

# **Kvælstofpåvirkning af grundvandsforekomster - muligheder for validering af modelresultater med måledata**

Birgitte Hansen, Lærke Thorling, Lars Troldborg  
& Bertel Nilsson

# **Kvælstofpåvirkning af grundvandsforekomster - muligheder for validering af modelresultater med måledata**

Birgitte Hansen, Lærke Thorling, Lars Trolborg  
& Bertel Nilsson

# Indhold

<b>Indhold</b>	<b>3</b>
<b>1. Indledning</b>	<b>4</b>
<b>2. Konklusion og anbefalinger</b>	<b>5</b>
<b>3. Konceptuelle overvejelser</b>	<b>7</b>
<b>4. Eksisterende måledata</b>	<b>11</b>
<b>5. Muligheder for evaluering</b>	<b>16</b>
5.1 Evaluering af modelresultater .....	16
5.2 Evaluering af modelopsætning.....	18
<b>Litteraturliste</b>	<b>21</b>

# 1. Indledning

Naturstyrelsen har den 29. februar 2016 igangsat projektet "Kvælstofpåvirkning af grundvandsforekomster" med deltagelse af Naturstyrelsen (NST), Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet (DCA), Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet (DCE) og De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS). Projektet er igangsat på baggrund af regeringens beslutning om at udfase reduktionen af kvælstofnormerne fra 2016 som beskrevet i aftale om Fødevarer- og landbrugspakken.

GEUS har tidligere foretaget en overordnet national vurdering af betydningen af udfasningen af reduktionen af kvælstofnormerne i 2016 – 2018 på grundvandets nitratindhold. I denne vurdering er der alene indregnet effekten af øget kvælstoftilførsel og at landbrugsarealet løbende reduceres, og der er ikke taget hensyn til baselinelementer eller andre kompenserende indsatser. Vurderingen viste, at det iltede grundvand vil få en øget belastning med nitrat fra 2016, såfremt der ikke etableres kompenserende tiltag (Hansen & Larsen, 2016). Danmarks muligheder for at leve op til forpligtigelserne i Vandrammedirektivet, Nitratdirektivet og Drikkevandsdirektivet er derfor udfordret på grund af udfasningen af reduktionen af kvælstofnormerne fra 2016.

Den Nationale Kvælstofmodel er videreudviklet i dette projekt, sådan at modellen er i stand til at foretage beregninger af kvælstoftransport og omsætning fra rodzonen til grundvandsforekomster på ID15 niveau. Modellen er kørt for flere scenarier, hvor der indgår forskellige virkemidler og dermed kompenserende tiltag, som kan reducere nitratudvaskningen til grundvandet som følge af mergødsningen fra 2016. Resultaterne fra dette arbejde er rapporteret i Troldeborg m.fl. (2016).

Formålet med denne rapport er at beskrive muligheder for at validere disse modelresultater med måledata i et efterfølgende projekt. I kapitel 2 præsenteres konklusioner og anbefalinger fra rapporten. I kapitel 3 beskrives konceptuelle overvejelser, og i kapitel 4 præsenteres eksisterende måledata. Begge kapitler danner grundlag for kapitel 5, som indeholder forslag til evaluering af modelresultater og -koncept med måledata. Det ligger ikke inden for rammen af dette projekt at gennemføre en sådan evaluering.

## 2. Konklusion og anbefalinger

Konceptuelt er der betydelige forskelle mellem modelresultaterne fra Kvælstofmodellen og målinger af nitratindholdet i grundvandet, da repræsentativiteten af resultaterne fra modellen og målingerne varierer på forskellig måde i både tid og rum. En konceptuel forståelse af dette er derfor fundamental for at kunne beskrive mulighederne for validering af modelresultater med måledata.

Målingerne repræsenterer den historiske tilstand i grundvandet baseret på punktmålinger i tid og rum, mens modelresultaterne repræsenterer konsekvenserne af udvaskningen i dag og de kommende år baseret på landsdækkende flademodelleringer. Disse forskelle begrænser mulighederne for direkte at sammenligne målinger med modelresultater. I stedet skal målingerne og modelresultaterne ses i sammenhæng.

Der er stor geografisk, rumlig og tidslig variation i fordelingen af eksisterende måledata med hensyn til nitratmålinger og dateringer. I 29 % af de 2711 udpegede grundvandsmagasiner er der nitratanalyser udtaget efter 2000. Det vil sige, at i 71 % af magasinerne foreligger der ikke nitratanalyser i GEUS' boringsdatabase (Jupiter) udtaget efter 2000. I 6 % af grundvandsmagasinerne er der udført dateringer med CFC (chlorofluorocarbon) og/eller tritium-helium-metoden i perioden fra 1987 til 2013 (170 ud af 2711). Der er stor variation i antallet af dateringer fra hvert grundvandsmagasin fra 1 datering per grundvandsmagasin (det hyppigste) til 126 dateringer per grundvandsmagasin.

Til trods for, at der er begrænsede muligheder for direkte at sammenligne modelresultater med måledata, er der flere muligheder for at evaluere det overordnede modelkoncept, hvor måledata på flere måder kan komme i spil.

Syv beskrevne anbefalinger for evaluering af modelresultater og -opsætning med måledata er opsummeret i tabel 1. Disse er uddybet nærmere i kapitel 5.

**Table 1.** Opsummering af muligheder for evaluering af modelresultater og -opsætning med måledata. Data 1 er modelresultater, mens data 2 er måledata om nitrat i grundvandet.

Nr	Emne	Sammenligning		Niveau	Aktion	Betydning	
		Data 1	Data 2				
Evaluering af modelresultater	Fremtidige måledata	Kvælstofmodellens resultater om fremtidig påvirkning	Måledata	Nationalt	Repræsentativt måleprogram	Repræsentative fremtidige målinger	
		Kvælstofmodellens fladebelastning	Fluxmålinger	Udvalgte grundvandsmagasiner	Analyse af eksisterende data og indsamling af supplerende data	Modellens fladebelastning sammenlignes med måledata	
		Merpåvirkning i 2016 – 2018	Kvælstofmodellens resultater om kvælstofpåvirkning	Resultater fra tidligere national vurdering (Hansen & Larsen, 2016)	Nationalt	Ekstra kørsler med Kvælstofmodellen og analyse af eksisterende data	Overordnet vurdering af to metoder
		Historisk nitratudvaskning og nitratmåledata	Inputdata: nitratudvaskning fra 1990 – 2011 fra NLES4	Nitrat i iltet grundvand fra 1990 – 2011 fra GRUMO	Nationalt (muligvis også regionalt)	Analyse af eksisterende data	Vurdering af antagelse om ingen N-reduktion mellem rodzone og iltet grundvand
		Modellens transporttider og dateringer	Kvælstofmodellens resultater	Datering i grundvandsindtag	Nationalt og udvalgte områder	Analyse af eksisterende data	Overordnet vurdering
		Modellens redoxgrænse og nitratmåledata	Kvælstofmodellens redoxgrænse	Udbredelsen af nitrat baseret på grundvandsmålinger	Alle grundvandsmagasiner	Analyse af eksisterende data	Kalibrering af modellens redoxgrænse
		Nitratpåvirkning og hydrogeologi	Geografisk og rumlig udbredelse af nitrat i grundvandet vha. modellen	Geografisk og rumlig udbredelse af nitrat i grundvandet vha. måledata	Alle grundvandsmagasiner	Indsamling af supplerende data	Identifikation af behov for indsamling af supplerende data
Evaluering af modelopsætning		Geografisk og rumlig udbredelse af nitrat i grundvandet vha. modellen			Analyse af eksisterende data	Kalibrering af modellens hydrogeologiske lag med eksisterende geologiske data	
					Indsamling af supplerende data	Identifikation af behov for supplerende kortlægning Kan danne grundlag for fremtidig målrettet regulering	

