

Sammenstilling af koncepter for kortlægning af mark N-retention

Birgitte Hansen, Gitte Blicher-Mathiesen, Christen Duus Børgesen,
Anders Vest Christiansen, Rasmus Rumph Frederiksen, Bo Vangsø Iversen,
Rasmus Jacobsen, Julian Koch, Torben Sonnenborg, Hans Thodsen & Lars Trolborg

Sammenstilling af koncepter for kortlægning af mark N-retention

Birgitte Hansen, Gitte Blicher-Mathiesen, Christen Duus Børgesen,
Anders Vest Christiansen, Rasmus Rumph Frederiksen, Bo Vangsø Iversen,
Rasmus Jacobsen, Julian Koch, Torben Sonnenborg, Hans Thodsen & Lars Trolborg

Datablad:**Titel:**

Sammenstilling af koncepter for kortlægning af mark N-retention

Forfattere:

Birgitte Hansen, Gitte Blicher-Mathiesen, Christen Duus Børgesen, Anders Vest Christiansen, Rasmus Rumph Frederiksen, Bo Vangsø Iversen, Rasmus Jacobsen, Julian Koch, Torben Sonnenborg, Hans Thodsen, Henrik Tornbjerg og Lars Trolborg

Christen D. Børgesen og Bo Vangsø Iversen (AGRO, DCA) er ikke medforfattere af kap. 5.3, kap. 6, kap. 8 (undtaget 8.1.1 til 8.1.5 samt 8.1.7) og kap 9.

Gitte Blicher-Mathiesen, Henrik Tornbjerg og Hans Thodsen er ikke medforfattere på kapitel 6 og kapitel 8 (undtaget 8.1.1 til 8.1.5 samt 8.1.7).

Institutioner:

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS); Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, Aarhus Universitet: DCE-Nationalt Center for Miljø og Energy, DCA-Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug samt Institut for Geoscience

Publisher:

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Øster Voldgade 10, 1350 København K

URL:

<https://www.geus.dk/>

Udgivelsesdato:

December 2022

Redaktion afsluttet:

Maj 2022

Faglig kommentering:

GEUS	Lærke Thorling & Simon Stisen
DCE	Hans Estrup Andersen har kommenteret kap 4 og kap 7.
DCA	Peter Sørensen (har ikke kommenteret på kap 5.3, kap 6, kap 8 (undtaget 8.1.1 til 8.1.5 samt 8.1.7) og kap 9)

Kvalitetssikring:

GEUS	Torben Bach
DCE	Signe Jung-Madsen har kommenteret kap 4 og kap 7.
DCA	Lene Hegelund (har ikke kommenteret på kap. 5.3, kap. 6, kap. 8 (undtaget 8.1.1 til 8.1.5 samt 8.1.7) og kap. 9)

Sproglig korrektur:

Merete Binderup, GEUS

Ekstern kommentering:

Miljøstyrelsen. Kommentarer og svar findes [her](#):

Bedes citeret:

Hansen, B., Blicher-Mathiesen, G., Børgesen, C.D., Christiansen, A.V., Frederiksen, R.R., Iversen, B.V., Jacobsen, R., Koch, J., Sonnenborg, T., Sørensen, P., Thodsen, H., Tornbjerg, H., og Trolborg, L. Sammenstilling af koncepter for kortlægning af mark N-retention. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland. GEUS rapport 2022/19.

ISBN:

978-87-7871-572-2 (online version) & 978-87-7871-573-9 (trykt version)

Side antal:

70

Internet version:

Rapporten er tilgængelig i pdf-format: [doi:10.22008/gpub/34654](https://doi.org/10.22008/gpub/34654)

Indhold

1. Sammenfatning	7
2. Introduktion	13
3. Kvælstofkredsløbet og -retention	16
4. Opbygning af modellerne	18
4.1 Den Nationale Kvælstofmodel	18
4.1.1 Konceptet for Den Nationale Kvælstofmodel	18
4.1.2 N-udvaskningen	20
4.1.3 Beskrivelse af redox-forhold i undergrunden	21
4.1.4 Beskrivelse af dræn	22
4.1.5 Beregning af N-omsætning i Den Nationale Kvælstofmodel	23
4.2 N-MAP-konceptet	25
4.2.1 Det overordnede koncept	25
4.2.2 Trin 1 – Eksisterende viden	27
4.2.3 Trin 2 – Scanning af undergrunden	28
4.2.4 Trin 3 – Undersøgelse af centrale steder	28
4.2.5 Trin 4A – 3D stokastisk modellering af undergrundens strukturer	29
4.2.6 Trin 4B – 3D stokastisk modellering af kvælstofomsætning	30
4.2.7 Trin 4C – Kvælstofudvaskning fra rodzonen	31
4.2.8 Trin 4D – Modellering af kvælstoftransport og omsætning	32
4.2.9 Trin 5 – Analyse af virkemidler	33
5. Beskrivelse af usikkerhed	34
5.1 Generelt om usikkerhed	34
5.2 Den Nationale Kvælstofmodel	35
5.2.1 Kalibrering	35
5.2.2 Validering	36
5.2.3 Bias korrektion	38
5.2.4 Usikkerhed og nøjagtighed	39
5.3 N-MAP-konceptet	41
5.3.1 Forhåndsviden og falsificering	41
5.3.2 Usikkerhed og præcision	42
5.3.3 Sensitivitetsanalyse	43
6 Sammensmeltning af modelleringskoncepter	46
6.1 Overordnede betragtninger vedrørende sammensmeltning	46
6.2 Løsning 1 – Afstemning af grundvandsretentionen fra N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel	49
6.3 Løsning 2 – Stokastisk simulering i Den Nationale Kvælstofmodel	50
6.4 Løsning 3 – Stokastisk simulering i Den Nationale Kvælstofmodel og integration af data fra N-MAP	52

6.5 Løsning 4 – Detaljeret N-retention med ML i Den Nationale Kvælstofmodel	54
7. Numeriske analyser	49
8. Implementering af løsningsmodeller	50
8.1 Udviklingsbehov	50
8.1.1 N-udvaskning med NLES5	50
8.1.2 N-retention i overfladevandssystemet	51
8.1.3 Lavbund og ådale	52
8.1.4 Dræn	52
8.1.5 Tidsforsinkelse i N transport mellem rodzone og vandløb	52
8.1.6 N-omsætning i undergrunden	53
8.1.7 Opbygning af undergrunden under rodzonen	54
8.1.8 Udviklingsmuligheder med Den Nationale Kvælstofmodel	54
8.1.9 Udviklingsmuligheder med N-MAP-konceptet	55
8.2 Tekniske kompromiser for implementering på nationalt niveau	57
8.2.1 Implementering af N-MAP på ID15-oplandsniveau	57
8.2.2 Implementering af N-MAP-konceptet i Den Nationale Kvælstofmodel	60
8.3 Prioritering af ID15-oplande for implementering af N-MAP	61
8.4 Forslag til løsningsmodeller	66
9 Konklusion	67
10 Referencer	69

1. Sammenfatning

Denne rapport er udarbejdet i et samarbejde mellem GEUS, DCE, DCA og Geoscience på Aarhus Universitet som beskrevet i **kapitel 2**. Rapporten tager udgangspunkt i et oplæg udarbejdet af Peter Kaarup (Miljøstyrelsen) og Esben Auken (tidligere GEUS og medejer af Aarhus Geoinstru-ments) med det overordnede formål at finde løsninger til sammenstilling af koncepter for kortlægning af kvælstofretention (N-retention) på markniveau. N-retentionen er defineret som fjernelsen af kvælstof (N) (overvejende nitrat-N) der sker under transport af vand fra rodzonen på dyrket jord og byer/skove, natur og frem til kystvande. Der er blevet arbejdet med, hvordan teknologier, koncept og viden i N-MAP-konceptet fra rOPEN og MapField projekterne under Innovationsfonden kan integreres i "Den Nationale Kvælstofmodel". Den nationale kvælstofmodel er en sammensætning af modeller der beregner den nationale kvælstofudvaskning, transport og omsætning mellem opland (marker, skov, natur og bebyggelse) og frem til kysten/ havet. Den nationale model har været brugt til opstilling af det nationale N-retentionskort i 2015 og senest til opdatering af det nationale N-retentionskort (Højberg *et al.*, 2021a, b).

I rapporten er der fokus på at beskrive de koncepter, der hidtil er anvendt til kortlægning af N-retention fra bunden af rodzonen til kystvande. Først beskrives Den Nationale Kvælstofmodel, som hidtil er anvendt til N-retentionsberegning fra rodzone til kystvande i myndighedsopgaver. Dernæst beskrives N-MAP-konceptet, som er udviklet i de to Innovationsforskningsprojekter rOpen og MapField, der har fokus på undergrunden og kortlægning af N-retention i grundvandszonen.

N-retentionen beskriver andelen af nitrat, der udvaskes fra marken, og som ikke når overfladevandet, søer eller kystvande på grund af naturlig omsætning eller denitrifikation i forskellige dele af landskabet og undergrunden som beskrevet i **kapitel 3**. I et hydrologisk opland kan N-retention overordnet set både foregå i den umættede zone inkl. rodzonen, omkring dræn, i lavbundsområder, i ådale, i vandløb og søer samt i grundvandszonen.

Grundvandets N-retention er styret af vandets strømningsveje og af om nitraten omsættes undervejs. Det har fx stor betydning om marker er drænet eller grøftet, eller om alt vand fra rodzonen strømmer ned til grundvandet, hvor nitraten potentielt kan omsættes inden vandet når frem til vandløbet. En lille N-retention i grundvandet kan forekomme: 1) når vandet fra rodzonen overvejende strømmer direkte via dræn og grøfter til vandløbet, hvor kvælstof kun i begrænset omfang bliver omsat eller 2) når vandet fra rodzonen strømmer til vandløbet via den nitratholdige grundvandszone med lille omsætning af kvælstof. Derimod kan en høj N-retention i grundvandet forekomme når vandet fra rodzonen strømmer igennem den iltfrie reducerende grundvandszone, hvor nitraten omsættes og herfra via den nitrutfrie grundvandszone til vandløbet.

Hvis jord- eller drænvand ledes gennem vådområder, lavbunds- eller minivådområder øges nitratomsætningen, fordi der her opstår iltfrie forhold og da der i disse områder også findes aflej-

ringer med nitratreducerende stoffer som organisk stof, pyrit eller andre reducerende forbindelser. Nitrat omsættes ikke kun i de iltfrie nitratreducerende lag i undergrunden. Der sker også en omsætning af nitrat under vandets transport i vandløb, søer og som før nævnt i vådområder, lavbund og minivådområder. Ikke alt kvælstof og nitrat i vandløbene stammer fra de dyrkede marker eller den øvrige natur. Der ledes også kvælstof ud til vandløb fra spredt bebyggelse i det åbne land, via rensningsanlæg og fra dambrug og industri.

I **kapitel 4** beskrives opbygningen af Den Nationale Kvælstofmodel og N-MAP-konceptet med det formål at skabe et fælles vidensgrundlag. Den Nationale Kvælstofmodel beskriver N-udvaskningen fra rodzonen samt transport og omsætning frem til de marine områder ved at tre modeller kobles sammen: 1) NLESS5 modellen til beregning af N-udvaskningen fra rodzonen, 2) DK-modellen til beregning af vandstrømningen i det hydrologiske opland og N-omsætningen i grundvandszonen herunder øvre grundvandszone og omkring dræn og 3) overfladevandmodeller til beregning af N-omsætning i vandløb, søer og vådområder. En detaljeret beskrivelse af Den Nationale Kvælstofmodel findes i Højberg *et al.* (2021b). Modellen er kalibreret mod observationsdata om N-transport ved vandløbsstationer og gridcellerne er 500 m × 500 m både for N-udvaskningen og modelleringen i DK-modellen. I modellen beskrives omsætningen af kvælstof i undergrunden som momentan, når grundvandet passerer en redoxgrænse. Der er anvendt to redox-grænser for omsætning af kvælstof, dels en landsdækkende øvre redoxgrænse, udviklet i forskningsprojektet TREnds (www.trends.nitrat.dk) baseret på Machine Learning (ML) med metoden "Random Forest" (Koch *et al.*, 2019a,b), dels en lokalt udbredt helt terrænnær reduceret zone i områder, hvor lavbundsarealerne med højt organisk indhold udgør mere end 25 % af DK-modellens grid. I Den Nationale Kvælstofmodel er der opgjort, hvor stor en andel af det infiltrerende vand, der ledes direkte via dræn til overfladevandet baseret på vandbalancer i DK-modellen. Der er beregnet en drænfraction til at beskrive vandtransport fra rodzonen til drænene. Usikkerheden i Den Nationale Kvælstofmodel er opgjort ud fra nøjagtigheden af modellen for de ID15oplande der indgår i valideringsdatasættet, hvor modellerne bliver valideret op mod målt N-transport i vandløbssystemet.

I forskningsprojekterne rOPEN og MapField (<http://mapfield.dk/>) under Innovationsfonden er der udviklet et koncept (kaldet N-MAP) og teknologier til bestemmelse af N-retentionskort for grundvandszonen på markniveau, hvor visionen har været at kan indgå i en mere målrettet regulering af kvælstofanvendelsen i landbruget. rOPEN projektet blev afsluttet i 2020, mens MapField projektet forventes afsluttet i 2022, hvorfor der stadig foregår udvikling i projektet. N-MAP er indtil videre udviklet til at bestemme N-retentionen i grundvandszonen. Den bygger på en detaljeret beskrivelse af undergrundens hydrogeologiske forhold og af redox-strukturer med indbygning af N-omsætningsrater, der er styrende for henholdsvis vandets bevægelse igennem jordlagene og for omsætning af nitrat i undergrunden. Konceptet er baseret på indsamling af store datamængder om geofysiske, geologiske og geokemiske forhold, som giver væsentlige input til at forstå transporten og omsætningen af nitrat i undergrunden i et ID15-opland (hydrologisk opland på ca. 15 km²). På dette grundlag kan der fremstilles kort over N-retentionen i grundvandszonen på markniveau med anvendelse af gridceller for hver 25 m × 25 m. De beregnede

N-retentionskort kan danne grundlag for en målrettet kvælstofregulering på markerne, hvor indsatser og valg af virkemidler kan tilpasses den rumlige variation i N-retentionen i grundvand, som inkluderer strømningen gennem dræn. Herved vil det være muligt at målrette virkemidler, der reducerer nitratudvaskningen og dermed N-transporten i vandløbene ved fx at placere efterafgrøder på de marker eller områder, hvor N-retentionen er lav.

Centralt i N-MAP står, at konceptet ikke bygger på én deterministisk modelopbygning af systemet, men derimod af i alt 500 lige sandsynlige sæt af 3-D modelstrukturer der beskriver undergrunden mht. hydrostratigrafi og N-omsætning. Modellerne er baseret på geofysiske data, borningsinformation og kemiske laboratorieanalyser. Disse realisationer af 3-D modelstrukturer er modeller af undergrunden, hvor de indgående parametre varieres over deres forventede udfaldsrum. Modellernes inputparametre er alle data, der bruges til at beskrive systemet fx perkolation, nitratudvaskning, undergrundens struktur og redoxforhold, hydraulisk ledningsevne og N-omsætningsrater. Når de indgående modelparametre beskrives med relevante variationer for værdierne, vil de 500 modelrealisationer således alle være lige sandsynlige. Variationen i N-retentionen i grundvandet mellem disse modelrealisationer vil derfor afspejle usikkerheden af N-retentionen (præcisionen af modelprædiktionen). Præcisionen er alene et udtryk for variationen i modelberegnet N-retention mellem de 500 modelrealisationer, da der ikke er foretaget en kalibrering/korrektion imod målte værdier i vandløb (flow og N-koncentration). Endelig er variationer på perkolation og N-udvaskning kun inkluderet som estimerede rumlige gennemsnit, da der ikke forelå rumligt distribuerede variationer. Præcisionen er derfor sandsynligvis underestimeret.

Dræning i N-MAP er blevet simuleret, hvis den modellerede grundvandsstand står højere end den dybde drænene ligger i. Der er derfor indtil videre ikke indbygget en drænfraction i N-MAP til at beskrive mængden af vandtransport fra rodzonen til drænene, som i Den Nationale Kvælstofmodel. I N-MAP-konceptet kalibreres modellerne ikke ved hjælp af målinger af kvælstof i overfladevandet eller grundvandet, men bygger på at antagelserne i modelopbygningen kan prædiktere N-retentionen mellem nitratudvaskningen fra rodzonen og overfladevandssystemet.

De udviklede N-retentionskort med N-MAP-konceptet kan udvikles yderligere i forhold til beskrivelse af vand- og kvælstofstrømningen gennem dræn og ved at inkludere usikkerhed på perkolationen og N-udvaskningen.

Rapportens **kapitel 5** omhandler begrebet usikkerhed. Det beskrives, hvordan usikkerhed håndteres i Den Nationale Kvælstofmodel og i N-MAP med det formål at beskrive forskelle og evt. lave sammenligninger. Usikkerhed kan beregnes på forskellig vis afhængig af den valgte metode og de inkluderede data. Usikkerhed kan beskrives med begreberne præcision og nøjagtighed. Præcisionen angiver fx hvor godt en række lige sandsynlige modelresultater kan ramme det samme resultat. Præcisionen er med andre ord den variation, man har på sine resultater, når man sammenligner resultaterne indbyrdes, og er ikke et mål for, hvor tæt et modelresultat ligger på en observation som fx N-transport i vandløb. Overordnet har N-MAP-konceptet fokus på præcision af N-retentionen i grundvandet inden for et ID15-opland. Derimod har Den Nationale

Kvælstofmodel fokus på nøjagtighed af N-retentionen for hele oplandet, idet modelleringen af N-retentionen i hele oplandet giver mulighed for en evaluering imod observeret N-transport i vandløb.

