport via diffusion betydende.



Figur 3 Målinger af kloridindhold i centrifugeret porevand fra skrivekridt i boring ved Karlslunde (Sjælland). Målingerne (sorte punkter) er sammenlignet med modelberegninger som beskrevet i faktaboksen om klorid. Kurverne angiver tidspunkter fra 200.000 – 2.000.000 år – der er god overensstemmelse med en udvaskningsperiode på ca. 1 mio. år.

Faktaboks: Analytisk model for klorid diffusion

Transporten af klorid fra de dybe dele af kalkmagasinerne til det ferske grundvand, der strømmer i den øvre opsprækkede Grønsandskalk og Danienkalk, skyldes molekylær diffusion i kalkbjergarternes primære porøsitet (matrix). En simpel analytisk model kan baseres på Ficks lov om diffusion.

Denne nedenstående model (diffusion i semi-infinit porøst medium /9/) kan anvendes til at beskrive udviklingen i saltvandsgrænsen over tid (se **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.**):

$$C(z, t) = C_0 + (C_1 - C_0) \cdot \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{\sqrt{4D_e t}} \right\}, \text{ hvor}$$

- $C(z, t)$: porevandskoncentration i dybden z under prækvartær overfladen til tiden t (efter start af diffusion)
- C_0 : Start koncentration i porevæske (20.000 mg/l)
- C_1 : Koncentration i grundvand over prækvartær overflade (20 mg/l)
- D_e : Effektiv diffusionskoefficient i kalk ($0,4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ /7/)
- erfc : Den komplementære fejlfunktion: $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$

Der tilføres altså konstant salt nedefra til det ferske strømmende grundvand, og koncentrationen af klorid i et bestemt punkt vil under naturlige forhold bestemmes af den relative balance mellem tilførsel (flux) af salt og tilførsel af ferskvand (grundvandsdannelse).

Den gennemsnitlige saltkoncentration i det opsprækkede kalkmagasin (grundvandsmagasin) kan vurderes ud fra en massebalance for tilførsel af salt og vand.

- Tilførsel af klorid vurderes ud fra fluxen F af klorid. Fluxen bestemmes ud fra koncentrationsgradienten i den tætte del af kalkmagasinet:

$$F = -\varepsilon D_e \frac{\partial C}{\partial z}$$

- Tilførsel af grundvand vurderes ud fra den gennemsnitlige grundvandsdannelse til kalkmagasinets øvre del, der her betegnes N .
- Koncentrationen af klorid beregnes derefter:

$$C_{\text{magasin}} = \frac{F}{N} = C_0 \cdot \frac{\varepsilon}{N} \cdot \sqrt{\frac{D_e}{\pi \cdot t}}, \text{ hvor}$$

- ε er porøsiteten i kalkmatrix (ca. 40 %)
- C_0 er start koncentration i porevæske (ca. 20.000 mg/l)

Egentlige feltmålinger af kloridtransporten kan baseres på direkte målinger af diffusionskoefficienter eller porøsitet og saltkoncentration i porevæsken såvel som mere indirekte målinger f.eks. formationsledningsevne bestemt ved induktionslog (geofysisk målemetode ved borehulslogging). De målte værdier for den diffusionskontrollerede kloridflux på Østsjælland ligger i intervallet 0,12 – 1,0 g Cl/m²/år. Tilsvarende værdier (0,4 – 0,5 g Cl/m²/år) er beregnet ud fra geofysiske borehulsundersøgelser i dybe borer til kalken ved Holmehave Kildeplads syd for Odense.

I indsatsområde Lolland er der ofte naturligt forhøjet indhold af klorid. Typiske værdier for kloridindholdet ligger i intervallet 40 – 80 mg/l. De målte værdier af klorid kan anvendes til at vurdere den *naturlige lokale* grundvandsdannelse før starten af vandindvindingen (på baggrund af faktaboksen om kloriddiffusion):

$$N = \frac{F}{C_{\text{magasin}}} = \frac{0,50 \text{ g Cl m}^2 \text{ år}^{-1}}{40 - 80 \text{ g Cl m}^{-3}} = 0,006 - 0,012 \frac{\text{m}}{\text{år}} = 6 - 12 \text{ mm/år}$$

Dette er en forholdsvis lille grundvandsdannelse, som samtidigt er i god overensstemmelse med de udførte modelberegninger med den numeriske strømningsmodel udført af Naturstyrelsen.