### 3. Konceptuelle overvejelser

Dette kapitel beskriver konceptuelle overvejelser omkring repræsentativiteten af henholdsvis modelresultaterne fra Kvælstofmodellen, og målinger af nitratindholdet i grundvandet. Repræsentativiteten af resultater fra modellen og målingerne varierer på forskellig måde i både tid og rum. En konceptuel forståelse af dette er derfor fundamental for at kunne beskrive mulighederne for validering af modelresultater med måledata i næste kapitel.

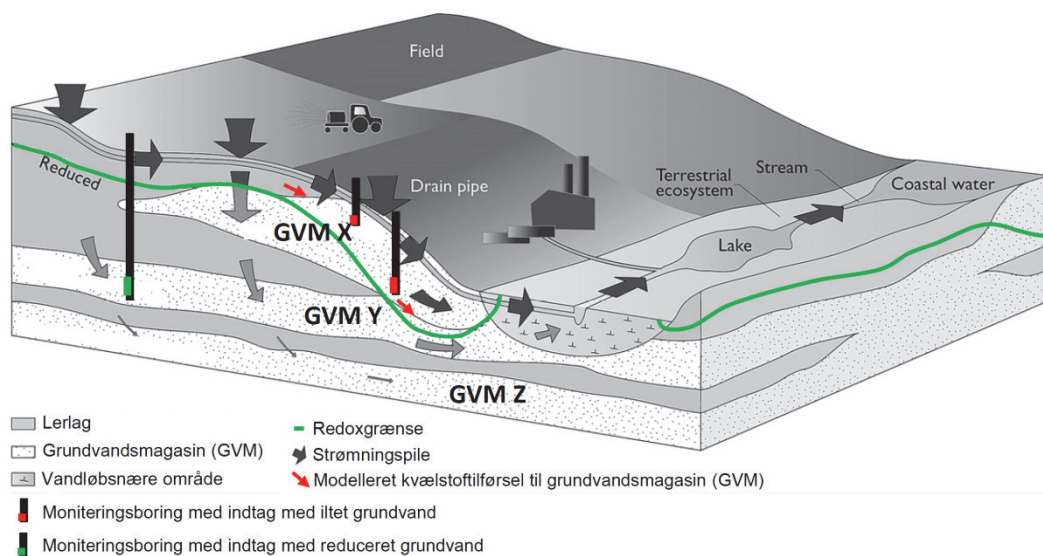
#### Sådan fortolkes målinger

En måling af nitratindholdet i en prøve fra et indtag i en grundvandsboring repræsenterer en punktmåling i rummet, defineret ved længden og dybden af indtaget og den geografiske placering af boringen (se boringer på figur 1), og kan statistisk set opfattes som en stikprøve. Målingerne i Grundvandsovervågningen (GRUMO) kan i høj grad betragtes som punktmålinger i forhold til kvælstofmodellens skala, da indtagene er forholdsvis korte ( $\approx 1$  m) og de oppumpede vandmængder små. Prøver fra indvindingsboringer kan overvejende betragtes som volumenprøver, da filtrene er forholdsvis lange (typisk  $> 6$  m). Jo flere steder der måles i et grundvandsmagasin, jo mere information fås der om den rumlige variation i nitratindholdet.

Nitratmålingen repræsenterer også en punktmåling i tiden. Jo oftere der måles, jo mere information fås om den tidslige variation, og jo længere tid der måles i det samme indtag, jo mere information kan der hentes omkring den tidslige udvikling af nitratindholdet. Fx er der mange data om den tidslige variation i nitratindholdet fra de indtag, som er placeret i det øvre grundvand i Landovervågningsoplandene (LOOP), og hvor der i godt 25 år er udtaget prøver ca. 6 gange om året. Både i overvågningsboringerne (GRUMO og LOOP) og i mange indvindingsboringer, som har været prøvetaget i lang tid, er der meget information om den tidslige udvikling i det danske grundvands nitratindhold.

Det er muligt at relatere nitratmålingen til grundvandets infiltrationstidspunkt, hvis grundvandet er blevet dateret. Aldersbestemmelsen af grundvandet muliggør nemlig, at prøvetagningstidspunktet kan omregnes til infiltrationstidspunkt.

Ofte knytter der sig også informationer om redoxtilstanden til en nitratmåling i et indtag i en boring. Det er vigtigt at kende redoxmiljøet, når nitratmålingen skal fortolkes. Nitratkoncentrationen i iltet grundvand (se røde indtag i boring i figur 1) er nemlig sammenlignelig med nitratudvaskningen fra rodzonen på grund af stabiliteten af nitrat under iltede forhold. Målinger af nitratindholdet i iltet grundvand kan direkte relateres til gødningstilførsel og landbrugsdrift ved hjælp af beregningen af grundvandets infiltrationstidspunkt fra dateringerne. Dermed kan målinger af nitrat i iltet grundvand bruges til at evaluere effekten af de forskellige miljøhandlingsplaner og virkemidler, som i løbet af de sidste ca. 30 år har haft til formål at reducere landbrugets nitratudvaskning.



**Figur 1.** Konceptuel forståelse af modellerings- og måledata. GVM X, Y og Z symboliserer henholdsvis overfladenære, regionale og dybe grundvandsmagasiner.

### Forudsætninger for modelberegninger

Kvælstofmodellen er videreudviklet i dette projekt, sådan at modellen er i stand til at foretage beregninger på ID15 niveau ( $\approx 15 \text{ km}^2$  hydrologiske oplande for overfladevand) af kvælstoftransport og omsætning fra rodzonen til de grundvandsforekomster, som er udpeget til vandområdeplan 2015-21(Troldborg m.fl., 2014). Der er i alt udpeget 402 grundvandsforekomster, som typisk består af mere end et grundvandsmagasin. Der er i alt udpeget 2711 terrænnære, regionale eller dybe grundvandsmagasiner. Det vil sige, at grundvandsforekomsterne kan indeholde flere grundvandsmagasiner, som geografisk kan overlappe hinanden.