En af udfordringerne med den beregnede N-retention for grundvandet med N-MAP er, at disse pt. ikke kan sammenlignes med målinger af N-transporten i udløbet fra ID15-oplandet som beskrevet i **kapitel 6**. Dette vil kræve at N-MAP-konceptet udvides til også at inkludere: 1) drænfractionering på gridcelleniveau, 2) N-retention i lavbundsområder og ådale, og 3) N-retention i overfladevandet. En løsning på den beskrevne udfordring vil enten være at udvide N-MAP med beregning af N-retention i alle dele af oplandet eller at korrigere grundvandsretentionen fra N-MAP med grundvandsretentionen fra Den Nationale Kvælstofmodel, der opgøres på ID15-oplandsniveau. Sidstnævnte vil dog kræve at strømningsveje via dræning forbedres i N-MAP-konceptet. Dermed kan grundvandsretentionen beregnet i N-MAP blive stationskorrigeret og i gennemsnit være repræsentativ for N-retentionen i det givne opland.

En anden løsning kan være at udbygge Den Nationale Kvælstofmodel gradvis med den stokastiske modelleringstilgang fra N-MAP-konceptet med hensyn til hydrostratigrafi, hydrologiske parametre, redox-grænser, N-omsætningsrater og N-udvaskning fra rodzonen. Herved kan udfaldsrummet af de stokastiske realisationer bruges til at bestemme spredning og middelværdi for N-retention på gridcelleniveau. Desuden kan udbygningen af Den Nationale Kvælstofmodel også omfatte det detaljerede datagrundlag fra N-MAP-kortlægningen i udvalgte oplande, fx hvor det kunne være en fordel med større detaljeringsgrad af undergrundens strukturer end det eksisterende datagrundlag i Den Nationale Kvælstofmodel kan levere. Til udvælgelse af disse oplande kan prioriteringsværktøjet fra MapField (Voutchkova *et al.* 2021) indgå.

I **kapitel 6** beskrives fire tekniske løsningsmodeller for at sammensmelte de to tilgange, fra N-MAP og Den Nationale Kvælstofmodel, til N-retentionskortlægning i grundvandszonen:

- **Løsning 1:** N-retentionen for grundvandet i oplande hvor N-MAP konceptet gennemføres og afstemmes med værdien fra Den Nationale Kvælstofmodel. Her vil der være 25 m gridceller for de udvalgte N-MAP-oplande og ID15-oplandsniveau i resten af landet.
- **Løsning 2:** Indbygning af stokastisk modellering af undergrundens strukturer i Den Nationale Kvælstofmodel på baggrund af erfaringen fra N-MAP. Her vil der være 500 m gridceller.
- **Løsning 3:** Videreudvikling af Løsning 2 med integration af N-MAP-dataindsamling i Den Nationale Kvælstofmodel. Her vil der være 100 m gridceller.
- **Løsning 4:** Videreudvikling af Løsning 3 med detaljeret N-retention med ML i Den Nationale Kvælstofmodel. Her vil der være 20 – 100 m gridceller.

Kapitel 7 skulle indeholde numeriske analyser ved hjælp af beregningsmetoder fra N-MAP, der skal understøtte en evt. sammensmeltning af N-MAP-konceptet og Den Nationale Kvælstofmodel. I dette projekt blev det valgt at undersøge fire problemstillinger i relation til N-retentionen: 1) Betydningen af redoxgrænsens beliggenhed, 2) Tilstedeværelsen af dræn, 3) Usikkerheden på NLES5-beregningen af N-udvaskningen fra rodzonen på forskellig skala og 4) Sammenligning af

målt og modelberegnet N-transport på deloplandsniveau. Disse analyser er endnu ikke færdigjorte og vil blive rapporteret senere i et fælles DCE, DCA og GEUS notat, hvor DCE er ansvarlig for leveringen.

Kapitel 8 omhandler løsningsmodeller for implementering af N-MAP-konceptet. Fundamentale udviklingsbehov for mere detaljeret N-regulering for specifikke emner som er essentielle for både at mindske usikkerheden i N-MAP-konceptet og i Den Nationale Kvælstofmodel beskrives i **kapitel 8.1**. Disse udviklingsbehov er relateret til bedre beskrivelse af: 1) N-udvaskningen med NLES5, 2) N-retention i overfladevandssystemet, 3) lavbund og ådale, 4) dræn, 5) N-omsætning i undergrunden og 6) opbygningen af undergrunden. Desuden beskrives specifikke udviklingsmuligheder for Den Nationale Kvælstofmodel og N-MAP-konceptet.

I **kapitel 8.2** beskrives omkostningerne ved implementering af N-MAP på oplandsniveau og der gives et overslag på 1.175 DKK per ha landbrugsareal for implementering af N-MAP's fem trin som er estimeret i MapField-projektet. Overslagene baserer sig på vurdering af omkostningerne på baggrund af forbrug af ressourcer i MapField, estimeret ud fra erfaringer fra de involverede forskningsinstitutioner. Ved afslutningen af MapField har ikke alle aktiviteter og teknologier nået det samme teknologiske modenhedsniveau i forhold til kommerialisering. Prisen på de geokemiske analyser er vurderet på baggrund af omkostningerne i det geokemiske laboratorium på GEUS. Derudover er prisen på beregning af N-udvaskningen sat relativt lavt. Der er beskrevet tre løsninger (A, B og C) for implementering af N-MAP i et ID15-opland. I løsning A implementeres N-MAP-konceptet gradvist med de fem trin som vist i Figur 7. I løsning B implementeres N-MAP i flere sammenhørende ID15-oplande i det samme store hydrologiske opland, hvor det vurderes, at der kan opnås en besparelse på selve den hydrologiske modellering. I løsning C implementeres N-MAP med en grovere kortlægning mht. geofysik og undersøgelsesboringer, og det vurderes, at prisen på dataindsamlingen herved kan nedbringes.

I **kapitel 8.2** gives også et overslag over prisen for sammensmeltning af N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel som beskrevet med løsning 1 – 4 i kapitel 6. I overslaget indgår ikke omkostningerne ved implementering af N-MAP-konceptet eller enkelte elementer i udvalgte oplande. Prisen for opdatering af Den Nationale Kvælstofmodel er vurderet til:

- Løsning 1 (afstemning af grundvandsretentionen fra N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel): 100 – 300.000 DKK per ID15 opland
- Løsning 2 (stokastisk modellering i Den Nationale Kvælstofmodel): 5 – 10 mio. DKK for national beregning excl. implementering af N-MAP
- Løsning 3 (integration af N-MAP-dataindsamling i den Nationale Kvælstofmodel) 20 mio. DKK for national beregning excl. implementering af N-MAP
- Løsning 4 (detaljeret N-retention med ML i Den Nationale Kvælstofmodel) 25 mio. DKK for national beregning excl. implementering af N-MAP

I **kapitel 8.3** vurderes det i hvilke oplande det er mest fordelagtigt at implementere N-MAP-konceptet eller dele af konceptet. Her tages et GIS-prioriteringsværktøj i brug, som er udviklet i

MapField. I prioriteringsværktøjet fra MapField tages der udgangspunkt i det udskudte indsatsbehov for kvælstof for N-reduktion til kystvande fra det gældende administrationsgrundlag fra Vandplan II. Prioriteringsværktøjet er udviklet til at rangordne ID15-oplande efter behov for implementering af N-MAP til målrettet N-regulering på markniveau og det er detaljeret beskrevet i Voutchkova *et al.* (2021). Prioriteringsværktøjet består af tre trin og er en hierarkisk sammensat indikator metode, hvor 5 korttemaer multipliceres. De valgte korttemaer er 1) geologisk kompleksitet, 2) redox kompleksitet, 3) N-retention i overfladevand fra Den Nationale Kvælstofmodel, 4) N-transport i dræn fra Den Nationale Kvælstofmodel og 5) udskudt N-reduktionskrav til kystvande fra Vandplan II. Dette resulterer i prioritering af 42 % (1.403 ud af 3.351) af ID15-oplandene, 49 % af landets areal (ca. 2,1 ud af ca. 4,3 mio. ha) og 50 % (ca. 1,3 ud af ca. 2,6 mio. ha) af alle marker. Det vil være muligt at opdatere analysen, når indsatsbehovet med hensyn til målrettet N-regulering kendes i Vandplan III.

I **kapitel 8.4** diskuteres hvordan løsningsmodeller, der fx kan frembringe landsdækkende retentionskort indenfor beløbsniveauer på henholdsvis 30, 60 og 120 mio. kr. fordelt over 3 år, kunne sammensættes som kombinationer af flere aktiviteter. På baggrund af analyserne i denne rapport anbefales det at løsningsmodellerne sammensættes på baggrund af en overordnet fordeling af ressourcer til følgende aktiviteter:

- Udvikling af ny viden, der kan nedbringe usikkerheden på N-retentionskortene. Dette inkluderer udviklingsbehov med N-LES, N-retention i overfladevandssystemet, lavbund og ådale, dræn, tidsforsinkelse, N-omsætning i undergrunden etc. (**kapitel 8.1**)
- Udvælgelse af et antal ID15-oplande hvor N-MAP eller dele af N-MAP-konceptet skal implementeres
- Sammensmeltning af N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel ved løsning 1, 2, 3 eller 4

Kapitel 9 indeholder konklusionen i rapporten.

2. Introduktion

Denne rapport udgør leverancen fra projektet med titlen "Sammenstilling af koncepter for kortlægning af N-retention for marker" som er udarbejdet for Miljøstyrelsen, og som er gennemført i perioden fra 1. september – 31. december 2021.

Projektet har taget afsæt i et oplæg fra Peter Kaarup (Miljøstyrelsen) og Esben Auken (tidligere GEUS og medejer af Aarhus Geoinstruments), hvor følgende formål blev beskrevet:

Med afsæt i de stigende krav til reduktion af kvælstoftab (N-tab)) fra landbrugsarealerne, er der et behov for metoder til estimering af N-retention i en mindre skala og gerne med større sikkerhed end det nationale retentionskort. Den nuværende regulering baserer sig på det nationale retentionskort beregnet første gang i 2015 og anden gang med forbedret datagrundlag og beregningsmetoder i 2020. Disse kort estimerer den gennemsnitlige N-retention i områder med en størrelse på omkring 15 km², såkaldte ID15 oplande. Siden 2015 er der i to forskningsprojekter (rOpen og Mapfield) udviklet teknologi og beregningsmetoder, der gør det muligt at komme ned på en væsentlig finere skala. MapField/rOpen-konceptet indeholder dog et væsentligt behov for indsamling af nye og supplerende data samt integreret kompleks modellering, der medfører ikke uvæsentlige omkostninger. Yderligere er der få landskabselementer, der ikke er medtaget i konceptet, ligesom overfladevandsretentionen ikke er medtaget i MapField/rOPEN-konceptet.

Det overordnede formål med dette projekt er at:

- *skabe overblik over mulighederne for at udvikle et koncept til sammensmeltning af de to tilgange til retentionskortlægning*
- *udarbejde anbefalinger med beskrivelse af fordele og ulemper ved sammensmeltning af de to tilgange for beregning af N-retention*
- *vurdere om en kortlægning med MapField/rOPEN-konceptet kan overføres til andre oplande af tilsvarende type*
- *undersøge i hvilke områder det nationale retentionskort giver tilstrækkeligt grundlag for regulering, og undersøge i hvilke områder, MapField/rOPEN-konceptet med fordel kan anvendes*
- *udføre analyser (beskrevet senere) med brug af de beregningsmetoder, der er udviklet i MapField/rOPEN-konceptet til at understøtte en evt. sammensmeltningen af de to tilgange til retentionskortlægning*
- *undersøge udfordringer på tid og økonomi og udarbejde anbefalinger for mulige optimering samt anbefalinger vedr. anvendelsen af konceptet i større testområder.*
- *afprøve anbefalinger i udvalgte testoplunde*

Disse undersøgelser skal baseres på data, der allerede er indsamlet i rOpen- og Mapfield-projekterne og projekterne om opdatering af Den Nationale Kvælstofmodel. Der vil således ikke være behov for yderligere tilvejebringelse af data, idet det forudsættes at afprøvning af anbefalingerne kan gennemføres i oplande, hvor de nødvendige data allerede er tilvejebragt.

I projektet skal der udvikles overordnede koncepter, og eksisterende teknologier og koncepter skal anvendes til numeriske simuleringer. På den baggrund udarbejdes der anbefalinger jf. formålet.

Projektet har ligeledes taget afsæt i følgende forventede resultater fra oplægget:

Ved brug af MapField/rOPEN-modelleringskonceptet er der behov for at undersøge en række forhold, der ikke er fuld kvantificeret. På den baggrund skal følgende undersøges ved brug af numerisk modellering:

- 1. Redoxgrænsens beliggenhed: Det skal undersøges om usikkerheden ved ikke at have detail kendskab til placeringen af redoxgrænsen og/eller omsætningsrater har væsentlig indflydelse på usikkerheden på retentionsestimatet.*
- 2. Tilstedeværelsen af dræn: Det skal undersøges om usikkerheden ved ikke at have detail kendskab for placering af dræn har væsentlig indflydelse på usikkerheden på retentionsestimatet og om de endelige retentionsestimer får systematisk bias.*
- 3. Retentionen i vandløb og søer: Denne retention skal inkluderes, således at retentionen til fjord kan beregnes.*
- 4. Retentionsberegninger skal kunne afstemmes til afstrømningsmålinger.*
- 5. Lavbundsjorde: Retentionen i lavbundsjorde bør inkluderes enten faktuel eller ved brug af bedste estimer.*
- 6. Usikkerheden på NLES-beregninger til rodzone på mindre skala: det skal undersøges hvilken betydning det har for den samlede usikkerhed.*

Der er et behov for, at det nationale retentionskort sammentænkes med de retentionskort, der beregnes i MapField/rOPEN-konceptet, og at de kan integreres "sømløst".

Omkostningerne ved udarbejdelsen af de langt mere detaljerede kort efter MapField/rOPEN-konceptet er en tilbagevendende problemstilling og der skal udarbejdes tekniske kompromiser, der yderligere nedbringer prisen per hektar. På baggrund af ovenstående undersøgelser skal der beskrives forskellige løsningsmodeller, der kan frembringe landsdækkende retentionskort indenfor beløbsniveauer på f.eks. 30 mio. kr. – 60 mio. kr. og 120 mio. kr., fordelt over 3 år. Fordele og ulemper ved de forskellige niveauer beskrives.

Projektet har haft følgende deltagere, som også fremgår af forfatterlisten til denne rapport:

Birgitte Hansen (projektleder)	GEUS
Lars Trolborg	GEUS
Torben Sonnenborg	GEUS
Julian Koch	GEUS
Rasmus Jakobsen	GEUS
Anders Vest Christiansen	Geoscience, AU og medejer af Aarhus Geoinstruments
Gitte Blicher-Mathiesen	Ecoscience, AU
Rasmus Rumph Frederiksen	Ecoscience, AU

Hans Thodsen	Ecoscience, AU
Henrik Tornbjerg	Ecoscience, AU
Christen Duus Børgesen	Agroøkologi, AU
Bo V. Iversen	Agroøkologi, AU

Til projektet har der været tilknyttet en følgegruppe bestående af:

Peter Kaarup	MST
Henriette Hossy	MST
Marie Buchardt	MST
Mikael Clausen	LBST
Tidligere GEUS og medejer af Aarhus Geoinstruments	

Der har været afholdt 3 følgegruppemøder, hvor projektgruppen har præsenteret status for projektet. Desuden er et første udkast til rapport fra d. 17. december 2021 kommenteret af MST.

Med udgangspunkt i de beskrevne formål og forventede resultater er arbejdet i projektet inddelt i følgende arbejdsplaner som til dels også afspejles i opdelingen i kapitler:

- Arbejdsplan 1: Projektledelse (ansvarlig Birgitte Hansen)
- Arbejdsplan 2: Vidensdeling (ansvarlig Christen Duus Børgesen)
- Arbejdsplan 3: Sammensmeltning af modelleringsresultater (ansvarlig Lars Troldborg)
- Arbejdsplan 4: Numeriske analyser (ansvarlig Gitte Blicher-Mathiesen)
- Arbejdsplan 5: Løsningsmodeller (ansvarlig Birgitte Hansen)

Der er projektdeltagere, der ikke har deltaget i enkelte kapitler og afsnit. DCA har ikke medvirket til kap. 5.3, kap. 6, kap. 8 (undtaget 8.1.1 til 8.1.5 samt 8.1.7) og kap 9. DCE har ikke medvirket til kapitel 6 og kapitel 8 (undtaget 8.1.1 til 8.1.5 samt 8.1.7).

3. Kvælstofkredsløbet og -retention

I dette kapitel beskrives helt overordnet kvælstofkredsløbet og N-retentionen i forskellige dele af vandmiljøet. Kapitlet er primært baseret på erfaringer fra Landovervågningen under NO-VANA.