6. **Appendiks om sporstoffer i skrivekridt**
Data fra Hinsby et al. (2003):

Table 1.1 Selected data from the different limestone units and formations compiled from various sources. All units may serve as aquifers depending on locality

Age Formation	Seelandian Lellinge Grønsand (Lellinge Greensand)	Danian N.N.	Danian København Kalk (Copenhagen Limestone)	Danian Bryozoon Limestone*	Maastrichtian "Skrivekridt" ("White Chalk")
Facies ¹⁾	Glauconitic, marly carbonate sands and ooze with clay seams and clay layers	Carbonate ooze	Carbonate sands and silt (~70 % in sand fraction)	Bryozoon Mounds (typically 20-45 % Bryozoa)	Carbonate ooze w. rare marly layers
Rock classification* (after Dunham, 1962)	Primarily glauconitic and quartzitic grainstone	Mudstone (chalk/micrite) w. chert	Wackestone to packstone w. chert	Wackestone to grainstone w. chert	Mudstone (chalk/micrite) w. chert
Carbonate content ²⁾	82 wt.%		98-99 wt.%	95 wt.%	98 wt.%
Non-carbonate					0,5-10 wt.%
Chert content of bulk rock		10-20 vol.%	10-20 vol.%	20-30 vol.%	5-10 vol. %
Silica ²⁾ ; wt%	10,5		0,8	0,5-1	0,5
Clay minerals ³⁾ ; wt%	2,5		0,15	0,5	smectite and illite; 0,25
Pyrite; wt%	0,002 (0,0075)			0,05-0,1	0,05
Selected elements ²⁾ ; mean values (selected peak values in brackets)					
Calcium; wt%	32,8		39,0	38,0	39,0
Silicon; wt%	4,9		0,37	0,60	0,30
Aluminum; wt%	0,5		0,03	0,10	0,05 (1,5)
Magnesium; wt%	0,6		0,3	0,50	0,1-0,2
Strontium; wt%	0,1		0,07	0,07	0,09
Iron; wt%	0,8		0,04-0,11	0,07	0,06
Sulphur; wt%			0,035	0,025-0,04	0,02-0,03
Phosphorus; wt%	0,3		0,1 (0,5)	0,03 (1,2)	0,04
Fluorid; wt%			0,02-0,06	0,04 (0,6)	0,05 - 0,06
Trace elements ²⁾ ; mean values (selected peak values in brackets)					
Zink; ppm	25		7-13	35 (55)	20 (60)
Nickel; ppm	5-10		5-10	6-10 (300)	2-5
Copper; ppm	5		3-10	4	2-3 (6)
Cadmium; ppm			0,8	1	1
Lead; ppm			5 (124)	2	1-2
Arsenic; ppm			0,4	0,5-1	0,2-0,5

¹⁾ Facies from Thomsen (1995) and Suriyk (1997); ²⁾ Outside chert layers (data from Knudsen and Nygaard 1998); ³⁾ Calculated from content of Al assuming a smectite-like mineralogy. * = informal name

7. Referencer

AKTOR innovation	2002	Kursus i geokemiske tolkningsmodeller afholdt for Odense Vandselskab.
Aktor, H et al.	2011	Geokemisk model for udvikling af vandkemi over tid på Holmehave og Borre by kildepladser. ATV vintermøde, Vingstedcentret, marts 2011
Hinsby, K., et al	2003	Report for the EU research project ('BASELINE'): Natural Baseline Quality of European Groundwater: A basis for Aquifer Management

Revideret udgave, 19/05-2014: Udført af Henrik Aktor.