Kvælstofmodellen er en grundvandsstrømningsmodel, der medregner kvælstoftransport og -omsætning på baggrund af en fastbeliggende redoxgrænse, hvor under nitrat ikke længere er til stede. Modellens redoxgrænse er fastlagt som den øverste beliggende redoxgrænse med baggrund i farvebeskrivelser af jordlagene i borer i et  $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  grid (Ernstsen & von Platen, 2014). I modellen antages det dermed, at der ikke finder nitratreduktion sted i den oxiderede zone, mens at alt nitrat momentant reduceres (fjernes) på redoxgrænsen. Redoxgrænsen anvendes til at opdele grundvandsforekomster i oxiderede og reducerede dele. Nitrattilførsel (masse) og nitratkoncentration til det oxiderede grundvand beregnes til overkant af både grundvandsmagasiner og -forekomster (se røde pile i figur 1).

Resultaterne af modelberegningerne er rapporteret i Troldborg m.fl. (2016). Modellen er kørt for flere scenarier, hvor der indgår forskellige virkemidler og dermed kompenserende tiltag, som kan reducere nitratudvaskningen til grundvandet som følge af mergødskningen fra og med 2016. Merbelastningen med kvælstof til grundvandsmagasiner og -forekomster kan fx beregnes som differencen mellem scenarie nul og scenarie 4 beskrevet herunder:



- Nul-scenariet: Scenariet bygger på historisk kvælstofudvaskning for årene 1990-2011. Klimanormaliserede data for år 2011 anvendes som inputdata for årene 2012 og frem til steady-state. Der justeres ikke for udtag af landbrugsareal.
- Scenarie 4 (Baseline samt lempelser): Scenariet bygger på den historiske kvælstofbelastning for årene 1990-2011. Klimanormaliserede data for år 2011 anvendes som inputdata for årene 2012-2021, hvor der kompenseres for udtag af landbrugsareal, data for alle baselineelementer samt N-normlempelse og udvidet undtagelse fra ændret jordbearbejdning for 2012-2021. Data for år 2021 anvendes for årene fra 2022 og frem til steady-state er opnået.

### **Sådan fortolkes modelresultater**

Beregninger af kvælstoftilførsel og -koncentration med Kvælstofmodellen er beregnet dynamisk med tidsskridt på et år. Modellen beregner middelværdier af N belastning i det tilstrømmende vand til overkant af de enkelte magasiner for de enkelte år. Infiltrationsårene "1990-2010" er beregnet på baggrund af registerdata med NLES, mens årene 2011 og frem til steady-state er på baggrund af klimanormaliserede data. Steady-state beskriver det tidspunkt i fremtiden, hvor der fra år til år ikke sker nogen ændring i den modellerede massestrømning til det enkelte magasin. Begrebet anvendes, fordi transporttiden fra rodzonen til grundvandsmagasiner er varierende og kan være lang, og fordi det enkelte magasin kan modtage grundvand med forskellig alder. Modelteknisk gentages det sidste år i scenariet i en meget lang periode. Overfladenære magasiner i sandede områder vil således i løbet af relativt få år efter 2021 kunne opnå steady-state, mens fx dybere magasiner under ler først vil opnå steady-state efter en længere periode.

### **Sådan kan målinger og modelresultater ses i sammenhæng**

Repræsentativiteten af målinger og resultater fra modellen varierer forskelligt i både tid og rum. Dette er opsummeret i tabel 2.

Målinger af nitrat i iltet grundvand repræsenterer nitratudvaskningen fra ca. 1940 til 2014 med størst datatæthed i midten af perioden (Hansen & Larsen, 2016). For alle scenarier er modellen kørt med historisk kvælstofudvaskning for årene 1990-2011 efterfulgt af klimanormaliserede scenariedata for 2011-2100. Der er således et mindre tidsligt overlap med målingerne svarende til godt 20 års nitratudvaskning. Dog er datatætheden forholdsvis lille for måledata i de seneste ca. 10 år.

Målinger af nitratkoncentrationen i flere indtag i et grundvandsmagasin repræsenterer punktmålinger af grundvandstilstanden på måletidspunktet af grundvand med forskellige aldre og dermed infiltrationstidspunkter, og skal statistisk opfattes som en stikprøve. Resultaterne af modellering af nitratbelastning og -koncentration i grundvandet repræsenterer årlige middelværdier til overkant af de oxiderede dele af magasinerne. Dette betyder, at det hverken tidsligt eller rumligt er muligt direkte at sammenligne målinger og modelleringer.

I Kvælstofmodellen er indbygget, at transporttiden fra rodzone til grundvandsmagasin varierer afhængig af de gennemstrømmede hydrogeologiske lag med forskellige transmissiviteter. I grundvandsovervågningen er fundet aldre af iltet grundvand op til ca. 50 år. Det vil sige, at den nitratkoncentration, vi måler i dag i iltet grundvand, i nogle tilfælde repræsenterer nitratudvaskningen, som den var for ca. 50 år siden. Modelresultaterne præsenterer

tilsvarende den tidlige udvikling i nitratbelastningen til den iltede del af magasinerne simulert på baggrund af den tidlige og rumlige fordeling af nitratudvaskningen fra rodzonen.

**Table 2.** Sammenligning af repræsentativitet af målinger og modelresultater af nitrat i iltet grundvand.

	<b>Måledata</b>	<b>Modelresultater</b>
<b>Repræsentativitet af nitratudvaskning fra rodzonen</b>	Ca. 1940 – 2014. Data kigger bagud i tid	1990 – 2011 Modelresultater peger fremad som prognose.
<b>Tidslig repræsentativitet</b>	Øjebliksbillede af grundvandstilstanden på måletidspunkt. Skal statistisk opfattes som en stikprøve.	Årlige middelværdier.
<b>Nitratkoncentrationens afhængighed af grundvandets alder</b>	Afhængig, det iltede grundvands alder varierer fra ca. 0 – 46 år (GRUMO data) baseret på datering af grundvandet	Afhængig, transporttiden varierer pga. forskellige transmissiviteter og tykkelser af de hydrogeologiske lag
<b>Rumlig repræsentativitet</b>	Målingen skal opfattes som en punktmåling, der ikke er ligeligt fordelt i forhold til grundvandsmagasiner	Fladedækkende modelleringer til overkant af iltede magasiner
<b>Spredning</b>	Større spredning i det målte nitratindhold, pga. stikprøve og punktmåling, som skyldes lokale variationer i nitratudvaskningen og de hydrogeologiske forhold	Mindre spredning i det modellerede nitratindhold, pga. midlingen og fladedækningen, som afspejler spredningen i nitratudvaskningen i inputdata og modellens hydrogeologiske opsætning

Målinger af nitrat i grundvandet repræsenterer en punktmåling, og prøvetagede indtag i borer er ikke ligeligt fordelt i forhold til grundvandsmagasiner og –forekomster, som illustreret i figur 1. På den anden side er modellering af nitrattilførsel og –koncentration til de iltede magasiner fladedækkende og repræsenterer middelværdier i forhold til grundvandsmagasiner og –forekomster.