Når vandindholdet i jorden er højere end markkapacitet, vil vandet strømme ud af rodzonen. Markkapacitet er defineret ved den maksimale mængde vand, som jorden kan holde mod tyngdekraften. Nedsivning vil især ske i vinterhalvåret, hvor nedbøren er større end fordampning af vand fra jord, planter og planterester. I jorden findes kvælstof som opløst og mobilt nitrat og når vand strømmer ud af rodzonen følger nitraten med. Der kan også være mindre mængder af opløst organisk kvælstof og ammonium i det vand, som forlader rodzonen. Vandet fra rodzonen har forskellige strømningsveje til vandløbet: i) en nedadgående afstrømning og horisontal strømning videre til vandløbet via grundvand, ii) en overfladenær afstrømning via dræn og grøfter, iii) en afstrømning hvor grundvand på lavereliggende arealer "trykkes op" til vandløbet og afstrømmer via dræn og grøfter eller iv) via direkte overfladeafstrømning.

Den del af vandet fra rodzonen, som strømmer til grundvandet, har som erfaret i Landovervågningen overordnet set forskellige strømningsmønstre på sand- og lerjord. På sandjord sker størstedelen af afstrømningen til vandløb via grundvand, mens det på lerjord er en langt mindre andel, fordi en stor del afstrømmer via dræn og grøfter (Hansen *et al.* 2019, Petersen *et al.* 2021).

Nitraten omsættes til frit kvælstof (N_2) på vej mod grundvandet i iltfrie jordlag med et højt vandindhold og især i det iltfrie nitratreducerende grundvand. Omsætningen af nitrat til frit kvælstof foregår ved redoxprocesser, hvor nitraten reduceres ved reaktion med organisk stof, pyrit, $Fe(II)$ eller andre reducerende forbindelser.

På sandjorde strømmer det meste af vandet til vandløbene via grundvandet. Her vil nitratinholdet i vandløbene typisk være lave, fordi nitrat er blevet omsat under vandets transport gennem iltfrie lag i undergrunden. På lerjorde strømmer en stor andel af rodzonens nitrat til vandløb via dræn og der vil kun være en meget beskeden eller ingen omsætning af nitrat via denne transportvej. Derfor er nitratkoncentrationen i vandløb typisk højere i oplande med lerjord og dræning end i sandjordsoplande med lang transportvej gennem undergrunden (Blicher-Mathiesen *et al.* 2021).

Grundvandets N-retention er styret af vandets strømningsveje og af om nitraten omsættes undervejs. Det har fx stor betydning, om marker er drænedede eller grøftede eller om vand fra rodzonen strømmer ned til grundvandet, hvor nitraten potentielt kan omsættes inden vandet når frem til vandløbet. En lav N-retention i grundvandet kan forekomme: 1) når vandet fra rodzonen strømmer til vandløbet direkte via dræn og grøfter, hvor kvælstof kun i begrænset omfang bliver omsat eller 2) når vandet fra rodzonen strømmer via den nitratholdige grundvandszone til vand-

løbet med lille omsætning af kvælstof. Derimod kan en høj N-retention i grundvandet forekomme når vandet fra rodzonen strømmer igennem den iltfrie reducerende grundvandszone hvor nitraten omsættes og herfra via den nitratfrie grundvandszone til vandløbet.

Hvis jord- eller drænvand ledes gennem vådområder, lavbunds- eller minivådområder øges nitratomsætningen, fordi der her opstår iltfrie forhold og fordi der findes aflejringer som indeholder organisk stof, pyrit eller andre reducerende forbindelser.

Nitrat omsættes ikke kun i de iltfrie, nitratreducerende lag i undergrunden. Der sker også en omsætning af kvælstof under vandets transport i vandløb, søer og som før nævnt i vådområder, lavbund og minivådområder. Ikke alt kvælstof og nitrat i vandløbene stammer fra de dyrkede marker eller den øvrige natur. Der ledes også kvælstof ud til vandløb fra spredt bebyggelse i det åbne land, via rensningsanlæg, regnvandsbetingede overløb og fra dambrug og industri.

4. Opbygning af modellerne

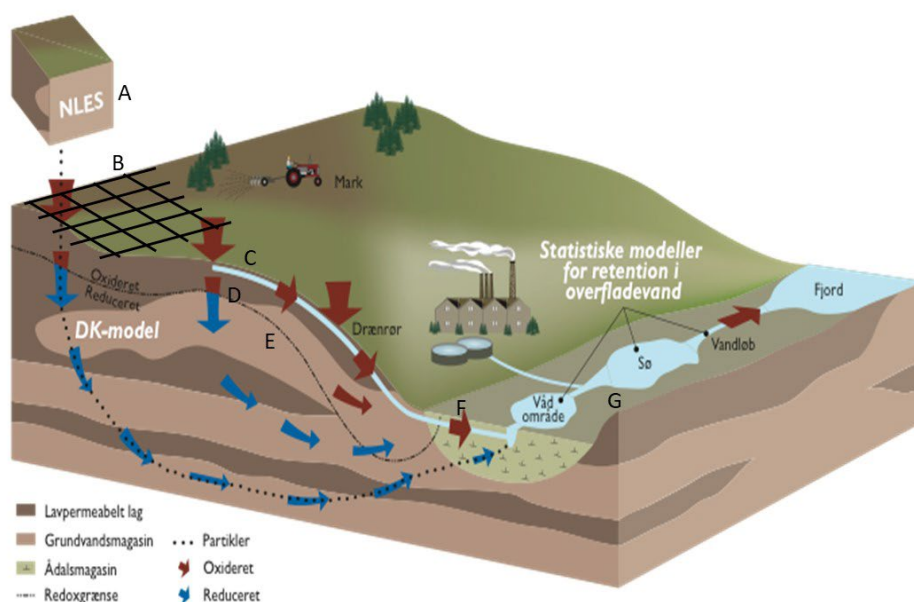
I dette kapitel beskrives kort opbygningen af dels Den Nationale Kvælstofmodel og N-MAP-konceptet, og der henvises til mere uddybende beskrivelser i rapporter og artikler. Formålet er overordnet set at opnå et fælles vidensgrundlag om de to modeller og koncepter til N-retentionskortlægning.

4.1 Den Nationale Kvælstofmodel

4.1.1 Konceptet for Den Nationale Kvælstofmodel

Den Nationale Kvælstofmodel beskriver kvælstof (N) -udvaskningen fra bunden af rodzonen samt transport og omsætning frem til de marine områder (Figur 1). Modellen er opbygget på basis af tre modeller, som kobles sammen:

- NLES5, der er en statistisk/empirisk model til beregning af årlig N-udvaskning fra rodzonen for dyrkede arealer.
- DK-model, der er den nationale vandressourcemodel, som beskriver vandstrømningen og nitratomsætningen i grundvandszonen.
- Modeller for overfladevand er statistiske modeller til beregning af vand- og N-transport samt kvælstofretentionen i hhv. vandløb, søer samt naturlige og reetablerede vådområder.



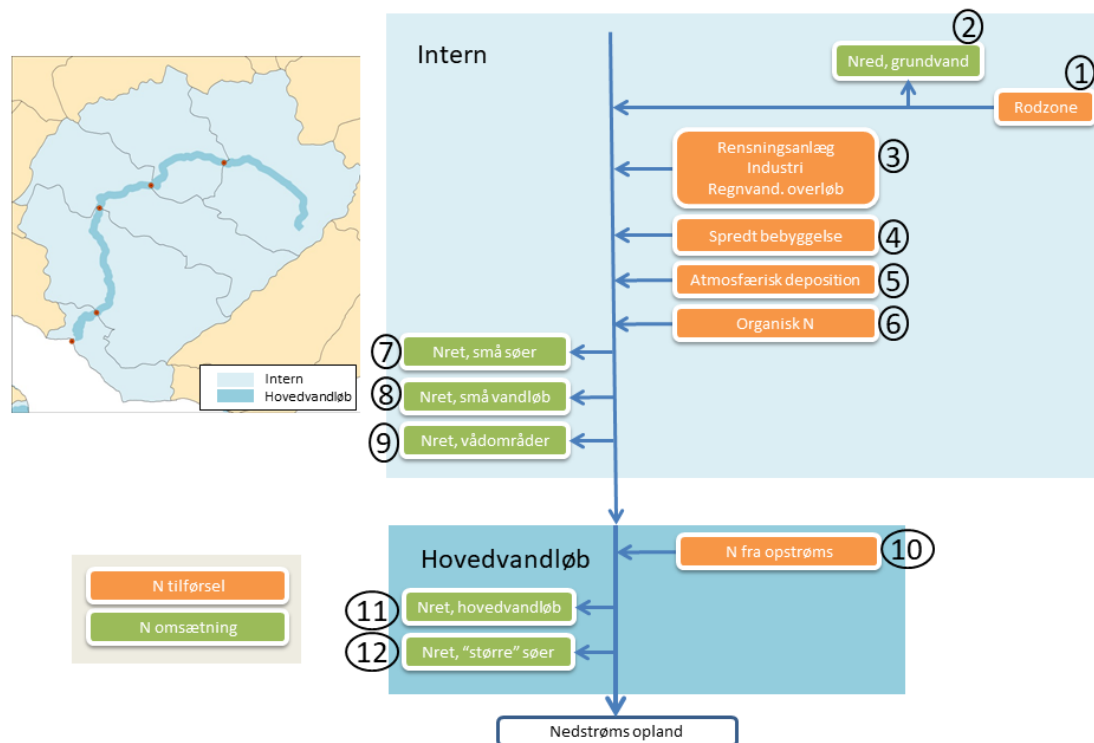
Figur 1. Sammenhænge mellem de tre modelsystemer (NLES, DK-modellen og overfladevand-modeller) som kobles sammen i Den Nationale Kvælstofmodel.

De tre modelsystemer er sammenkoblet ved en envejskobling, dvs. resultater fra én model giver input til den næste model. Koblingen af NLES5 og DK-modellens grundvandsretention sker i 500 m x 500 m grids, mens koblingen med overfladevandmodellerne sker på ID15-niveau, der således udgør beregningsenhederne i den samlede kvælstofmodel. ID15-niveauet er den mindste skala, hvorfra der er observationer af N-transporten i vandløb. Ved at vælge denne skala er det muligt at teste modelberegningerne mod faktiske målinger og på basis heraf beregne modellens nøjagtighed. Med NLES5 beregnes den samlede udvaskning fra rodzonen fra det dyrkede areal, hvortil der adderes typetal for udvaskning fra ikke dyrkede arealer.

Med DK-modellen (Stisen *et al.* 2019) beregnes N-omsætningen i grundvandszonen på basis af et 500 m grid (25 ha), der dækker det meste af landet. På Bornholm er der anvendt 250 meter grid-størrelser. Det antages, at omsætningen sker momentant ved øverste redox-grænse og resulterer i en fuldstændig omsætning ved passage over grænsen mellem de oxiderende og reducerende forhold i undergrunden. DK-modellen har indbygget hovedparten af de detailmodeller, der er udviklet som del af den nationale grundvandskortlægning. DK-modellens kalibrering er sket med fokus på en national konsistent detaljering og regionalisering af parametre for dræn og vegetation. For en nærmere beskrivelse af opsætning og kalibrering/validering af DK-modellen henvises til Stisen *et al.* (2019). I forhold til beskrivelsen af nitrat-omsætningen i grundvand kombineres strømningsvejene med en placering af redoxgrænsen, hvortil der er benyttet det nyeste nationale kort over redoxgrænsens placering. Kortet blev udviklet i forskningsprojektet TReNDS (www.trends.nitrat.dk). Der anvendes en separat håndtering af vand- og N-transport via dræn i forhold til den transport, der går forbi dræn og via det dybereliggende grundvand.

I overfladevandet sker der både en ekstra tilførsel af kvælstof fra punktkilder, atmosfærisk deposition og organiske kvælstofforbindelser og en retention af kvælstof ved sedimentation eller omsætning ved denitrifikation. Retentionen i overfladevandet beregnes med statistiske modeller for hhv. små vandløb og større vandløb, små søer og større søer samt naturlige og reetablerede vådområder. Retentionen i overfladevand beregnes både for den interne del af et ID15-opland og for den gennemstrømmende del som potentielt modtager vand og kvælstof fra opstrøms ID15-oplande.

De tre modelsystemer er koblet til en samlet oplandsmodel, hvor koblingen sker på deloplands-niveau igennem ID15-kortet. ID15-kortet er et polygontema med et gennemsnitligt opland på omkring 1500 ha (15 km²) svarende til ca. 60 beregningsenheder (gridceller) i DK-modellen med en størrelse på 500 meter x 500 meter (25 ha). ID15-oplandene er afgrænset topografisk af delvandsløbsstrækninger, vandløbsmålestationer og større søer. Inden for hvert ID15-opland beregnes den samlede N-tilførsel og -retention i hhv. grundvandszonen og overfladevandssystemet, samt en transport ned igennem overfladevandssystemet til kysten. Figur 2 viser flowdiagrammet for beregningerne indenfor et ID15-opland. Flowdiagrammet er yderligere beskrevet i nedenstående afsnit.



Figur 2. Illustration af beregning af tilførsel og retentionen af kvælstof (Nret) indenfor et ID15-opland i Den Nationale Kvælstofmodel. Tallene ud for hver proces refererer til beskrivelsen i Højberg *et al.*, 2021a (figur 15).

Den Nationale Kvælstofmodel er kalibreret mod total-kvælstof (TN)-stoftransporter beregnet ud fra daglige vandføringstidsserier baseret på målinger og TN-målinger indsamlet fra vandløbsstationer. Her er der anvendt data fra det nationale overvågningsprogram (NOVANA), suppleret med ekstra data indsamlet af de tidligere amter. I alt er der anvendt data fra 336 vandløbsstationer. Data er opdelt i to datasæt, hvor den ene del er benyttet til kalibrering af modellen, dvs. bestemmelse af værdier for modelparametrene, mens den anden del er anvendt til validering af modellen. Modellen har et månedligt tidsskridt, men kalibrering og test af modellen er sket på basis af årlige kvælstoftransporter.

4.1.2 N-udvaskningen

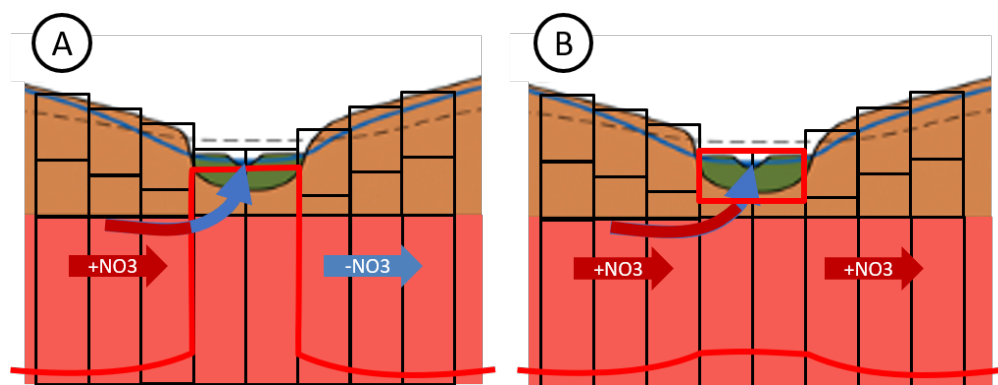
NLES5-udvaskningsmodellen (Børgesen *et al.*, 2019) aggregeret til 500 m gridceller er anvendt til modelberegninger af nitratudvaskningen fra rodzonen fra landbrugsarealer i Den Nationale Kvælstofmodel. For arealer, som ikke er landbrugsarealer, er der anvendt typetal for udvaskningen. En detaljeret gennemgang findes i Højberg *et al.* (2021a, 2021b).