Det forventes, at måledata vil have en større spredning end Kvælstofmodellens resultater. Det skyldes, at den faktiske lokale nitratudvaskning har større årstidsvariation og geografisk variation end den estimerede nitratudvaskning, som er input til Kvælstofmodellen. Det hænger også sammen med, at den faktiske lokale hydrogeologi, som er styrende for vandets strømningsveje, er mere kompleks end Kvælstofmodellens opsætninger.

Der er derfor samlet set en række begrænsninger i de vurderinger, der kan foretages ved en direkte sammenligning af målinger og modelresultater. I stedet skal målingerne og modelresultaterne ses i sammenhæng.

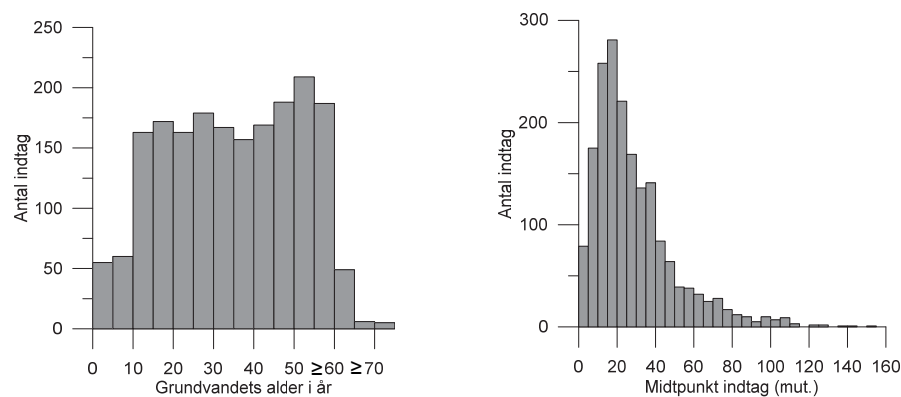
## 4. Eksisterende måledata

I dette kapitel gives et overblik over eksisterende måledata mht. til antallet af nitratmålinger og dateringer samt deres geografiske og rumlige fordeling i forhold til magasiner og grundvandsforekomster afgrænset i 2014 ved hjælp af DK-modellen (Trolborg m.fl., 2014).

### Målingernes oprindelse

Nitratmålinger af grundvandet kan stamme fra forskellige typer af boringer såsom overvågnings-, undersøgelses- og indvindingsboringer. De nedenfor viste analyser er udført på samtlige grundvandsprøver i GEUS' boringsdatabase (Jupiter) fra tidsperioden 2000 til 2013, og er udtrukket i efteråret 2014.

De undersøgte dateringer er enten CFC (chlorofluorocarbon) eller tritium-helium-analyser udført i perioden fra 1987 til 2013, og de hidrører fra udtræk fra Jupiter til GRUMO-rapporteringen i 2015. Dateringerne er fra overvågningsboringer (78 %), aktive indvindingsboringer (4 %) eller andre typer af boringer (18 %). Resultaterne indbefatter 1931 dateringer af grundvandet fra både iltede og reducerede redoxmiljøer, hvor midtpunkt af indtaget for prøvetagningen er fra få meter under terræn (mut.) til 158 mut. Resultaterne viser, at grundvandets infiltrationsår varierer fra 1940 til 2013 med grundvandsaldre op til 73 år (se figur 2). I nogle tilfælde (6 %) viser dateringerne, at grundvandets infiltrationsår er større end 1940 (detektionsgrænsen), hvilket resulterer i at grundvandets alder estimeres til større end ca. 60 eller 70 år.



**Figur 2.** Fordelingen af 1931 dateringer mht. til grundvandets alder og midtpunkt af indtag. Data er udtræk fra Jupiter til GRUMO rapportering 2015.

### Antal målinger i grundvandsforekomster

Der er i alt 297 ud af 402 (74 %) grundvandsforekomster med nitratanalyser og 112 ud af 402 (28 %) med dateringer (se tabel 3).

**Tabel 3.** Antal nitratanalyser og dateringer i 402 grundvandsforekomster.

	Grundvandsforekomster	
	Antal	Procent
Hele Danmark	402	100 %
Med nitratanalyser	297	74 %
Med dateringer	112	28 %

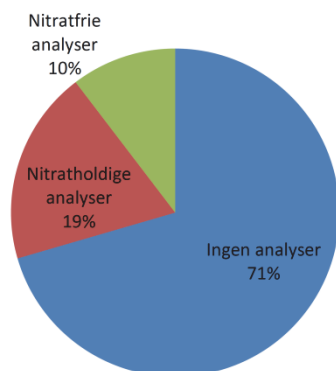
### Antal målinger i grundvandsmagasiner

I 29 % af de 2711 udpegede grundvandsmagasiner er der nitratanalyser, det vil sige, at i 71 % af magasinerne foreligger der ingen nitratanalyser efter 2000.(se tabel 4).

**Tabel 4.** Antal nitratanalyser og dateringer i 2711 grundvandsmagasiner.

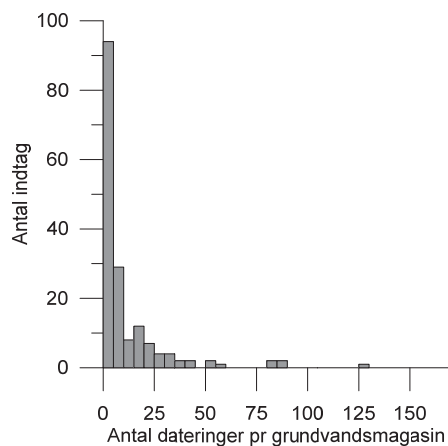
	Grundvandsmagasiner	
	Antal	Procent
Hele Danmark	2711	100 %
Med nitratanalyser	800	29 %
Med dateringer	170	6 %

Af grundvandsmagasinerne er 19 % nitratholdige (mindst et indtag har nitrat  $\geq 1$  mg/l) og 10 % er nitratfrie (alle indtag har nitrat  $< 1$  mg/l) (se figur 3).



**Figur 3.** Antallet af grundvandsmagasiner med nitratanalyser. Figuren viser andelen af magasiner med nitratanalyser efter år 2000. Med grønt er vist den andel af magasinerne, hvor alle vandprøverne var nitratfrie, dvs.  $< 1$  mg/l nitrat.

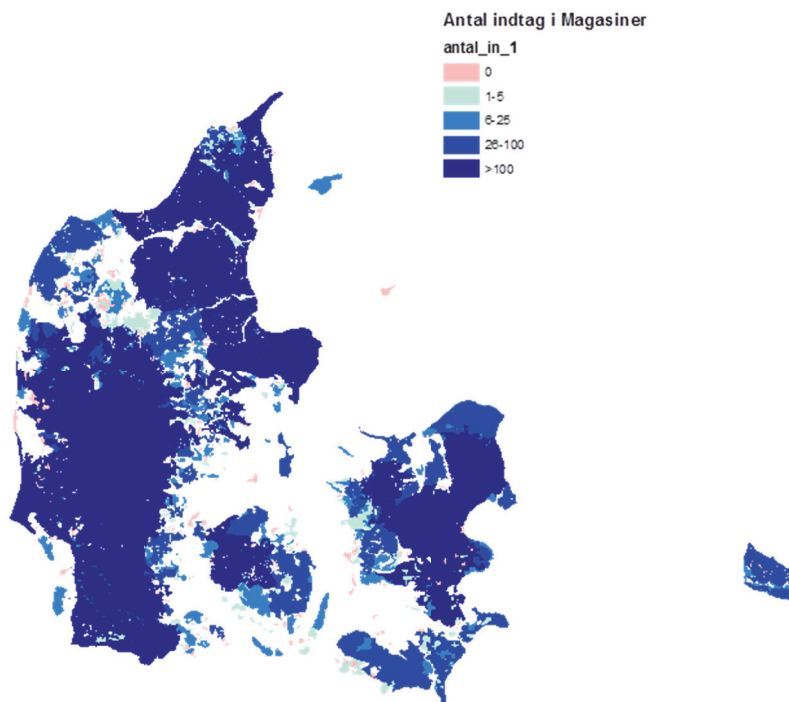
I 6 % af grundvandsmagasinerne er der udført dateringer (170 ud af 2711). Der er stor variation i antallet af dateringer, da antallet varierer fra 1 til 126 dateringer per grundvandsmagasin (se figur 4).



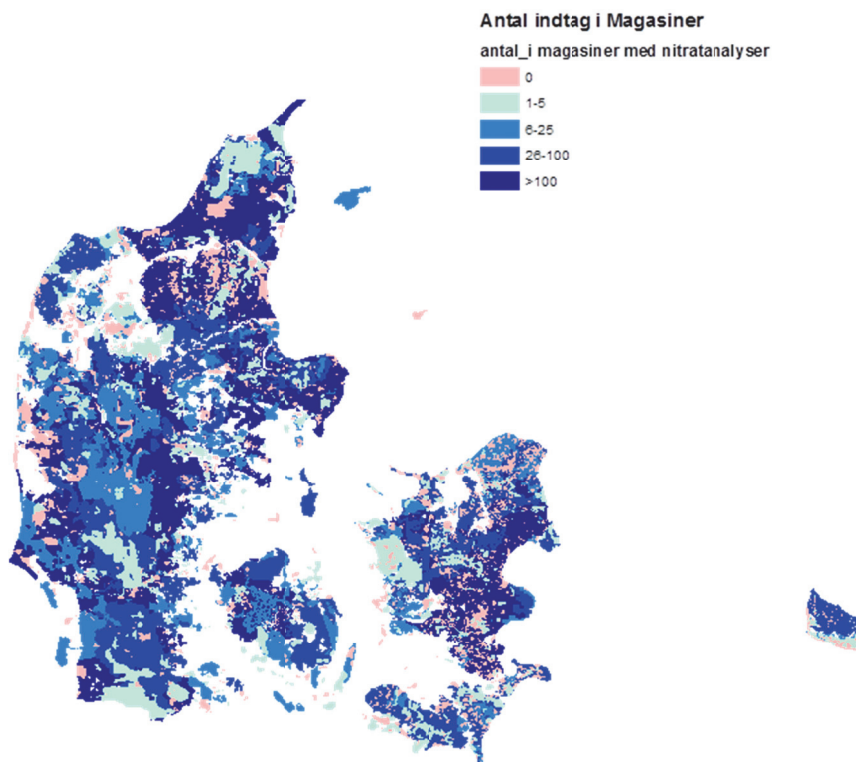
**Figur 4.** Fordelingen af antal indtag med dateringer i de enkelte grundvandsmagasiner. I alt 1931 dateringer er fordelt på 170 grundvandsmagasiner.

### Geografisk fordeling af målinger

Figur 5 og 6 viser den geografiske fordeling af antallet af indtag med mindst en nitratanalyse i de enkelte grundvandsmagasiner. I figur 5 er vist de grundvandsmagasiner med flest analyser øverst, mens det grundvandsmagasin med færrest analyser er vist øverst i figur 6, da grundvandsmagasinerne overlapper hinanden. Den store forskel mellem de to figurer indikerer en stor vertikal variation i antallet af indtag med nitratanalyser per magasin. De to figurer viser umiddelbart en god datadækning, trods det at der kun i 29 % af grundvandsmagasiner er foretaget nitratanalyser. Det skyldes, at magasinerne har meget varierende størrelse, hvor fx de ti største magasiner ligger i Jylland (Troldborg m.fl., 2016).