4.1.3 Beskrivelse af redox-forhold i undergrunden

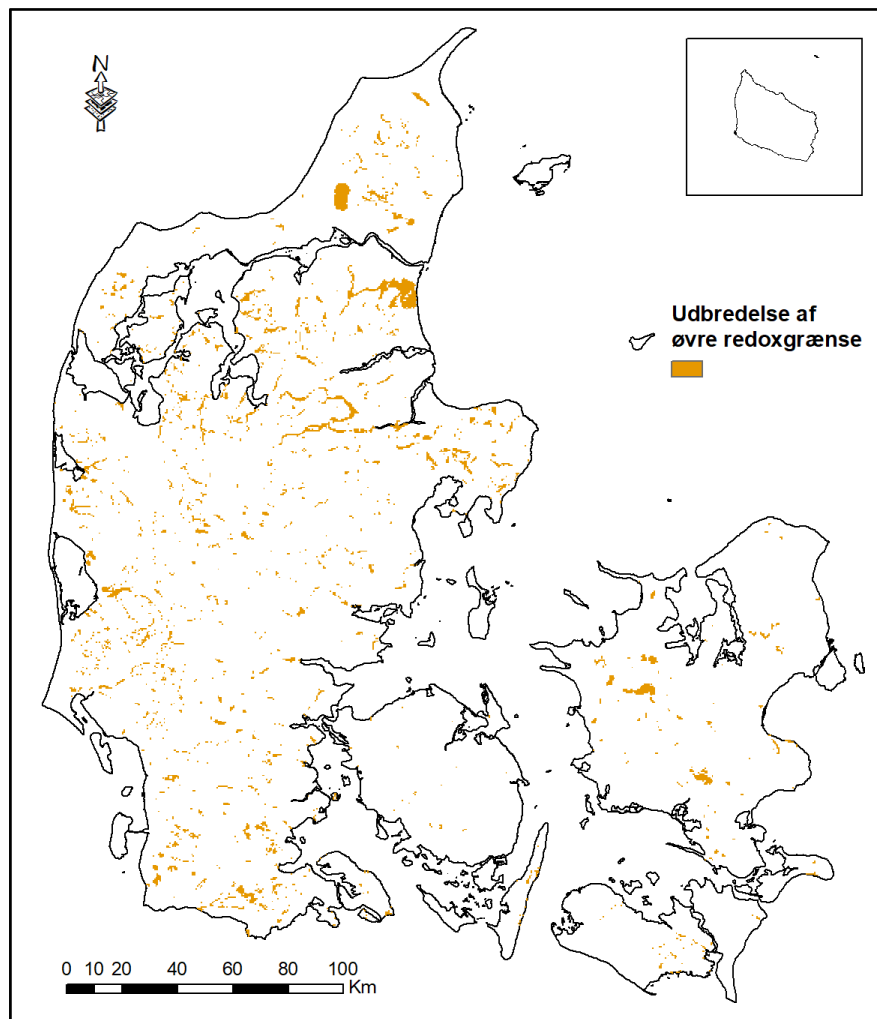
I den nationale kvælstofmodel anvendes to redox-grænser/zoner for omsætning af kvælstof. Den ene er en landsdækkende øvre redoxgrænse, udviklet i forskningsprojektet TReNDS (www.trends.nitrat.dk) baseret på Machine Learning (ML) med metoden "Random Forest" (Koch *et al.*, 2019a,b). Den anden er en lokalt udbredt helt terrænnær reduceret zone i områder, hvor lavbundsarealerne udgør mere end 25 % af DK-modellens grid. Det antages at N-omsætningen foregår momentant, så snart grundvandet når redox-grænserne, som beskrevet tidligere.

Random Forest-modellen er udviklet med 18 forklarende variable, der giver et estimat af dybden til den øverste redox-grænse baseret på farvebeskrivelser i borer. De 18 forklarende variable omfatter teksturen i overjorden, de geologiske forhold, variationer i terræn, informationer om grundvandsstanden og den geografiske placering.

Den lokalt udbredte helt terrænnære reducerede zone i områder med lavbundsarealer er indlagt fra terræn til 2 meter under terræn. I disse områder afviger modellen for den landsdækkende øvre grænse og zonen implementeres ved interpolation af de omkringliggende redoxforhold baseret på farvebeskrivelser i borer (Figur 3 & Figur 4). Konceptet vist i Figur 3.B giver mulighed for regional strømning af nitratholdigt grundvand under lavbundsarealer samtidigt med at kvælstof, der strømmer ud gennem lavbundsarealet, reduceres.



Figur 3. Koncept for den lokale overfladenære, reducerede zone i lavbundsområder, hvor rød linje indikerer redoxgrænser: A) Den landsdækkende øvre redox-grænse som gennemgående flade, B) Justering af redoxforholdene i lavbundsarealer, hvor der både findes en øvre reduceret zone og en dybereliggende landsdækkende øvre redox-grænse. I den justerede situation (B) kan der dermed ske transport af nitrat uden reduktion under lavbundsarealerne som en del af en regional transport.

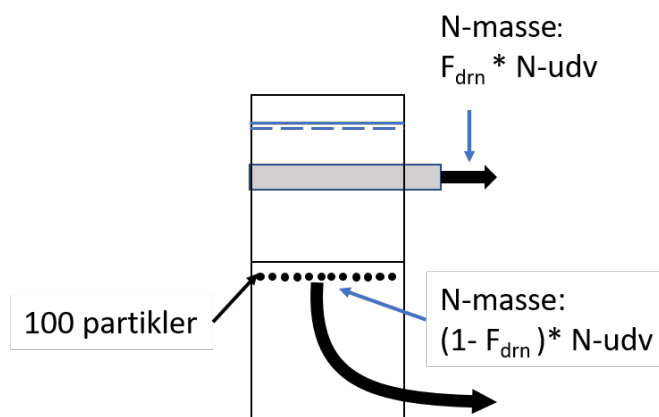


Figur 4. Udbredelsen af den landsdækkende øvre redox-grænse i lavbundsarealer hvor grænsen ligger 2 m under terræn. Kortet er anvendt i Den Nationale Kvælstofmodel.

4.1.4 Beskrivelse af dræn

I Den Nationale Kvælstofmodel er der opgjort, hvor stor en andel af det infiltrerende vand, der ledes direkte via dræn til overfladevandet. Opgørelse er baseret på vandbalance beregninger med DK-modellen. Dræningen beregnes dagligt på gridcelleniveau, og er afhængig af grundvandsstanden, dræningsniveauet og en dræningstidskonstant (enhed: l/s). Vandstanden beregnes dynamisk i modellen, mens drænniveau og -tidskonstant fastlægges på baggrund af data for jordarter, arealanvendelse, topografisk variation, tætheden af åbne drænkanaler, vandløbsnetværk i lavtliggende områder og skovområder (Stisen *et al.* 2019).

Dræningen er efterfølgende aggregeret til månedsmiddelværdier for perioden 1990-2018 for at regne med middelsklimatiske forhold, og dræandelen (F_{drn}) af perkolationen fra rodzonen udregnes. Transporten af nitrat via dræn fra hver celle er derefter beregnet som $F_{\text{drn}} \cdot \text{N-udvaskning fra rodzonen (N-udv)}$, som illustreret i Figur 5. Det antages, at der ikke sker kvælstofomsætning i selve drænet.



Figur 5. Beskrivelse af konceptet for transport af nitrat via dræn og grundvand i Den Nationale Kvælstofmodel. N-masse: massefluks af N; F_{drn} : Drænanandel af perkolation fra rodzonen; N-udv: N-udvaskning fra rodzonen. Indledningsvist placeres 100 partikler ensartet for hver beregningscelle.

4.1.5 Beregning af N-omsætning i Den Nationale Kvælstofmodel

Overfladevand

Overfladevandsretention i Den Nationale Kvælstofmodel er beskrevet i Højberg *et al.* (2021b). I modellen er der indlagt overfladevandmiljøer, hvori der foregår en kvælstoffjernelse. Det drejer sig om store og små vandløb, store og små søer samt reetablerede/konstruerede vådområder og naturlige vådområder. N-retention i overfladevandssystemer sker både "internt" i et ID15-opland i små søer, små vandløb, naturlige vådområder og konstruerede vådområder, hvor der fjernes kvælstof, der stammer fra det pågældende ID15-opland og for "hovedvandløbet" i større vandløb og større søer som potentielt modtager vand og kvælstof fra opstrøms liggende ID15-oplande. Den mest betydende N-fjernelse i overfladevandssystemet foregår i søer med lang opholdstid.

Grundvand

Grundvandsretention er beskrevet i Højberg *et al.* (2021b). Grundvandets transportveje beregnes med DK-modellen i 500m grid, der er opstillet i DHI's MIKE SHE/MIKE HYDRO model-systemet. Modelsystemet er et deterministisk fuldt distribueret og fysisk baseret system til simulering af ferskvandskredsløbet, herunder specielt grundvand/overfladevand interaktionen. DK-modellen inkluderer moduler til beskrivelse af 2D overfladisk afstrømning, strømning gennem den 1D umættede zone, 3D mættet grundvandsstrømning inklusiv drænafstrømning, og 1D vandstrømning i vandløbene.

Grundvandets strømningsveje er styret af de hydrogeologiske forhold. Disse forhold er bestemt af den geologiske model samt værdierne af de associerede hydrauliske parametre, der styrer vandets strømning i de enkelte geologiske enheder. Bestemmelse af de hydrauliske parametre er sket gennem kalibrering af DK-modellen mod observationer af trykniveauet i grundvandet (grundvandspotentialet) udtrukket fra boringsdatabasen Jupiter og vandløbsafstrømningsdata

fra overfladevandsdatabasen ODA. I den opdaterede kvælstofmodel er der anvendt den seneste kalibrerede version af DK-modellen (DK-model2019) (*Stisen et al., 2019*), og der er ikke foretaget ændringer forud for anvendelsen i Den Nationale Kvælstof Model.

Transporten af nitrat via grundvand beskrives med partikelbanesimulering ved indledningsvist at placere 100 partikler ensartet for hver beregningscelle i toppen af modellens andet beregningslag (lag 2). Partikelbane simuleringer er en modelteknisk ensartet metode til at beregne stoftransport i porøse medier. Den aktuelle nitratudvaskning kobles til de enkelte partikler sådan at summen af udvaskningen fordeles ligeligt mellem de 100 partikler. Hvis udvaskningen er 30 kg N/ha så repræsenterer hver partikel 0.3 kg nitrat N/ha svarende til 1/100 af de 30 kg N/ha. Dette svarer til 2 m under terræn, da det øverste beregningslag (lag 1) i DK-modellen har en konstant tykkelse på 2 m. Det sikres, at partiklerne er placeret i den vandmættede del af den enkelte celle. I tilfælde, hvor grundvandsstanden står mere end 2 m under terræn, vil partiklerne blive frigivet dybere. I områder med en opadrettet strømning vil nogle af partiklerne blive transporteret fra lag 2 til lag 1 og videre til dræn. Dette vil medføre et dobbelt drænbidrag. For at undgå dette frasorteres partikler, der transporteres direkte vertikalt op fra lag 2 til lag 1, dvs. uden nogen horisontal strømning. Der vil dog stadig kunne ske en transport via grundvandet, som længere nedstrøms transporteres op i lag 1 og drænes. Disse partikler transporteres videre via dræn til vandløb med information om, hvorvidt de er blevet reduceret undervejs.

Med den initiale placering af partikler antages det, at transportveje og -hastigheder er uafhængige af det faktiske tidspunkt for udvaskningen af kvælstof fra rodzonen. Grundvandets strømning er simuleret dynamisk med daglige tidsskridt for en 20 års periode, som herefter gentages, så den samlede beregningsperiode er 100 år. Herved sikres, at så godt som alle partikler tilført initialt enten er samlet op i et dræn, vandløb, grundvand eller har nået randen for modellen.

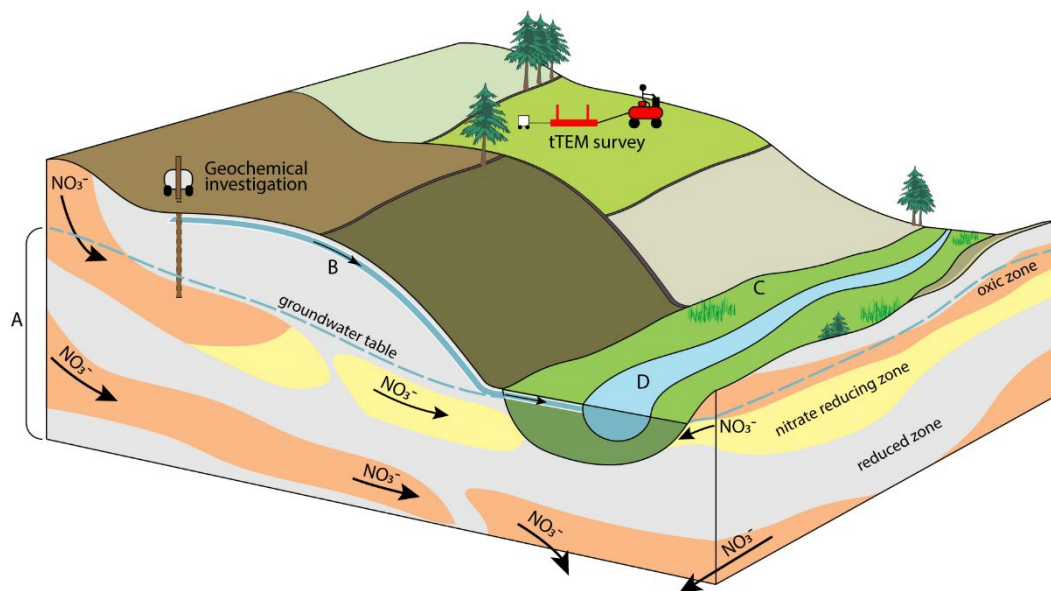
Ved hjælp af partikelbanerne gennem grundvandet beregnes en transportvej og -tid fra rodzonen til overfladevandet. Den samlede transport af nitrat til overfladevandssystemet i ID15-oplandet opgøres på månedsniveau ved at medtage månedsværdier for nitratudvaskningen og tage højde for andelen af nitratudvaskningen, der transporteres via dræn.

4.2 N-MAP-konceptet

4.2.1 Det overordnede koncept

I forskningsprojekterne rOPEN og MapField (<http://mapfield.dk/>) under Innovationsfonden er der udviklet et koncept (kaldet N-MAP) og teknologier til udarbejdelse af N-retentionskort for grundvandszonen på markniveau til brug i en mere målrettet regulering af kvælstofanvendelsen i landbruget. Disse to forskningsprojekter bygger videre på den viden, som er opnået i flere tidligere forskningsprojekter såsom NICA, HYGEM, DNMARK og TRENDS (Hansen *et al.* 2020). rOPEN-projektet blev afsluttet i 2020 og MapField-projektet forventes afsluttet i 2022, hvorfor der stadig foregår udvikling i projektet.

Når N-retentionen opgøres mere detaljeret inden for et ID15-opland, vil det være muligt at målrette N-virkemidler på marken, der reducerer nitratudvaskningen ved fx at placere efterafgrøder på de marker eller områder, hvor N-retentionen er lav. Visionen er, at en bedre målretning af virkemidler til områder med lav N-retention kan bidrage til en mere omkostningseffektiv regulering og derved give grobund for en økonomisk og bæredygtig udvikling af den danske landbrugsproduktion, der samtidig vil gøre det muligt for Danmark at opfylde kravene i EU's miljødirektiver.



Figur 6. Konceptuelt tværsnit af de vigtigste strømningsveje og processer for N-retention i landskabet og undergrunden. N-retention foregår i A) grundvandszonen inkl. dræn, B) den umættede zone inkl. rodzonen, C) ådale og lavbundsområder og D) vandløb og søer (Voutchkova *et al.* 2021).

N-retentionen i N-MAP-konceptet beskriver andelen af nitrat, der udvaskes fra marken, og som ikke når overfladevandet på grund af naturlig omsætning eller denitrifikation i forskellige

dele af landskabet og undergrunden. På oplandsniveau kan N-retentionen foregå i forskellige zoner og områder, se Figur 6.

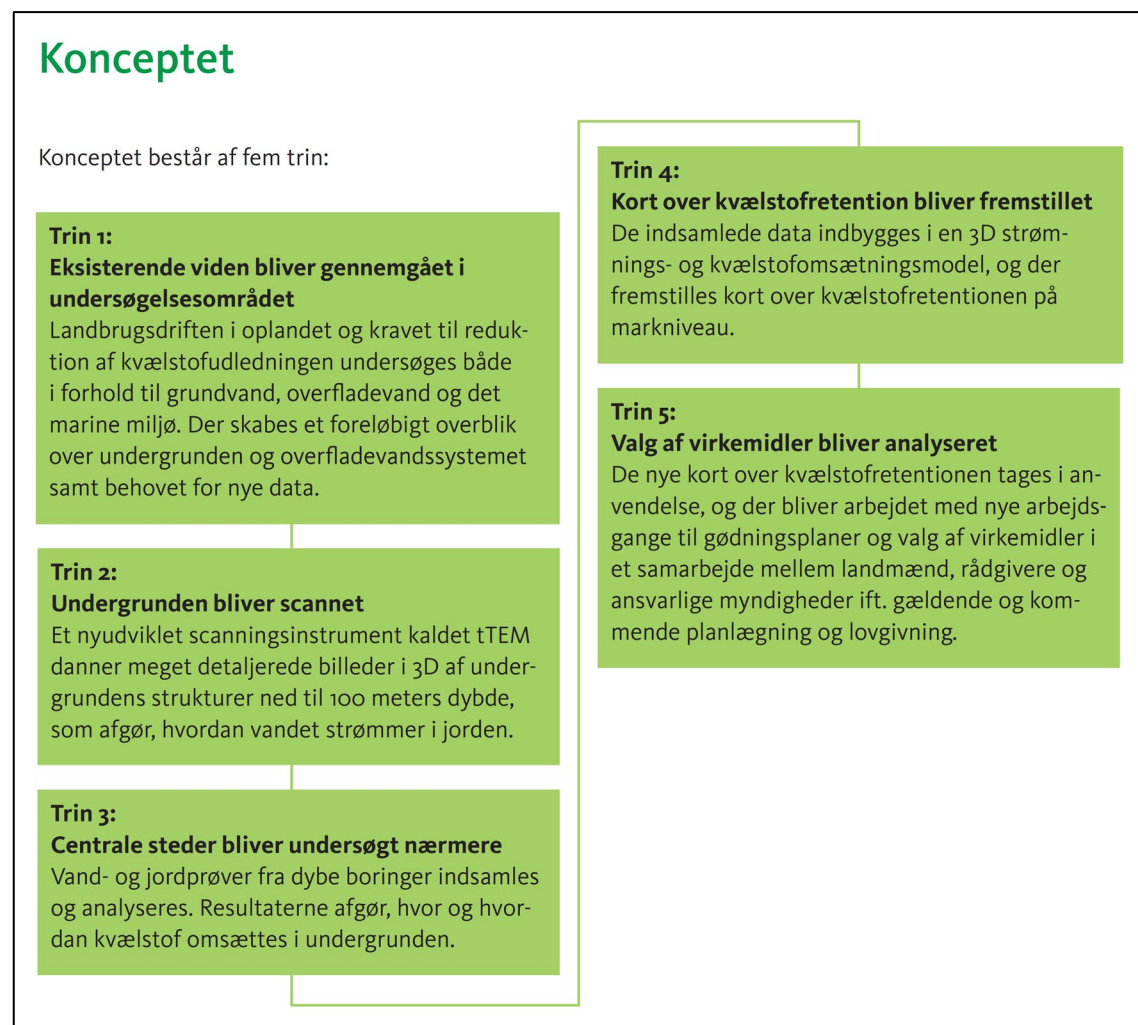
N-MAP er indtil videre udviklet til at bestemme N-retentionen i grundvandszonen (A vist i Figur 6), og bygger på en detaljeret beskrivelse af undergrundens strukturer, der er styrende for vandets bevægelse igennem jordlagene, samt måling af undergrundens omsætning af nitrat i centrale borer. Konceptet er baseret på indsamling af store datamængder om geofysiske, geologiske, og geokemiske forhold, som giver væsentlige input til at forstå transporten og omsætningen af nitrat i undergrunden. På dette grundlag kan der fremstilles kort over N-retentionen i grundvandszonen på markniveau. N-retentionskortene kan danne grundlag for en målrettet kvælstofregulering på markerne, hvor indsatserne og valg af virkemidler kan tilpasses den rumlige variation i N-retentionen i grundvandet.