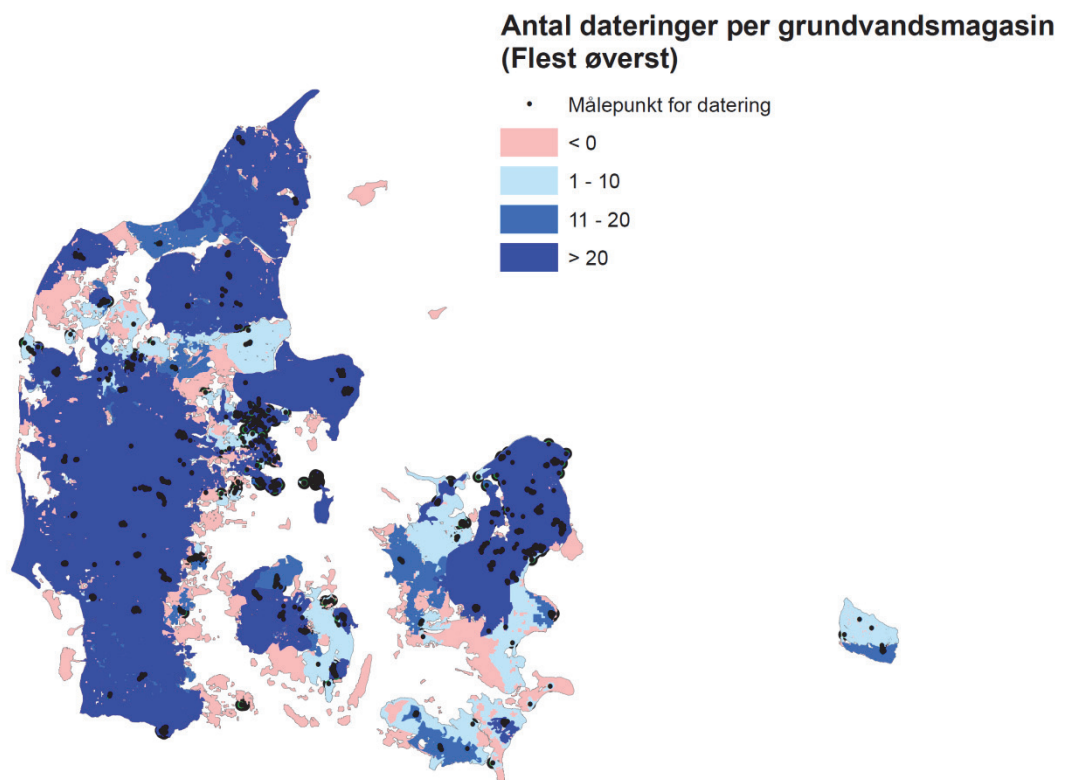


**Figur 5.** Den geografiske fordeling af antallet af indtag med *nitratanalyser* i hvert af de 2711 grundvandsmagasiner. Grundvandsmagasiner med *flest indtag med analyser er vist øverst*.

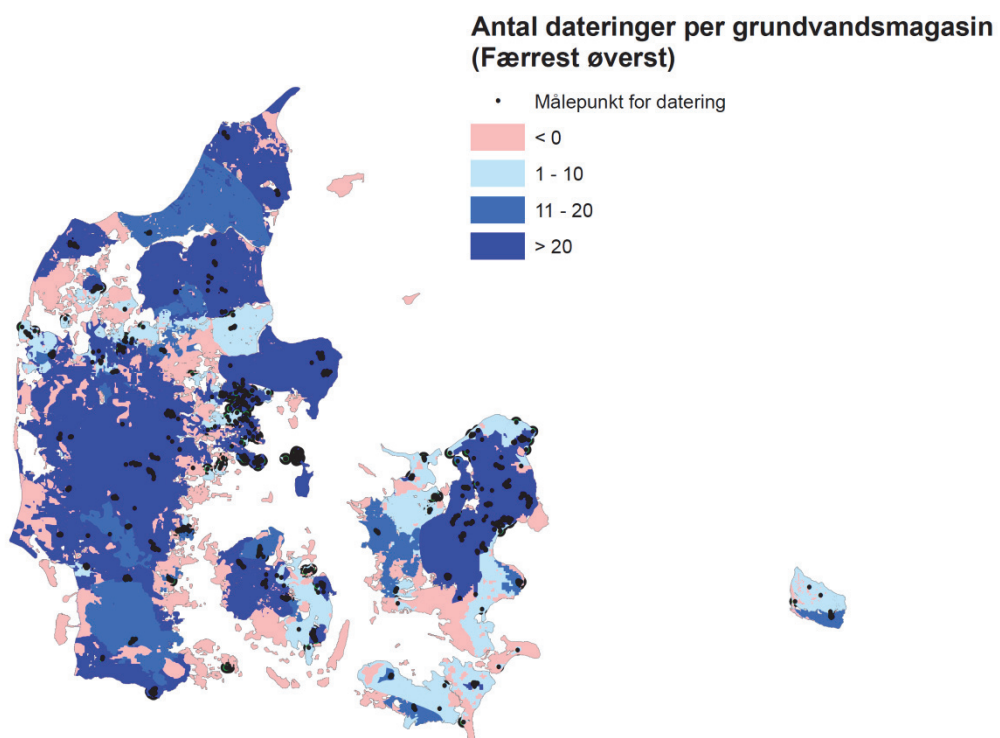


**Figur 6.** Den geografiske fordeling af antallet af indtag med *nitratanalyser* i de enkelte grundvandsmagasiner. Grundvandsmagasiner med *færrest indtag med analyser er vist øverst*.

Figur 7 og 8 viser den geografiske fordeling af antallet af dateringer i de enkelte grundvandsmagasiner. I figur 7 vises antallet af dateringer i det grundvandsmagasin, som har flest analyser øverst, mens det grundvandsmagasin med færrest analyser er vist øverst i figur 8, da grundvandsmagasinerne overlapper hinanden. Selvom figurerne umiddelbart viser en rimelig god geografisk dækning med dateringer, så viser placeringen af målepunkterne en meget ujævn dækning inden for de enkelte grundvandsmagasiner. Ligesom for nitrat viser de to figurer en relativ god datadækning, trods det at der kun i 6 % af grundvandsmagasiner findes dateringer af grundvandet. Det skyldes igen, at magasinerne har meget varierende størrelse.



**Figur 7.** Den geografiske fordeling af antallet af **dateringer** i hvert af de 2711 grundvandsmagasiner. Grundvandsmagasiner med **flest indtag med analyser er vist øverst**.



**Figur 8.** Den geografiske fordeling af antallet af **dateringer** i de enkelte grundvandsmagasiner. Grundvandsmagasiner med **færrest indtag med analyser er vist øverst**.

## 5. Muligheder for evaluering

Der er begrænsede muligheder for direkte at sammenligne modelresultater med måledata som beskrevet i kapitel 3, og vist med fordelingen af målinger beskrevet i kapitel 4. Indirekte er der dog flere muligheder for at evaluere modelresultaterne, herunder at evaluere det overordnede modelkoncept, hvor måledata på flere måder kan komme i spil.

I dette kapitel opdeles muligheder for evaluering ved hjælp af måledata i forhold til 1) evaluering af kvælstofmodellens slutresultater, og 2) evaluering af modellens hydrogeologiske og geokemiske opsætning.

### 5.1 Evaluering af modelresultater

#### **Fremtidige måledata (nr. 1)**

Den eneste direkte måde at evaluere landbrugets ændrede kvælstofregulering er retrospektivt på grund af grundvandets lange opholdstider. Det vil sige, at grundvandets udvikling i nitratholdet skal overvåges og måles de næste mange år, førend modellens resultater og prognoser kan verificeres med hensyn til merpåvirkningen af grundvandet med kvælstof. Det er derfor altafgørende, at grundvandsovervågningen er funderet på et repræsentativt geografisk og geologisk dækkende måleprogram.

Det vil dermed blive muligt at sammenligne målinger og modelleringer inden for samme tidsperiode. Sammenligningen bør foretages på et overordnet nationalt niveau på grund af forskelle i tidslig og rumlig repræsentativitet (se tabel 2).