Centralt i N-MAP står, at konceptet ikke bygger på én deterministisk modelopbygning af systemet, men derimod af i alt 500 lige sandsynlige sæt af 3-D modelstrukturer der beskriver undergrunden mht. hydrostratigrafi og N-omsætning. Modellerne er baseret på geofysiske data, borerinformation og kemiske laboratorieanalyser. Disse realisationer af 3-D modelstrukturer er modeller af undergrunden, hvor de indgående parametre varieres over deres forventede udfaldsrum. Modellernes inputparametre er alle data, der bruges til at beskrive systemet fx perkolations, nitratudvaskning, undergrundens strukturer og redoxforhold, hydraulisk ledningsevne og N-omsætningsrater. Når de indgående modelparametre beskrives med relevante variationer for værdierne, vil de 500 modelrealisationer således alle være lige sandsynlige. Variationen i N-retentionen i grundvandet mellem disse modelrealisationer vil derfor afspejle usikkerheden af N-retentionen (præcisionen af modelprædiktationen). Præcisionen er alene et udtryk for variationen i modelberegnet N-retention mellem de 500 modelrealisationer, da der ikke er foretaget en kalibrering/korrektion imod målte værdier i vandløb (flow og N-koncentration). Endelig er variationer på perkolations og N-udvaskning kun inkluderet som estimerede rumlige gennemsnit, da der ikke forelå rumligt distribuerede variationer. Præcisionen er derfor sandsynligvis underestimeret.

Dræning i N-MAP er blevet simuleret, hvis den modellerede grundvandsstand står højere end den dybde, hvor drænene ligger. Der er derfor indtil videre ikke indbygget en drænfraktion i N-MAP til at beskrive mængden af vandtransport fra rodzonen til drænene, som i Den Nationale Kvælstofmodel. I N-MAP-konceptet kalibreres modellerne ikke ved hjælp af målinger af kvælstof i overfladevandet eller grundvandet, men bygger på at antagelserne i modelopbygningen kan prædiktere N-retentionen mellem nitratudvaskningen fra rodzonen og overfladevandssystemet.

N-MAP-konceptet til fremstilling af kort over kvælstofretentionen på markniveau, er tilpasset et ID15-oplande på ca. 1500 ha, og består af fem trin (Figur 7). Elementerne i de fem trin gennemgås nedenfor. Oplande kan prioriteres forskelligt, fx afhængig af krav til reduktion af kvælstofudledningen for at opfylde Vandrammedirektivets mål om god økologisk tilstand i kystvande eller ift. usikkerheden i det eksisterende vidensgrundlag. Med konceptet er det muligt at stoppe ved trin 1 eller trin 2 i et opland (se Figur 7), hvis der er forhold, der gør den detaljerede tilgang

unødvendig, fx hvis undergrunden er meget homogen. I andre oplande kan det være nødvendigt at gennemføre alle fem trin.



Figur 7. De fem trin i N-MAP-konceptet. Indholdet i de fem trin er beskrevet i større detalje i teksten.

N-MAP-konceptet er udviklet og afprøvet i 2 pilotområder i rOPEN projektet samt 4 LOOP-områder og 2 demoområder i MapField-projektet. Disse 8 undersøgelsesområder er placeret i Jylland og på Fyn i områder, som er domineret af kvartære moræne- eller smeltevandsaflejringer med forskellig grad af heterogenitet (Sandersen & Kallesøe 2021, Voutchkova *et al.* 2021, Hansen *et al.* 2021). N-MAP-konceptet er derfor ikke afprøvet i alle typer landskaber og geologiske aflejringer som fx områder domineret af kalkaflejringer.

4.2.2 Trin 1 – Eksisterende viden

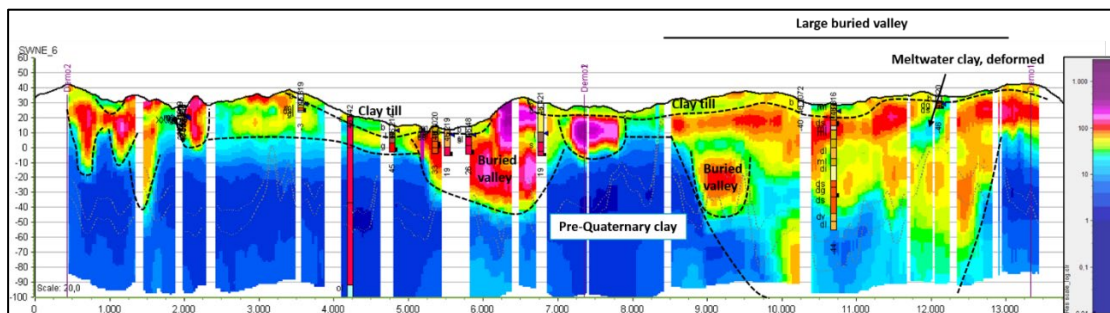
Indsamling af eksisterende data og viden er vigtig i den indledende del. Under trin 1 undersøges bl.a. følgende: 1) landbrugspraksis herunder mængden og fordelingen af landbrugsarealer og eksisterende tal for N-udvaskning, 2) krav til N-reduktion til kystoplande, overfladevand og grundvand og 3) eksisterende datatilgængelighed og behov for nye data. I dette trin indhentes

oplysninger om drænedede marker og der skabes også et foreløbigt overblik over de geologiske forhold og redox-forholdene.

4.2.3 Trin 2 – Scanning af undergrunden

I trin 2 foregår den geofysiske kortlægning af undergrundens strukturer. Strukturerne måles indirekte ved at måle resistiviteten, der er et mål for, hvor godt/dårligt jordlagene leder elektrisk strøm. Dette kan korreleres til geologiske forhold, fx hvor der er sand/ler/kalk. Kravene til den geofysiske kortlægning er i denne sammenhæng høj opløsning og stor arealdækning. I rOPEN og MapField-projekterne er der brugt et nyt landbaseret TEM-system (tTEM) (Auken *et al.* 2019). Systemet har en undersøgelsesdybde på 70-100 m og trækkes efter en 4-hjulet motorcykel (ATV). Oftest kortlægges langs køresporene på markerne og der kortlægges typisk 150 ha per dag. På denne måde opnås der en meget høj opløsning både lodret (ca. 3-4 m) og vandret (ned til 10 x 10 m).

Behandlingen af de geofysiske data har fulgt procedurerne, der også anvendes for luftbårne TEM-data beskrevet i Auken *et al.* (2009), Viezzoli *et al.* (2008) og Vignoli *et al.* (2015). Slutproduktet er en 3D resistivitetsmodel over undergrunden, som efterfølgende omsættes til geologiske og hydrostratigrafiske forhold. I Figur 8 ses en resulterende resistivitetsmodel med geologisk tolkning (Sandersen & Kallesøe 2021) for et tværsnit for demoområderne ved Salling. Her er røde farver høje resistiviteter, som er knyttet til grovere materialer som sand og grus, og de blå farver indikerer mere lerholdige materialer (Christiansen *et al.* 2014).



Figur 8. Resistivitetsmodel med geologisk tolkning for demoområderne ved Salling (Sandersen & Kallesøe, 2021)

4.2.4 Trin 3 – Undersøgelse af centrale steder

Under trin 3 prøvetages vand og sediment fra 5-10 borer afhængig af den påkrævede dybde. Boringerne placeres centralt på baggrund af resultaterne om undergrunden fra trin 2 og opstilling af hypoteser om, hvor der er behov for at undersøge den geologiske og geokemiske kompleksitet nærmere og for at opnå et højere vidensniveau. Undervejs i rOPEN og MapField-projekterne er borearbejdet blevet effektiviseret og firmaet Ejlskov har udført selve borearbejdet. Ejlskov har også udført redox-probe-målinger med det formål at screene redoxforholdene, men

en endelig evaluering af metoden mangler at blive udført i MapField. Formålet med prøveindsamlingen er at opnå viden om redoxstrukturerne i undergrunden, samt at indsamle data til at estimere omsætningsraterne for nitrat. Redoxforholdene tolkes ud fra koncentrationer af de redoxfølsomme stoffer som nitrat, sulfat, jern i vand og sediment og sedimentfarverne (Hansen *et al.* 2021, Kim *et al.* 2019, Madsen *et al.* 2021). Redoxtilstandene er opdelt i tre kategorier:

Oxiske forhold:

- Sedimentfarver: gul, rød, brun og kombinationer heraf
- Vandkemi: konsekvent høje nitratkoncentrationer og baggrundskoncentrationer af sulfat fra atmosfærisk deposition
- Sedimentkemi: tæt på nul eller meget lav Fe(II)/Fe(total)-fraktion

Nitratreducerende forhold:

- Sedimentfarver: grå, grøn, oliven; blandede farver af oxiske og reducerende forhold
- Vandkemi: lave eller faldende nitratkoncentrationer og stigende sulfatkoncentrationer med stigende dybde
- Sedimentkemi: stigende Fe(II)/Fe(total)-fraktion.

Reducerende forhold:

- Sedimentfarver: grå, grøn, oliven og kombinationer heraf
- Vandkemi: nitratkoncentrationer under 1 mg/l
- Sedimentkemi: Fe(II)/Fe(total)-fraktion tæt på 1

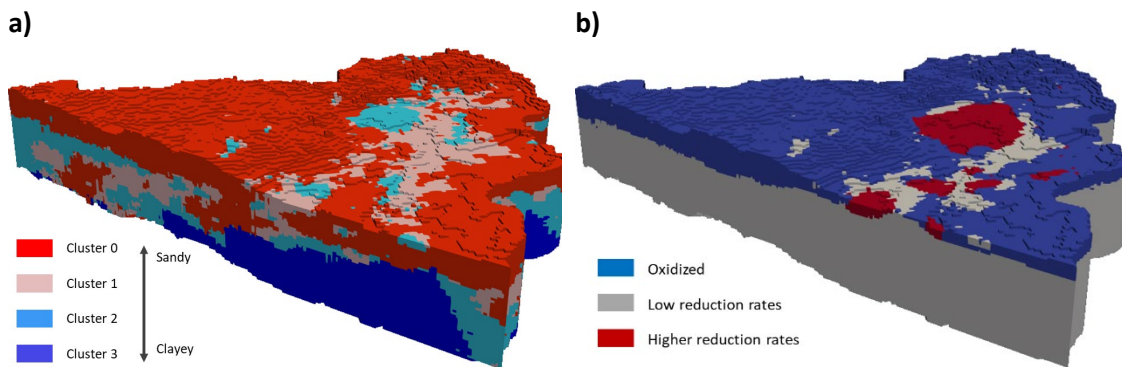
Omsætningsrater for nitrat bestemmes vha. acetylen-block-metoden (Smith *et al.* 1978) på sedimentprøver fra forskellige geologiske lag, lithologier og redoxzoner i undersøgelsesboringerne.

4.2.5 Trin 4A – 3D stokastisk modellering af undergrundens strukturer

Selve produktionen af N-retentionskort indeholder en række modelleringsopgaver, som beskrives i de næste afsnit.

I dette trin beskrives udbredelsen af forskellige hydro-stratigrafiske lag i 3D i undergrunden, som er afgørende for detaljeret og præcist at kunne modellere transporten af vand og nitrat i undergrunden frem til vandløbet. Kernen i konstruktionen af de hydro-stratigrafiske strukturer er metoden med akkumuleret lertykkelse (ACT), som beskrevet af Foged *et al.* (2014). ACT er en metode, der kombinerer lithologisk information fra boringer med resistivitetsinformation fra geofysiske data for at prædiktere en lerfraktion. Lerfraktionen er defineret som andelen af litologisk ler (fx litologi beskrevet som "ler", "moræneler", smeltevandsler") per løbende meter vertikalt. En lerfraktion på 0,8 betyder således at der er 0,8 m "ler" for hver meter. De endelige hydro-stratigrafiske enheder opnås herefter vha. en clusteranalyse (Wu, 2012) på geofysiske resistiviteter og lerfraktionsværdier. Herefter anvendes den geostatistiske metode Direct Sampling (DS) (Mariethoz *et al.*, 2010) til at generere et stort antal lige sandsynlige modelrealiseringer af de

hydro-stratigrafiske enheder med det formål at beskrive variationen på den strukturelle information. DS-metoden kræver et træningsbillede af undergrundens hydro-stratigrafiske strukturer for at generere de mange realisationer. Træningsbilledet dannes direkte ud fra de hydro-stratigrafiske enheder fra clusteranalysen. Dette gøres ved at interpolere de diskrete cluster-elementer estimeret i geofysikmålepunkterne ud i en fuld 3D model ved hjælp af indikator kriging. Et eksempel er vist i Figur 9a.



Figur 9. a) Snit igennem en 3D hydrostratigrafisk model fra ID15-oplandet, LOOP2 (MapField pilotområde i Himmerland som også indgår i den nationale overvågning af vandmiljøet). For det viste område er der anvendt en 4-cluster-model til at beskrive undergrunden. b) Samme snit, men for modellen over kvælstofomsætning.

4.2.6 Trin 4B – 3D stokastisk modellering af kvælstofomsætning

N-MAP-modellen for 3D kvælstofomsætning i undergrunden beskriver udbredelsen af forskellige zoner i undergrunden med forskellige N-omsætningsrater. Modellen bliver dannet ved at integrere viden om redoxforholdene og N-omsætningsrater fra vand- og sedimentprøverne med resistivitetsmodellerne og fortolkning af geologiske strukturer. Dermed bliver kvælstofomsætningen beskrevet i 3D i undergrunden og der tages højde for at nitraten ofte er trængt dybere ned i grundvandsmagasinerne end hvad der beskrives med den øvre redoxgrænse i Den Nationale Kvælstofmodel (Hansen *et al.* 2021, Voutchkova *et al.* 2021).

Viden om de geologiske strukturer fås fra geologiske tolkninger af de nye geofysiske data med eksisterende geofysisk og geologisk viden som beskrevet i rapporten af Sandersen & Kallesøe (2021). Der udføres histogramanalyser af de målte log-transformerede N-reduktionsrater og der bestemmes en middelværdi og en spredning for N-omsætningsraterne i forskellige zoner i grundvandet. N-omsætningsraterne kan variere flere størrelsesordener for den samme geologiske enhed som fx smeltevandssand eller leret moræneaflejring.

Undergrundens N-omsætningszoner simuleres ved samtidig stokastisk modellering af geologiske strukturer og N-omsætningszoner (Figur 9). Der konstrueres et træningsbillede på baggrund af data fra området med typiske zoner med forskellige N-omsætning og vurdering af sandsynligheder for udbredelsen af disse zoner i undergrunden. Træningsbilledet udarbejdes for hvert

ID15-opland ved sammentolkning af nye og eksisterende geokemiske data (Kim *et al.*, 2021). Et eksempel på en 3D-model for kvælstofomsætning er vist i Figur 9b.

4.2.7 Trin 4C – Kvælstofudvaskning fra rodzonen

Ligesom i Den Nationale Kvælstofmodel anvendes der i N-MAP-konceptet NLES5 beregnede udvaskninger af N fra rodzonen (Børgesen *et al.*, 2019), men med den forskel at der regnes med årlige værdier aggregeret til 100 m gridceller for perioden 1990 - 2018. I modellen indgår modelberegninger af nitratudvaskningen fra rodzonen fra landbrugsarealer og typetal for andre arealer.

I Demo-områderne i MapField har proceduren været, at der bliver beregnet N-udvaskninger for tre perioder (1990-2000, 2000-2010, og 2011-2018), som baserer sig på forskellige datagrundlag mht. arealanvendelse og N-gødningsdata. I perioden 1990-2000 er arealanvendelsen og husdyrgødning baseret på data indsamlet på sogneniveau og mineralsk handelsgødning indsamlet på amtsniveau. Dette gør udvaskningsberegningerne mere usikre end for de to andre perioder. I perioden 2011-2018 er data mere sikre, da der er oplysninger om hovedafgrøder for markblokken, og både husdyrgødning og handelsgødning er baseret på landmændenes indberetninger via gødningsregnskaber på bedriftsniveau.