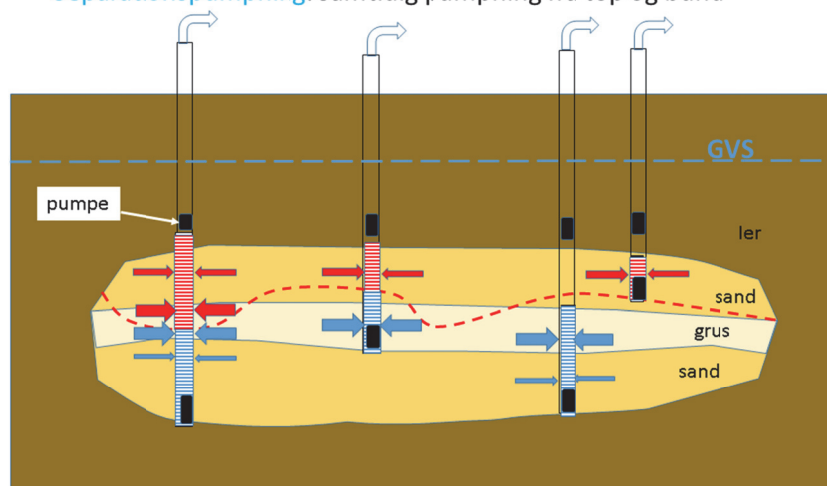
#### **Modellens fladebelastning (nr. 2)**

Modellens beregning af nitratbelastningen til magasinerne kan testes i udvalgte lokale områder på baggrund af detaljerede feltmålinger af nitratkoncentrationer og -fluxe i grundvandet. Der udvælges områder med både dybe markvandingsboringer med lange filtre, som går på tværs af redoxgrænsen, og overvågningsboringer med lange nitrattidsserier og aldersdatering. I markvandingsboringerne udtages der vandprøver på begge sider af redoxgrænsen og vandflowet bestemmes ved hjælp af separationspumpning, reverse flow test og konventionel flowlog.



Reverse Flow Test: Skiftevis pumpning fra top og bund

Separationspumpning: samtidig pumpning fra top og bund



Markvandsboringer med langt filter i grundvandsforekomst

**Figur 10.** Konceptuel model for test af modellens resultater med fluxmålinger. Niveaubestemt prøvetagning i markvandsboringer med lange filtre på tværs af redoxgrænsen.

Nitratbelastningen (fluxen) til magasinet bestemmes ved hjælp af måledata og sammenlignes med modellens resultater for tidsperioder med sammenlignelige data med hensyn til grundvandets transporttider og den historiske nitratudvaskning.

Det vurderes dermed at det er muligt at sammenligne modelresultaterne med måledata i udvalgte lokale områder, hvor der allerede findes egnede markvandsboringer og grundvandsovervågningsboringer. I de eksisterende markvandsboringer skal der udføres detaljerede niveaubestemte målinger af nitratkoncentrationer, flowmålinger og evt. aldersbestemmelse af grundvandet.

### Merpåvirkningen i 2016 – 2017 (nr. 3)

GEUS har tidligere foretaget en overordnet national vurdering af betydningen af udfasningen af reduktionen af kvælstofnormerne i 2016 – 2018 på grundvandets nitratindhold. I denne vurdering er der alene indregnet effekten af øget kvælstoffilførsel og at landbrugsarealet løbende reduceres, og der er ikke taget hensyn til baselineelementer eller andre kompenserende indsatser.

Vurderingen byggede på en fremskrivning af nitratindholdet i iltet grundvand baseret på lineær regression mellem den årlige kvælstoffilførsel til dansk landbrug og middelnitratindholdet i iltet grundvand. Metoden baserede sig på data fra Danmarks Statistik (landbrug) og målinger i grundvandsovervågningsboringer (nitrat og dateringer i grundvand) fra 1940 - 2012. Scenarie 1 i denne undersøgelse (bortfald af normreduktion med 2/3 i 2016 og 1/3 i 2017) viste, at nitratindholdet i iltet grundvand gradvis vil stige fra  $3,1 \pm 2,1$  mg/l i 2016 til  $4,7 \pm 3,1$  mg/l i 2017 - 2018. Dette svarede til en stigning på 6 – 10 % i forhold til koncentrationsniveauet i iltet grundvand i 2010 – 2012 med en usikkerhed på 66 %. Når usikkerheden indregnes gav dette en stigning på 2 – 17 % (Hansen & Larsen, 2016).

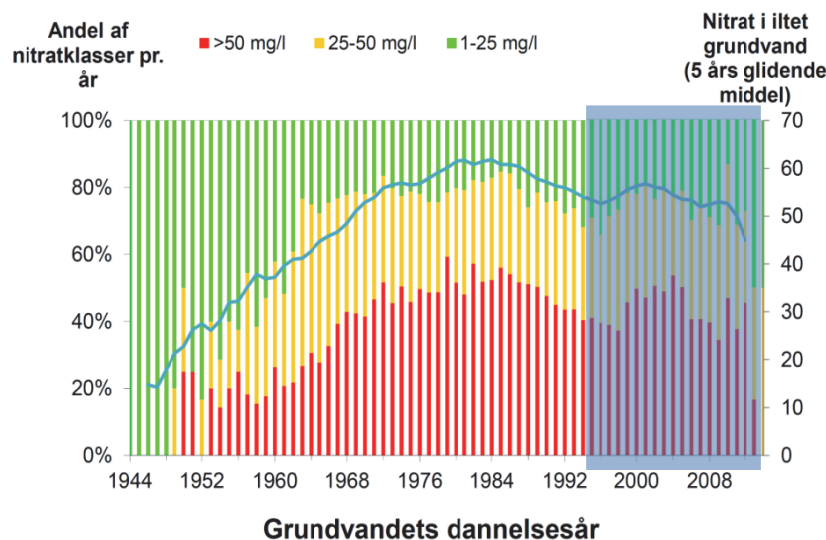
På et overordnet nationalt niveau er det muligt at sammenligne resultaterne fra de to forskellige metoder, nemlig nærværende opgørelse på magasinniveau med Kvælstofmodellen (Troldborg m.fl., 2016) for scenarie 0 og vurderingen i Hansen & Larsen (2016). I denne sammenligning indgår derfor ikke baselineelementer og kompenserende tiltag, og det vil derfor alene være den metodiske tilgang der kan sammenlignes.

## 5.2 Evaluering af modelopsætning

### Historisk nitratudvaskning og nitratmåledata (nr. 4)

Det er muligt at sammenligne modelresultaterne med måledata for den del af simuleringerne, hvor det tilstrømmende vand til det øverste magasin udelukkende er påvirket af infiltrationsårene "1990-2010". Det skyldes, at modelresultaterne herefter er baseret på forventede udvaskningsdata som er klimanormaliseret. Klimavariationerne mellem de enkelte år kan nemlig give anledning til store variationer i nitratudvaskningen fra rodzonen, som på grund af klimanormaliseringen ikke simuleres med modellen.