Perkolationsdata til NLES5 modelberegningen og til N-MAP-modellering er beregnet med Daisy modellen (version 4.01) fra Hansen *et al.* (2012). Denne er baseret på nedbørsdata fra Danmarks meteorologiske instituts (DMI) 10x10 km klimagrid, nedbørsdata, aktuelle årlige arealanvendelsestyper (afgrøder) og typejorde. Dette følger metoden fra Børgesen *et al.* (2013). Nedbørsdata er korrigeret med dynamiske nedbørskorrekationer for hele landet (Vejen 2013) og distribueret på markniveau. I beregningen er fordampningskoefficienterne for afgrøder og bar jord sat til henholdsvis maksimalt 1,1 og 0,6, som anbefalet i Daisy (Refsgaard *et al.* 2011). Dog er fordampningskoefficienterne vest for Storebælt reduceret til 95 %, efter anbefaling fra Refsgaard *et al.* (2011). Ved denne opsætning af Daisy opnås omtrent samme gennemsnitlige perkolation på landsplan som ved anvendelse af de tidligere faste nedbørskorrekationer, hvor perkolationen blev opgjort til at være i overensstemmelse med vandløbsafstrømningen i en række større oplande (Grant *et al.* 2010). Dog kan der være forskelle hen over året og en lille forskel mellem landsdele. Til kalibrering af NLES5-modellen er der parameterestimer for perkolationen i tre perioder april – august, september – december og januar – marts. Daisy ind-regner opadstigende grundvand i beregning af perkolation. Det betyder, at den opgjorte perkolation kan være negativ. Den anvendte Daisy-perkolation til NLES5 er sat til nul, hvis den opgjorte perkolation i en af de tre førnævnte perioder er negativ.

Specielt for LOOP-områderne er N-udvaskningen fra rodzonen baseret på et mere detaljeret datagrundlag for landbrugspraksis idet afgrøder og gødningsforbrug er oplyst på markniveau for hele overvågningsperioden siden 1991. Ligesom i demo-områderne i MapField foretages modelberegninger af nitratudvaskningen for de dyrkede arealer i LOOP-oplandene med NLES5-modellen på markniveau. I demo-områderne er der lavet modelberegninger for perioden 1990 – 2018

og i LOOP for perioden 1990 – 2016 (Børgesen *et al.* 2019). Alle inputparametre (hovedafgrøde, efterårsafgrøde samt forfrugt og uorganisk N-gødning, organisk N-gødning, N-fiksering og N i gødning efterladt ved afgræsning) er fra interview af de landmænd, der dyrker markerne i de enkelte LOOP-oplande (Blicher-Mathiesen *et al.* 2021).

4.2.8 Trin 4D – Modellering af kvælstoftransport og omsætning

I N-MAP modelleres kvælstoftransport og omsætning fra nitratudvaskningen fra bunden af rodzonen gennem grundvandet og frem til udløb af ID15-oplandet. Hverken tilførsel eller fjernelse af kvælstof i overfladevandet er på nuværende tidspunkt indarbejdet i N-MAP. I N-MAP beregnes derfor kun N-retentionen i grundvandet fra N tilført fra rodzonen. Modelleringen er opbygget af fire modelsystemer:

1. NLES5, der er en statistisk/empirisk model til beregning af årlig nitrat-udvaskning fra rodzonen for dyrkede arealer.
2. Daisy, der er en rodzonemodel til beregning af perkolationen ud af rodzonen, som bruges som grundvandsdannelse i grundvandsmodellen.
3. MODFLOW, der er en numerisk fysisk baseret grundvandsmodel, som beskriver vandstrømningerne i grundvandszonen.
4. MODPATH, der er en partikelbanemodel, som kan bruges til at beskrive transport i grundvandszonen.

De enkelte modelsystemer er koblet ved en envejs kobling, og koblingen af de enkelte modelsystemer sker på modelcelle-niveau (25 x 25 m), der således udgør beregningsenhederne i den samlede N-MAP-modellering. Det vil sige, at der simuleres N-grundvandsretention på modelcelle-niveau (25 x 25 m) og modelberegningerne kan sammenlignes med målinger af den totale N-retention på ID15-niveau.

Transporten af kvælstof i grundvandszonen beregnes med MODFLOW og MODPATH, hvor der opnås en beskrivelse af vandets strømning (3D simulering), og dermed kvælstoffets transportvej, gennem undergrunden fra rodzonen til grundvandet og overfladevandet.

Transporten via grundvand beskrives med partikelbanesimulering ved at placere 1 partikel per beregningscelle initialt. Partiklerne placeres i midten af modellens første beregningslag, der svarer til 1 m under terræn, da det øverste beregningslag i MODFLOW-modellen har en konstant tykkelse på 2 m. Det sikres dog, at partiklerne placeres i den vandmættede del af den enkelte celle. I tilfælde hvor grundvandsstanden står mere end 2 m under terræn, vil partiklerne ligeledes frigives dybere.

I N-MAP er undergrunden inddelt i en række detaljerede 3D-zoner med forskellige transport- og omsætningssegenskaber for nitrat som beskrevet i afsnit 4.2.6. Det opgøres derfor, hvor lang tid nitraten opholder sig i de enkelt 3D-zoner med et separat bogholdermodul.

Dræning simuleres med MODFLOW, hvis vandstanden står højere end drænniveauet. Dræningen beregnes på modelcelle-niveau og afhænger af en dræningskonstant, som justerer strømmingen til drænene i forhold til deres effektivitet, samt vandstanden og drænniveauet (Harbough 2005). I forhold til partikelbanesimulering, vil nogle af partiklerne i områder med en opadrettet strømning transporteres direkte til dræn og dermed ikke undergå omsætning. Der er for nuværende ikke indarbejdet en drænfraktionering som i Den Nationale Kvælstofmodel. Det betyder at gridceller i modellen enten er 0 eller 100% drænet.

Grundvandsretentionen ($N_{retention}$) i N-MAP er forholdet mellem fjernelsen af kvælstof i grundvandszonen ($N_{fjernelse}$) og udvaskningen fra rodzonen ($N_{udvaskning}$):

$$N_{retention} = \frac{N_{fjernelse}}{N_{udvaskning}} \quad (1)$$

Fjernelsen af kvælstof i grundvandszonen er en funktion af 1) N-omsætningsraten ($\frac{\partial C}{\partial t}$) altså et udtryk for, hvor hurtigt kvælstoffet omsættes og 2) transporttiden (τ) det vil sige den tid det tager kvælstoffet at bevæge sig igennem et jordvolumen. Det kan udtrykkes således:

$$N_{fjernelse} = \frac{\partial C}{\partial t} \times \tau \quad (2)$$

Kvælstoffet transporteres typisk gennem jordvolumener med forskellige omsætnings- og transporttider. Derfor er den totale kvælstoffjernelse langs en strømningsvej fra rodzonen til overfladevandet lig med den akkumulerede kvælstoffjernelse for hver strømningslinje.

Transittiden (τ) gennem hver zone med forskellige N-omsætningsrater er en funktion af 3D-volumenet og partikelhastigheden. Her er partikelhastigheden afhængig af de rumlige hydrogeologiske egenskaber, som beskrives med den hydrauliske ledningsevne, den effektive porøsitet og den hydrauliske gradient.

4.2.9 Trin 5 – Analyse af virkemidler

De nye kort over kvælstofretentionen diskuteres med interessenter. Der bliver undersøgt muligheder for nye arbejdsgange til gødningsplaner og valg af virkemidler i et samarbejde mellem landmænd, rådgivere og ansvarlige myndigheder ift. gældende og kommende planlægning og lovgivning. Dette trin er under afprøvning og udførelse i 2021-22 i MapField i demo-områderne ved Salling.

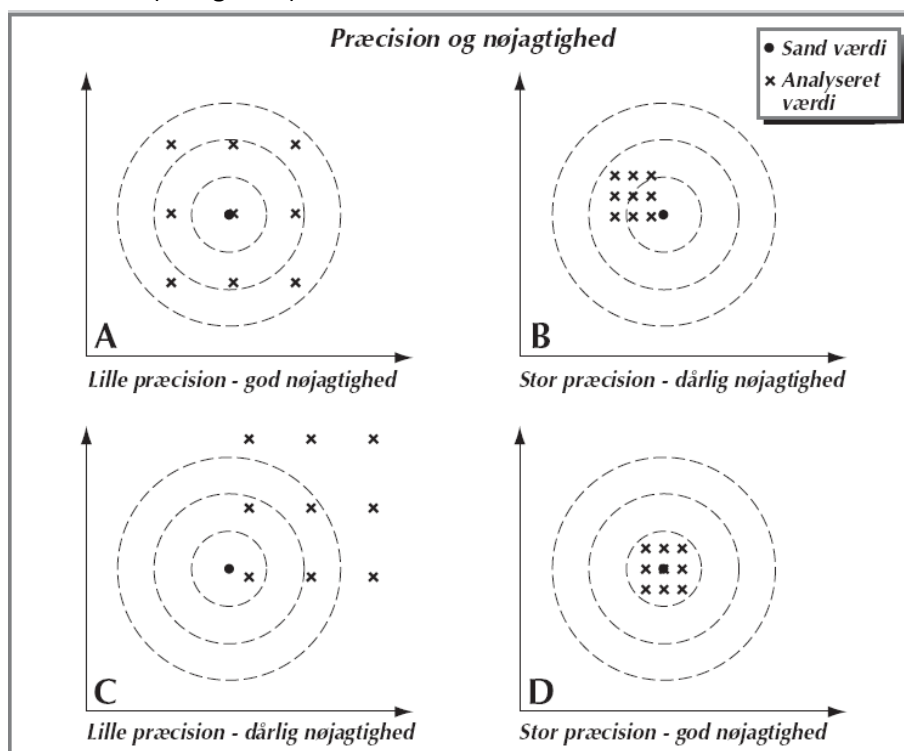
1. Beskrivelse af usikkerhed

Usikkerhed er et begreb som beregnes på forskellig vis og som er afhængig af den valgte metode og de inkluderede data. Der er derfor behov for at forstå og beskrive, hvordan usikkerhed håndteres i Den Nationale Kvælstofmodel og i N-MAP for at kunne beskrive forskelle og evt. foretage sammenligninger.

5.1 Generelt om usikkerhed

Usikkerhed kan beskrives med begreberne præcision og nøjagtighed. Præcisionen angiver, fx hvor godt en række lige sandsynlige modelresultater kan ramme det samme resultat. Præcisionen er med andre ord den variation, man har på sine resultater, når man sammenligner resultaterne indbyrdes. Præcisionen har dermed intet at gøre med om resultatet giver den "sande" værdi (se Figur 10). Nøjagtigheden eller korrektheden angiver derimod, hvor godt et givet modelresultat kan ramme den "sande" værdi, hvilket kan være en måleværdi af fx grundvandspotentialet eller N-transporten i vandløb.

Nøjagtigheden refereres også ofte til som bias, forstået sådan at dårlig nøjagtighed er det samme som en stor bias. Nøjagtigheden har dermed intet at gøre med den indbyrdes spredning på modelresultaterne, men siger alene noget om, hvorvidt resultaternes middelværdi ligger tæt ved den sande værdi (se Figur 10).



Figur 10. Begreberne præcision/spredning og korrekthed/nøjagtighed (Hansen & Thorling 2008).

5.2 Den Nationale Kvælstofmodel

5.2.1 Kalibrering

En detaljeret gennemgang af kalibreringen findes i Højberg *et al.* (2021b). Delmodellerne, der indgår i Den Nationale Kvælstofmodel, er baseret på årsagssammenhænge. Fx er N-retentionen i overfladevandet afhængig af opholdstiden, den aktuelle temperatur og i de fleste tilfælde kvælstoftilførslen. Nogle parametre i modellen er justeret ved kalibrering, fx er dybden til redox-grænsen angivet i 500 x 500 m grids og kalibreret for at opnå en forbedret overensstemmelse med den målte kvælstoftransport i vandløbet. Dog anvendes de originale værdier for den nedre redox-grænse fra Den Nationale Kvælstofmodel (se Tabel 1). Under kalibreringen justeres disse parametre til der opnås en tilfredsstillende overensstemmelse mellem observerede og modelberegnete kvælstoftransporter i vandløbene.

Kalibreringen er foretaget manuelt, dvs. der er gennemført en beregning med efterfølgende sammenligning med de observerede N-transporter i vandløb. Herefter foretages en justering af modelparametrene, og der gennemføres en ny beregning og sammenligning. Denne proces fortsættes, til der opnås en tilfredsstillende overensstemmelse mellem de observerede og beregnede N-transporter i vandløb, eller indtil det ikke er muligt at forbedre beregningsresultaterne yderligere. I sammenligningen med de observerede data er der anvendt årlige værdier, dvs. modellen er kalibreret og valideret mod de årlige kvælstoftransporter i vandløbene.

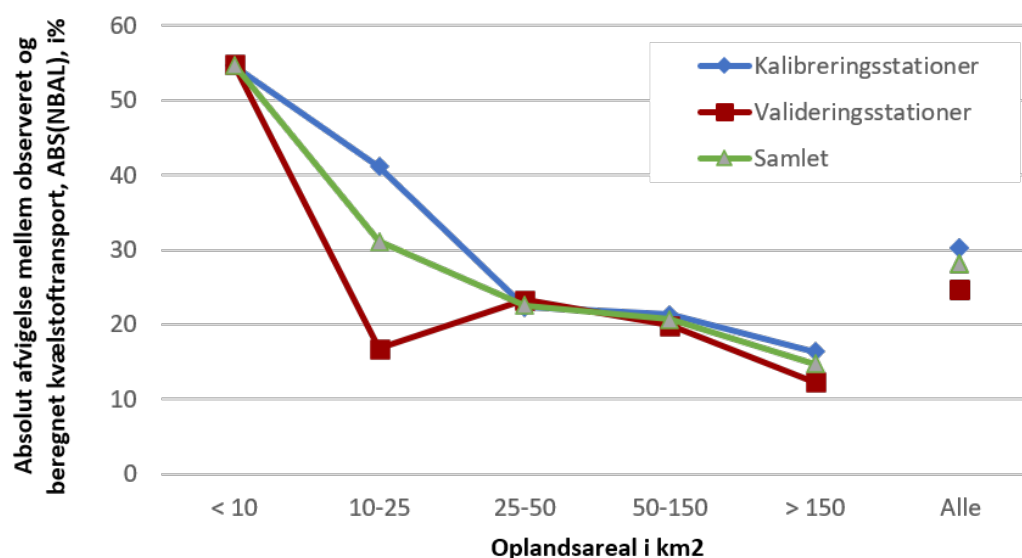
Observationer af N-transporter i vandløb er opdelt i to datasæt. Det ene sæt er anvendt til kalibrering af modellen, mens det andet sæt er reserveret til en validering af modellen. Ved reservation af en del af datasættet kan der således laves en test på et uafhængigt datasæt på stationer, der ikke er inkluderet under kalibreringen. Dette giver mulighed for at opnå et mål for, hvor god modellen er til at beregne N-transporten i umålte oplande, dvs. oplande uden målinger af N-transport i vandløb. Parametrene anvendt i Den Nationale Kvælstofmodel til kalibreringen af N-retentionen i overfladevandsystemet og i grundvandet er vist i Tabel 1. Kalibreringen af Den Nationale Kvælstofmodel er "global" for alle dele undtagen de hydrologiske parametre fra DK-modellen, som er kalibreret i forbindelse med den tidligere DK-model2019 opsætning. Det vil sige at implementeringen af delmodeller og kalibrering foregår ens i hele landet og over hele den modellerede tidsperiode. Der er derfor ikke foretaget specielkalibreringer i de enkelte oplandes målestationer. Dette er med til at sikre Den Nationale Kvælstofmodels kan anvendes i både målte og umålte oplande.

Tabel 1. Parametre anvendt i kalibrering af Den Nationale Kvælstofmodel

Parameter	Forklaring	Faktor
Nedre redox-grænse	Dybden til den nedre redoxgrænse	Anvendelse af originalt redox-kort, uden residualkrigning
Øvre redoxgrænse	Udbredelsen af den øvre redoxgrænse baseret på arealer med organiske lavbundsjord	Øvre redoxgrænse anvendt, hvor mere end 25 % af DK-modellens grid indeholder organo-gen lavbund
MP_så_søer	En multiplikationsfaktor til generel justering af retention i små søer	1,2
MP_I_vlb	En multiplikationsfaktor til generel justering af retention i interne vandløb	0,8
MP_H_vlb	En multiplikationsfaktor til generel justering af retention i hovedvandløb	0,8
MP_St_sø1	En multiplikationsfaktor til generel justering af retention i opstrøms store søer	0,8
MP_ST_sø2	En multiplikationsfaktor til generel justering af retention i store søer i kæde	$0,8 \times 0,7 = 0,56$

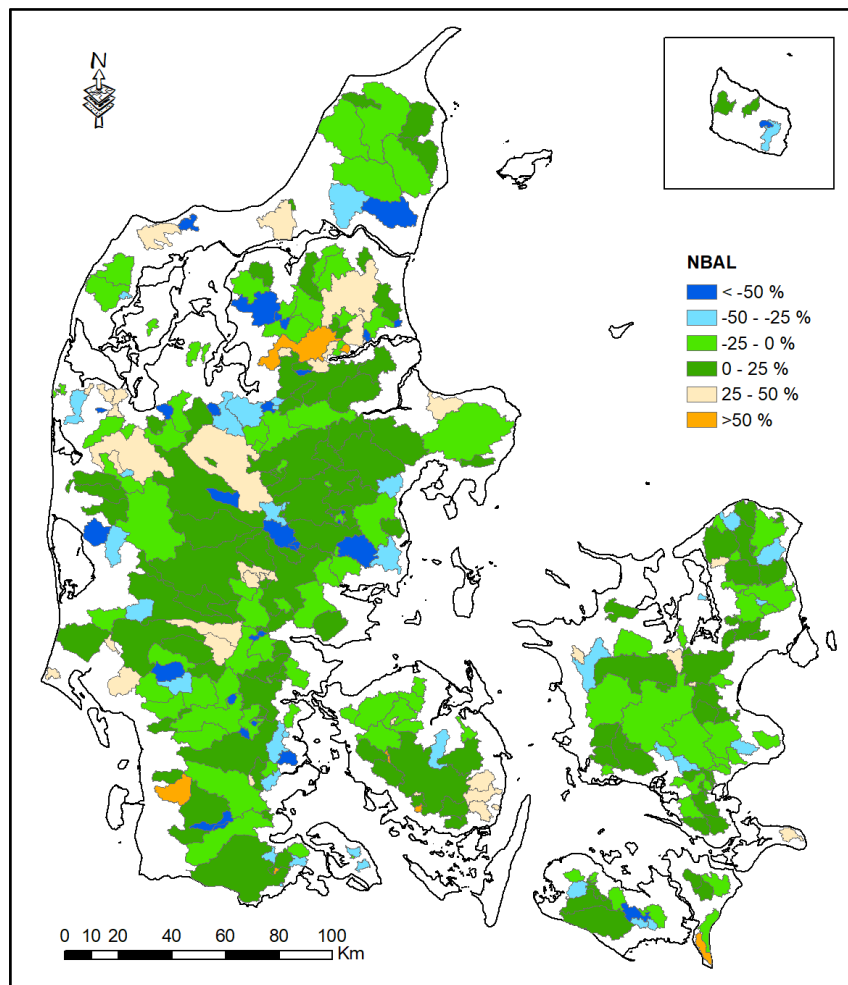
5.2.2 Validering

Modellens evne til at beregne kvælstoftransporten på stationsniveau er udtrykt ved NBAL, som er den procentuelle afvigelse mellem observeret og simuleret N-transport. NBAL opgøres for forskellige størrelser af oplandsarealer. Figur 11 viser middel af den numeriske værdi for NBAL (middel af de absolutte forskelle) inden for hver arealklasse for hhv. kalibrerings- og valideringsstationer samt opgjort for alle stationer under et. Klassen under 1000 ha (<10 ha) indeholder også meget små oplande med arealer under 100 ha. Det skal bemærkes, at de mindste oplande typisk vil have den mindste samlede N-transport. Afvigelserne mellem observeret og beregnet N-transport aftager med stigende oplandsstørrelser særligt indtil arealklassen 25 - 50 km², hvorefter NBAL ligger omkring 20 %, dog ca. 15 % for de helt store oplande. Resultaterne viser også, at der opnås sammenlignelige værdier for stationerne anvendt til hhv. kalibrering og validering.



Figur 11. Middelværdi af de enkelte relative afvigelser mellem observeret og beregnet kvælstoftransport opgjort i procent. Den absolutte afvigelse i N-balancen (NBAL), opgjort for kalibrerings- og valideringsstationer er samlet i Den Nationale Kvælstofmodel (Højberg *et al.* 2021b).

Den rumlige fordeling af NBAL, Figur 12, viser at de største procentuelle forskelle mellem observeret og målt kvælstoftransport generelt ses for de mindre oplande. Desuden fremgår det, at oplandene med de største afvigelser ligger spredt i landet og ikke er grupperet i afgrænsede områder. Der er dog undtagelser, som i nordvest ved Vigsø Bugt/Jammerbugten, omkring Storåsystemet, mellem Nissum fjord og Limfjorden samt den sydøstlige del af Fyn.



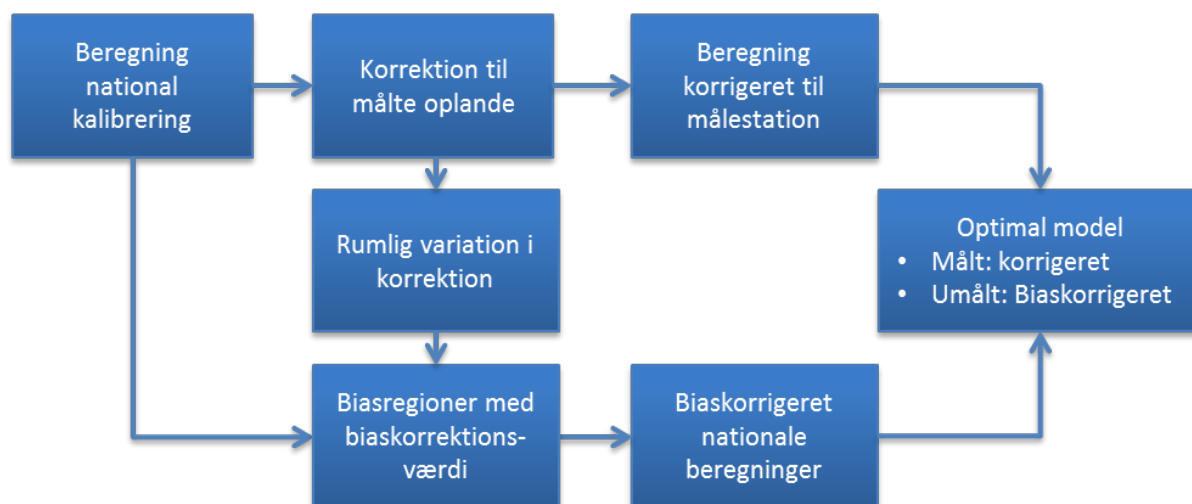
Figur 12. Rumlig fordeling af NBAL (procentuelle afvigelser mellem observeret og simuleret N-transport i vandløb) i Den Nationale Kvælstofmodel. Ved positive NBAL-værdier er de simulerede værdier for N-transport mindre end observerede kvælstoftransporter og vice versa (Højberg *et al.* 2021b).

5.2.3 Bias korrektion

Anvendelsen af nationale parametre, der er kalibreret på mange målinger fra forskellige typer oplande og hvor valideringsresultater viser samme nøjagtighed som resultaterne fra kalibreringen, gør det muligt at overføre disse parametre til de umålte oplande og gennemføre en beregning for disse, der er konsistent med beregningerne for de målte oplande. Den nationale kalibrering resulterer i en model, der for landet som helhed giver den bedste beskrivelse af den observerede kvælstoftransport.

Der vil imidlertid være regionale og lokale variationer i omsætningen af nitrat, som ikke fanges af den nationale kalibrering, hvorfor der for de enkelte målestationer vil være en forskel mellem observationerne og beregningerne gennemført med den nationalt kalibrerede model. Den nationale kalibrering er derfor suppleret med en korrektion til de individuelle målestationer. Det rumlige mønster for denne korrektion er efterfølgende analyseret for at identificere sammenhængende regioner med sammenlignelig korrektion, der vil angive en systematisk afvigelse

(bias) mellem observationer og modelberegninger. I de tilfælde, hvor der er tale om en systematisk afvigelse mellem model og observationer i et delområde af de målte oplande, må det ligeledes forventes, at denne systematiske afvigelse vil være gældende for de umålte oplande. Biaskorrekturen for N har derfor til formål at overføre viden om systematisk afvigelse i de målte oplande til de umålte oplande. Den samlede tilgang er illustreret i Figur 13.



Figur 13. Flowdiagram for biaskorrekktion og "optimal" model ved kombination af korrigerede værdier for målte og biaskorrigerede værdier for umålte oplande.

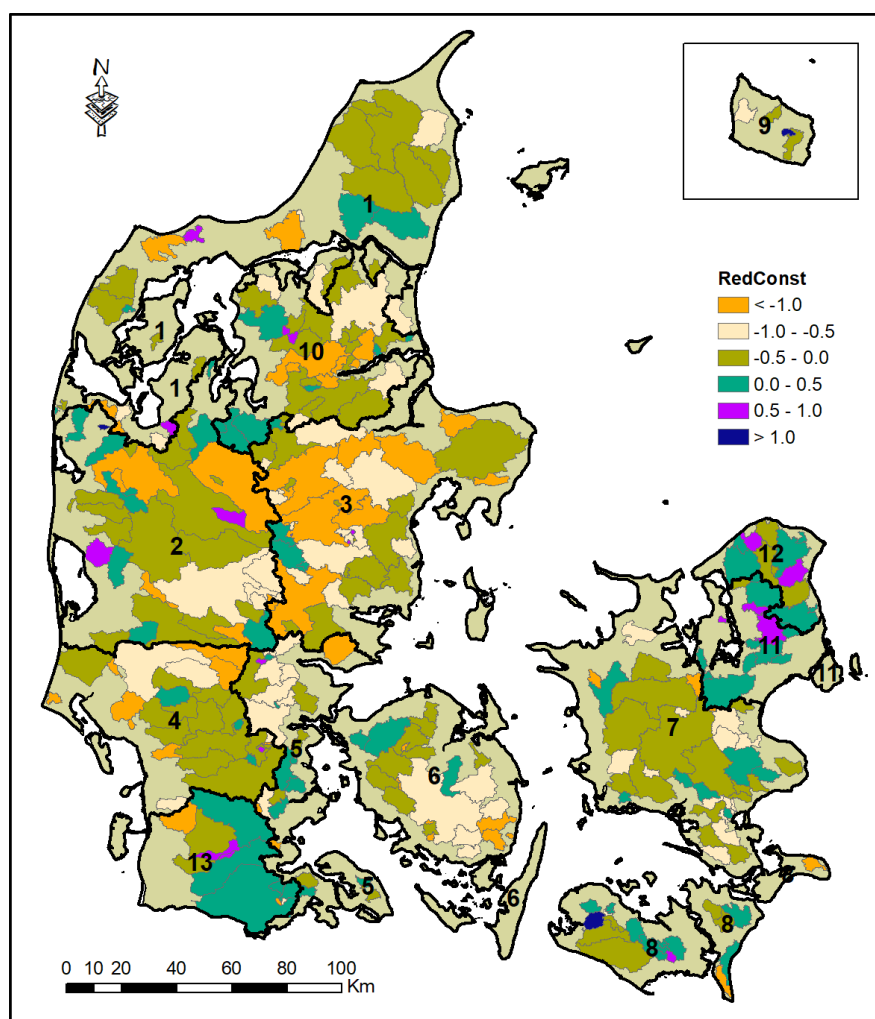
Til korrektion af N-transporten er der benyttet 13 biasregioner som vist på Figur 14. For hver biasregion er der bestemt en biaskorrekktion, som er medianen af korrektionsværdierne for de opmålte oplande inden for regionen. De anvendte korrektionsværdier (RedConst) for målte og umålte oplande fremgår ligeledes af Figur 14.

5.2.4 Usikkerhed og nøjagtighed

I Den Nationale Kvælstofmodel opgøres modellens usikkerhed som nøjagtighed på de beregnede ID15-N-retentioner ved at sammenligne de stationskorrigerede og de biaskorrigerede N-retentioner i målte oplande. Der er ikke opgjort eller gennemført analyser af præcisionen på N-retentionen indenfor ID15-oplande i stil med de stokastiske analyser gennemført i N-MAP. Ligesom der heller ikke er opgjort nøjagtighed på delelementer af den totale N-retention som fx grundvandsretentionen. Det er i stedet valgt at udnytte, at der beregnes en retentionsprocent for alle ID15-oplande inden for de målte oplande, så disse medtages i beregningen af nøjagtigheden. Dette giver et større datamateriale til belysning af variationerne mellem den stationsbestemte- og den bias-korrigerede N-retention.

Det er ikke muligt direkte at overføre afvigelsen for én målestation til en nøjagtighed på et umålt opland. Tilgangen har derfor været at beregne forskellen mellem reduktionsprocenterne bestemt ved de to metoder (biaskorrigeret og stationskorrigeret) for hvert af de målte oplande og derefter anvende spredningen i disse forskelle som et mål for nøjagtighed. Denne analyse er

gennemført for de 13 biasregioner, der derved giver et estimat for den generelle usikkerhed for oplandene inden for hver biasregion. Spredningen i reduktionsprocenterne bestemt ved de to metoder er beregnet ved en standardafvigelse, og nøjagtigheden er herefter udtrykt ved to gange standardafvigelsen angivet i procentpoint. Usikkerhedsintervallet for retentionen (Tabel 2) er opgjort til at ligge mellem fra 6 – 27 % afhængig af hvilken region, der kigges på, samt beregnet for hele landet under 1 – 16 %.



Figur 14. Rumlig fordeling af 13 bias-regioner, angivet med sort linje og numre, og korrektionskonstanten, RedConst. Den estimerede nøjagtighed for de enkelte bias-regioner er angivet i Tabel 2.

Tabel 2 Estimeret usikkerhed på beregnet ID15 N-retention opgjort for hver af de 13 bias-regioner vist i Figur 14.

Biasregion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Na-tional
2 x st afv	19%	15%	14%	12%	19%	12%	12%	16%	19%	27%	6%	10%	9%	16%

5.3 N-MAP-konceptet

5.3.1 Forhåndsviden og falsificering

I N-MAP-konceptet er usikkerhedsanalysen central i modelleringen og i den beregnede N-retention for grundvandet. Der er både fokus på præcision og nøjagtighed hvilket bliver beskrevet i denne afsnit.

Formålet med modelleringen i N-MAP er ikke modellen i sig selv men i stedet den primære beslutningsvariabel, som her er estimeret for grundvandsretentionen på mindre skala end ID15-oplandsniveau. Usikkerhed (præcision) i N-MAP beskrives vha. Bayesiansk statistik baseret på mange realisationer af sandsynlige modeller. Når disse modeller anvendes til at prædiktere en beslutningsvariabel (her: grundvandsretention) vil variationen i prædiktionen direkte afspejle usikkerheden (præcisionen) i systemet.

Centralt i N-MAP står således arbejdet med at definere forhåndsviden for modelvariable (forventede værdier og forventede værdiområder) i modelleringen for at de mange modelrealisationer kommer til at udspænde det forventede udfaldsrum på en relevant måde. Modelvariable er fx:

Inputvariable såsom perkolation og nitratudvaskning fra rodzonen

Rumlige variable såsom undergrundens strukturer og redox-forhold

Hydrogeologiske variable såsom hydraulisk ledningsevne og magasinkoefficienter

Hydro-geokemiske variable såsom N-omsætningsrater

Forhåndsviden for inputvariable, rumlige variable og omsætningsrater er der redegjort for afsnit 4.2 om N-MAP-konceptet, mens forhåndsviden om hydraulisk ledningsevne og magasinkoefficienter primært stammer fra lærebøger, områdespecifikke hydrogeologiske rapporter og DK-modellen.

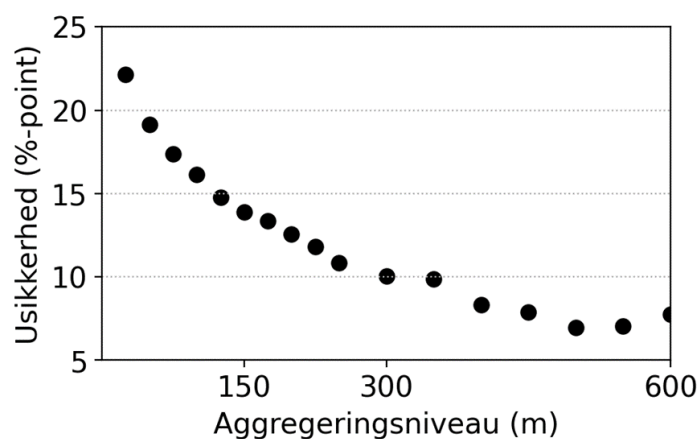
Det er afgørende, at modelleringen med forhåndsviden kan forudsige de målte værdier (såsom trykniveau, vandløbsafstrømning og vandløbstransport), og der er her fokus på nøjagtighed. Hvis forhåndsviden ikke kan forudsige data med en vis sandsynlighed, bliver modellen falsificeret. Hvis modellen falsificeres, bliver parametriseringen af forhåndsviden modificeret og/eller modelkompleksiteten øges ved at øge antallet af variable. Dette gentages indtil modellen ikke længere kan falsificeres.

Der dannes 500 kvælstofmodeller ved hjælp af geostatistiske metoder med det formål at undersøge, om forhåndsviden kan falsificeres. Hver model er sandsynlig og har en unik kombination af værdier for hver modelvariabel. Dette antal (500) har indtil videre vist sig at være tilstrækkeligt for at kunne modellere variationen i forhåndsviden, holde beregningsomkostningerne nede, og udføre en rimelig følsomhedsanalyse.

Da variationen i modelvariablene forplanter sig til variationer i modelforudsigelsen, som her er et estimat for grundvandsretentionen på mindre skala end ID15-niveau, er resultatet en fordeling af mulige modelforudsigelser og kort over grundvandsretentionen. Ud fra denne fordeling kan præcisionen for grundvandsretentionskortene beregnes på markniveau eller aggregeres til større arealer.