På et overordnet niveau (nationalt og muligvis også regionalt) er det muligt at sammenligne modelresultater om inputdata til Kvælstofmodellen fra 1990 – 2011 med målinger af nitrat i iltet dateret grundvand fra GRUMO fra samme periode. Figur 9 viser måledata, der kan sammenlignes med på det overordnede nationale niveau. Figuren viser et 5-års glidende middel af nitratindholdet i iltet grundvand baseret på 5506 nitratanalyser fra 340 indtag i GRUMO.



**Figur 9.** 5-års glidende middel af nitrat i iltet grundvand (blå linje). Andel af analyser i tre nitratklasser (> 50 mg/l, 25-50 mg/l og 1-25 mg/l) i forhold til grundvandets dannelsesår. Baseret på 5506 nitratanalyser fra 340 iltede daterede indtag i grundvandsovervågningen. Det markerede vindue angiver tidsrummet, hvor modelresultater, baseret på de anvendte input data til Kvælstofmodellen, kan sammenlignes med måledata. Modificeret efter Hansen & Larsen (2016).

Modelresultaterne bygger på input om nitratudvaskningen beregnet af DCA med NLES4, der er en statistisk empirisk udvaskningsmodel baseret på målte udvaskninger fra marker.

Kvælstofmodellen forudsætter, at der ikke sker nogen omdannelse af nitrat fra udvaskningen fra rodzonen til de iltede grundvandsmagasiner.

På det nationale niveau og evt. også regionalt niveau kan det undersøges, om inputdata til Kvælstofmodellen og målinger af nitrat i iltet grundvand ligger på et nogenlunde ens niveau i forhold til fordelingen af koncentrationer. Dernæst kan det undersøges, om det er rimeligt at antage, at der ikke sker nogen kvælstofreduktion fra rodzoneudvaskningen til iltet grundvand.

Der skal dog tages det forbehold, at inputdata om nitratudvaskningen er beregnet på blok-niveau for hele landet, mens målingerne er punktmålinger i borer. Udvasningsdata har derfor en meget større arealmæssig dækning end målingerne i grundvandet. Samtidig kan der forventes en større spredning i måledata end på modeldata.

#### **Modellens transporttider og dateringer (nr. 5)**

Det er muligt at sammenligne fordelingen af modellens transporttider med målinger af grundvandets alder baseret på dateringer. I figur 2, 4, 7 & 8 vises tilgængelige dateringer af grundvandets aldre. Med denne sammenligning vil det være muligt indirekte at vurdere modellens hydrogeologiske opsætning og transmissiviteter for udvalgte områder.

#### **Modellens redoxgrænse og nitratmåledata (nr. 6)**

Kvælstofmodellen har indbygget en fastbeliggende redoxgrænse, der er fastlagt som den øverste beliggende redoxgrænse med baggrund i farvebeskrivelser af jordlagene i borer. Det er muligt at vurdere, i hvilke grundvandsmagasiner modellen forudsiger oxiderede forhold i forhold til målinger af nitrat og redoxforhold i grundvandet. Dette kan gøres ved at gennemgå måledata i alle grundvandsmagasiner, og sammenstille disse med modelresultater.

Sikkerheden på modelresultaterne vil kunne øges ved at kalibrere redoxgrænsen med disse måledata. Desuden kan sammenligningen bruges til at identificere behov for indsamling af supplerende data i eksisterende borer eller ved etablering af nye borer.

#### **Nitratpåvirkning og hydrogeologi (nr. 7)**

Den geografiske og rumlige fordeling af nitratpåvirkningen af det danske grundvand er både et resultat af nitratudvaskningen og grundvandsmagasinerens sårbarhed over for nitrat. Denne sårbarhed afhænger af, hvor godt undergrundens geologiske lag beskytter grundvandet mod nitratforurening. Sårbarheden er styret af redoxforholdene og reduktionskapacitet i grundvandsmagasinet og i de overliggende dæklag.

Det er muligt overordnet at sammenligne den geografiske fordeling af nitratpåvirkningen af grundvandsmagasinerne fra modelberegningerne med måledata, der viser hvor grundvandsmagasinerne er sårbare over for nitratforurening.

Denne sammenligning kan give indikationer på, hvor modellens hydrogeologiske opsætning med placering af redoxgrænse er i overensstemmelse/uoverensstemmelse med måledata. På den baggrund kan modellens hydrogeologiske opsætning og redoxgrænse kalibreres ved hjælp af måledata.

I Kvælstofmodellen er ikke indbygget detailresultaterne fra grundvandskortlægningen i alle egne af landet. Kvælstofmodellen bygger nemlig på DK-modellen, som i hovedparten af Jylland og dele af Fyn ikke er opdateret med data fra grundvandskortlægningen efter amternes nedlæggelse. Det kan dermed vurderes, om modellen i visse områder af Danmark passer bedre end i andre områder, og om det har sammenhæng med omfanget af opdatering af DK-modellen med resultater fra grundvandskortlægningen. Det kan vurderes, om sikkerheden på modelresultaterne vil kunne øges ved at indbygge den geologiske og hydrogeologiske viden fra alle grundvandskortlægningsområderne. Sammenligningen kan derudover bruges til at identificere evt. behov for supplerende detaljeret kortlægning fx uden for Områder med Særlige Drikkevandsinteresser (OSD).

Kalibrering af Kvælstofmodellen på baggrund af kortlægning af hydrogeologien i alle egne af Danmark vil også kunne give synergieffekter i forhold til at danne grundlag for den fremtidige målrettede kvælstofregulering af landbruget. Dermed kan det sikres, at den nye regulering gøres så målrettet som muligt i forhold til det hydrogeologiske grundlag og en acceptabel usikkerhed.

## Litteraturliste

Ernstsen, V. og von Platen, F., 2014. Opdatering af det nationale redoxkort fra 2006. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse, rapport 2014/20.

Hansen, B. & Larsen, F., 2016. Faglig vurdering af nitratpåvirkningen i iltet grundvand ved ud-fasning af normreduktion for kvælstof i 2016-18. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2016/04, 22 p.

Troldborg, L., Sørensen, B.L., Kristensen, M. & Mielby, S., 2014. "Afgrensning af grundvandsforekomster - Tredje revision af grundvandsforekomster i Danmark". GEUS rapport 2014/58, København.

Troldborg, L., Børgesen, C.D., Thodsen, H. & van der Keur, P., 2016. National kvælstofmodel. Kvælstofpåvirkning af grundvand. ISBN: 978-87-7871-458-9, 77p.

De Nationale Geologiske Undersøgelser  
for Danmark og Grønland (GEUS)  
Geological Survey of Denmark and Greenland

ØsterVoldgade 10  
DK-1350 København K  
Danmark / Denmark

Telefon / Phone  
Fax  
E-post / E-mail  
Internet

+45 38 14 20 00  
+45 38 14 20 50  
geus@geus.dk  
www.geus.dk