5.3.2 Usikkerhed og præcision

Ligesom tidligere vist i NICA-projektet (Hansen *et al.*, 2014) er usikkerheden på estimatet af N-retention en funktion af skala. Det vil sige: des finere skala des større usikkerhed som vist i Figur 15 for implementering af N-MAP-modelleringen i Javngyde-oplandet som blev undersøgt i rOPEN-projektet.



Figur 15. Usikkerheden udtrykt som præcision på grundvandsretentionen i Javngyde-oplandet som funktion af aggregeringsniveau med N-MAP-konceptet. Det skal bemærkes at usikkerheden på nitratudvaskningen og perkolationen fra rodzonen endnu ikke indgår i beregningen af den samlede usikkerhed.

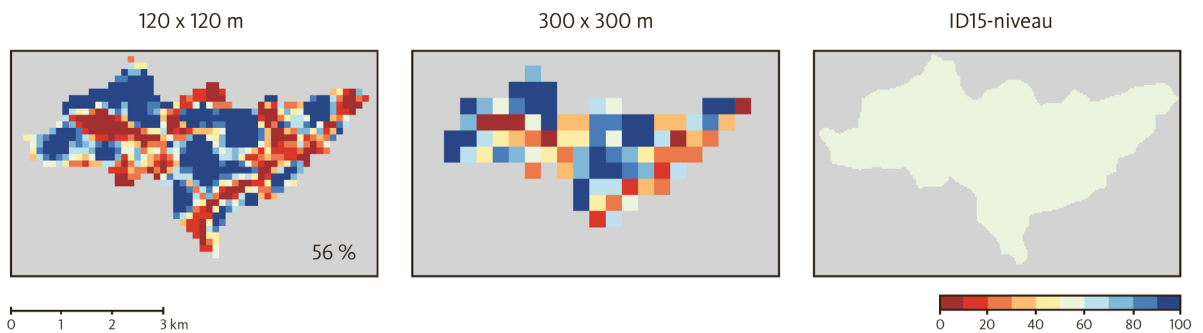
I Figur 16 ses et eksempel på N-retentionskort fra Javngyde-oplandet. Både en detaljeringsgrad på 120×120 m (ca. 1,4 ha) og 300×300 m (ca. 9 ha) viser en stor rumlig variation fra 0 til 100 %, mens middelværdien for ID15-oplandsniveauet (ca. 1000 ha i dette tilfælde) har en værdi på 56 %.

En detaljeringsgrad på 120×120 m (ca. 1,4 ha) giver en gennemsnitlig præcision på 16 %, mens præcisionen falder til 11 % og 2 % ved en detaljeringsgrad på henholdsvis 300×300 m (ca. 9 ha) og ID15-oplandsniveau.

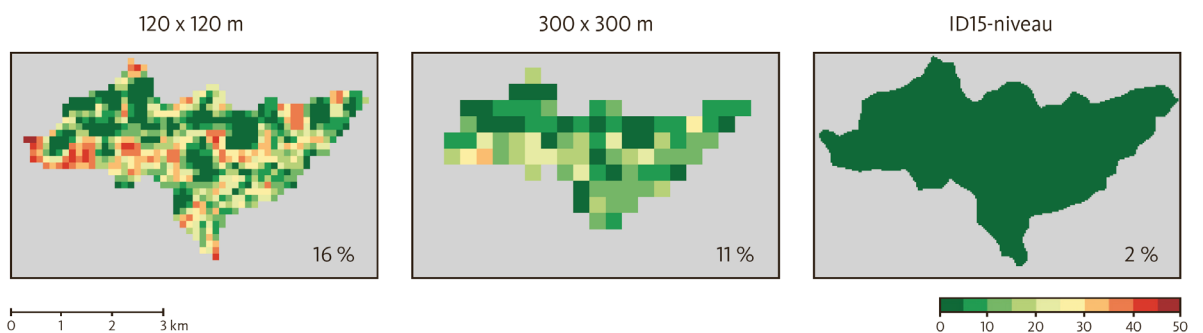
Det skal understreges, at en række modelvariable ikke indgår i beregningen af den samlede usikkerhed for de viste kort i Figur 16, men der arbejdes på at indbygge dem i konceptet. De viste

usikkerheder er derfor sandsynligvis underestimerede. Der er i N-MAP ikke gennemført direkte analyser af nøjagtigheden af den samlede ID15 N-retention i stil med de gennemførte analyser i N-modellen, da der kun har været fokus på N-retentionen i grundvandet.

Kvælstofretention (%)



Usikkerhed (%-point)



Figur 16. Eksempel på N-retentionskort fra Javngyde som viser at usikkerheden stiger (præcisionen falder) ved større detaljeringsgrad. Usikkerheden af perkolation og nitratudvaskning indgår ikke i modelberegningen af præcisionen

5.3.3 Sensitivitetsanalyse

Med 500 lige sandsynlige modeloutput, der baserer sig på forventede variationer i modelparametrenes værdiområde (beskrevet ovenfor), kan man foretage modelbaserede studier af betydningen eller sensitiviteten af de forskellige parametre for modeloutputtet. Sensitivitetsanalysen vil derfor være underlagt de samme forbehold som selve modellen, som fx at der ikke kan beregnes en følsomhed for inputparameteren "Nitrat-udvaskning fra rodzonen" da dennes usikkerhed ikke er beskrevet i de 500 realisationer.

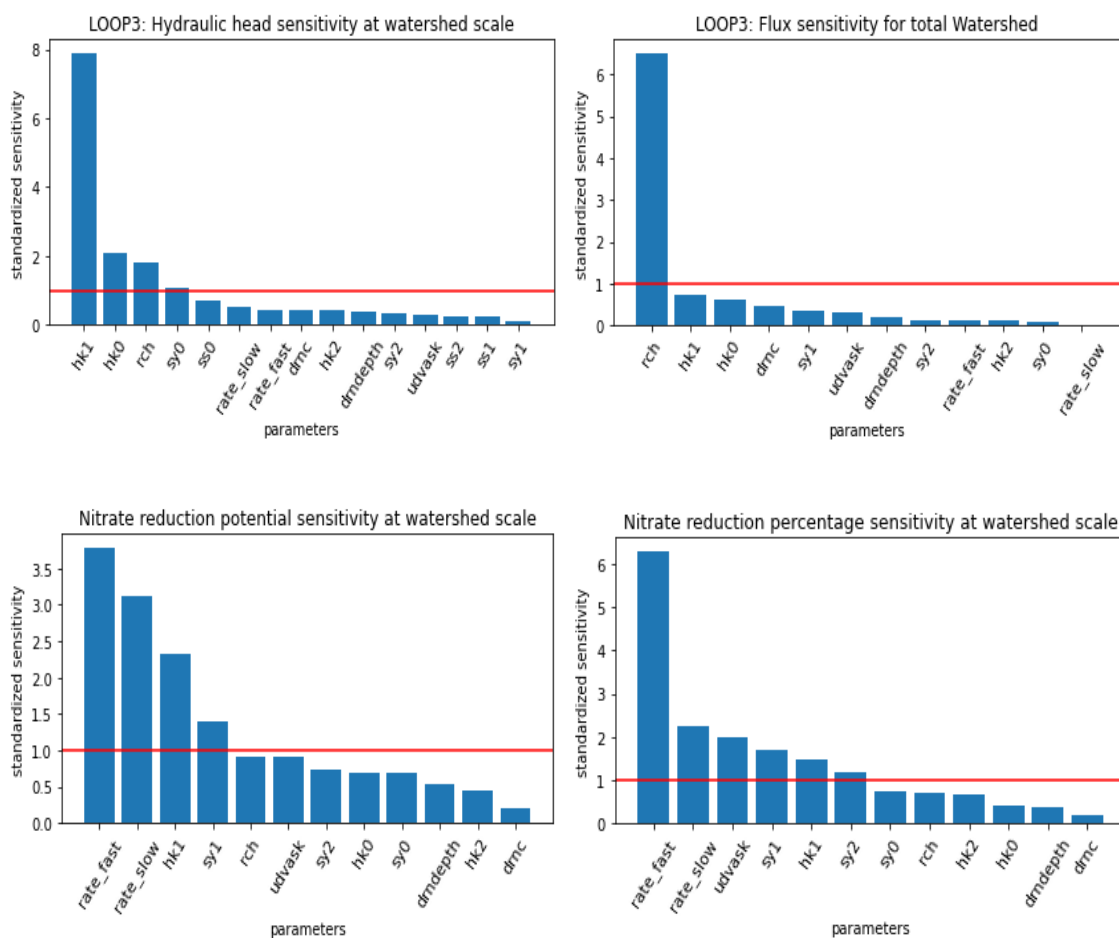
Der er i LOOP 3 udført en sensitivitetsanalyse med metoden "Distance-based Global Sensitivity Analysis" (DGSA). DGSA-analysen er en omfattende analyse af grundvandsmodellens og de resulterende N-reduktionskorts følsomhed overfor inputparametrene. Det overordnede formål med DGSA-analysen er at vurdere, om modellen eller prædiktionerne er følsomme over for de inputparametre, der bruges til at generere ensemblet af modelresultater eller prædiktioner.

Sensitivitetsanalysen er udført for følgende 4 resultater fra modelleringerne af vand og N-transport og produktion af N-retentionskort:

- Hydraulisk potentiale i borer
- Modelleret flow ved udløbet af oplandet
- N-reduktionspotentiale
- N-retentionskort

Figur 17 viser DGSA-sensitivitetsresultaterne for de 4 valgte resultater fra modelleringen. Det valgte modelleringsresultat er sensitivt for inputparametre (x-aksen) som ligger over den røde linje og ikke-sensitivt for parametre med værdier under den røde linje som vist på y-aksen.

Sensitivitetsanalysen viser at det modellerede grundvandspotentiale (øverst til venstre i Figur 17) er sensitivt for den hydrauliske ledningsevne i enhed 1 og 0 (hk_1 og hk_0 , mest sand) samt grundvandsdannelsen (r_{ch}). Det er forventeligt, at grundvandspotentialet er styret af de hydrauliske parametre. Sensitivitetsanalysen viser, at den modellerede vandflux fra grundvandet ved udløbet af oplandet (øverst til højre i Figur 17) kun er sensitiv for inputparameteren "grundvandsdannelse" (r_{ch}) af de undersøgte inputparametre. Det er ligeledes forventeligt, at vandfluxen fra grundvandet ud af oplandet kun er styret af grundvandsdannelse og dermed perkolationen fra rodzonen.



Figur 17. Sensitivitetsanalyser med DGSA-metoden for N-MAP-modellering ved LOOP 3. Det undersøgte modelresultat er sensitivt for de inputparametre (x-aksen), som har højere værdier end den røde linje (hk=hydraulisk konduktivitet, SY=specifik ydelse, rate=N-omsætningsraten, udvask=N-udvaskningen og rch=grundvandsdannelse).

Sensitivitetsanalysen viser, (nederst til højre i Figur 17) at det modellerede N-reduktionspotentiale er sensitivt for både den hurtige (rate_fast) og langsomme (rate_slow) N-omsætningsrate samt hydraulisk ledningsevne i enhed 1 (hk1) og den specifikke ydelse (sy1) som er en proxy for porøsiteten og dermed opholdstiden. Det giver mening, at modellen er opbygget sådan, at N-reduktionspotentialet både er styret af hydrogeologien og geokemien.

Sensitivitetsanalysen viser, at det modellerede N-reduktionskort (nederst til højre i Figur 17) er mest sensitivt for den hurtige N-omsætningsrate og dernæst den langsomme N-omsætningsrate, N-udvaskningen, den specifikke ydelse af enhed 1, hydraulisk ledningsevne i enhed 1 og den specifikke ydelse af enhed 2. Det giver mening, at modellen er opbygget sådan, at N-retentionen både er styret af hydrogeologien og geokemien samt nitratudvaskningen fra rodzonen.

6 Sammensmeltning af modelleringskoncepter

I oplægget til projektet er der beskrevet et behov for, at de nationale retentionskort sammenlægges med de retentionskort, der beregnes med N-MAP-konceptet, og at de kan integreres "sømløst". Formålet med dette kapitel er at skabe et overblik over mulighederne for at udvikle et koncept til sammensmeltning af de to tilgange for retentionskortlægning med fokus på grundvandszonen og med beskrivelse af fordele og ulemper. Derudover er formålet at afprøve anbefalinger i udvalgte ID15-oplande, som er kortlagt med N-MAP, hvis det er muligt indenfor tidsrammen af projektet. Dette kapitel beskriver tekniske muligheder for at sammensmelte de to tilgange til retentionskortlægning i grundvandszonen. De foreslåede løsninger skal ikke ses som bud på samlede løsninger til et nyt nationalt N-retentionskort i højere opløsning, da elementer som ikke direkte relateres til grundvandszonen og N-MAP konceptet ikke indgår.

6.1 Overordnede betragtninger vedrørende sammensmeltning

Med N-MAP-konceptet udarbejdes der N-retentionskort for grundvandszonen målrettet ID15-oplande. N-MAP-konceptet er specielt relevant i oplande, hvor der kan forventes en stor variation i N-retentionen i grundvandet mellem marker på grund af en heterogen geologi og/eller redoxforhold og N-omsætningsrater, samt hvor der er et behov for flere data, end der eksisterer i dag for at øge præcisionen på mindre skala.

Produktionen af N-retentionskort for grundvandszonen indenfor et ID15-opland med N-MAP-konceptet bygger på stokastiske realisationer som er baseret på kvantificering af usikkerheder på inputparametre som beskrevet i kapitel 5. Herved dannes en række lige sandsynlige modeller for N-transport og -omsætning fra rodzonen via grundvandet til vandløb. Disse modeller bygger på indsamling af detaljerede fladedækkende geofysiske data samt geologiske og geokemiske data fra undersøgelsesboringer.

Den Nationale Kvælstofmodel opgør de samlede N-retentions resultater på ID15-oplandsniveau. Grundvandsretentionen beregnes på 500 m skala og overfladevandsretentionen på ID15-niveau. Den endelige opgørelse på ID15-niveau skyldes primært at der ikke eksisterer måledata til validering af N-retention på mindre skala end ID15-opland og at der endnu ikke er arbejdet med kvantificering af usikkerheder på modelresultater på mindre skala.

En af udfordringerne med de beregnede N-transporter i grundvandet med N-MAP er at disse ikke kan valideres direkte mod N-transporten i udløbet fra ID15-oplandet. Dette vil kræve at N-MAP-konceptet udvides til også at inkludere: 1) drænfraktionering på gridcelleniveau, som angiver andelen af perkolationen fra rodzonen som ledes via dræn til vandløbet, 2) N-retention i lavbundsområder, og 3) N-retention i overfladevandet. Herudover vil der være brug for at inddrage andre kilder med N bidrag til overfladevandet (fx punktkilder og atmosfærisk deposition), før den samlede transport ud af et ID15-opland kan sammenlignes med målt N transport.

En løsning på den beskrevne udfordring vil enten være at udvide N-MAP med beregning af N-retention i alle dele af oplandet som vist i Figur 6 eller at korrigere grundvandsretentionen fra N-MAP oplande til grundvandsretentionen beregnet med Den Nationale Kvælstofmodel, der vil kunne opgøres på ID15-niveau. Dermed kan grundvandsretentionen beregnet i N-MAP blive oplandskorrigeret til den Nationale Kvælstofmodel og dermed indgå i direkte beregninger af den samlede N-retention fra rodzone til kystvande. Denne løsning vil give forbedrede resultater for N-MAP oplande, mens resten af landet vil bibeholde ID15-niveauet fra den eksisterende nationale Kvælstofmodel. Usikkerheden ved anvendelse af retention beregnet med den Nationale Kvælstofmodel direkte i en lokal N-MAP-model skal desuden beskrives og håndteres i et udvidet N-MAP-koncept.

En anden løsning kan være at udbygge Den Nationale Kvælstofmodel med den stokastiske modelleringstilgang fra N-MAP-konceptet. Det vil sige at udbygge Den Nationale Kvælstofmodel med stokastiske realisationer af hydrostratigrafi, hydrologiske parametre, redox-grænser, N-omsætningsrater, perkolationen, drænfraktion og N-udvaskning fra rodzonen. Herved kan udfaldsrummet af de stokastiske realisationer bruges til at bestemme den model-relaterede spredning og middelværdi for N-omsætning i grundvandet på gridcelleniveau. Desuden kan udbygningen af Den Nationale Kvælstofmodel også omfatte de detaljerede data fra N-MAP-kortlægningen i udvalgte oplande, fx hvor det kunne være en fordel med større præcision eller mindre skala end det eksisterende datagrundlag kan levere eller hvor undergrunden forventes at være kompleks opbygget.

Ved valg af metode til udvikling af stokastisk modellering i Den Nationale Kvælstofmodel kan der med fordel inddrages viden fra de mange forskningsprojekter, som har udviklet og analyseret forskellige metodiske tilgange. Her kan flere metoder sammenlignes for at sikre at den mest optimale metode vælges med den bedste udnyttelse af data.

I MapField er der arbejdet med to forskellige stokastiske metoder, som begge bygger på simultan modellering af hydrogeologi og redox og rate-zoner som vist i Figur 9, som resulterer i 500 lige sandsynlige modeller baseret på variationer i inputparametre:

- Metode som er beskrevet i afsnit 4.2.5 hvor de hydrostratigrafiske enheder konstrueres med ACT (akkumuleret lertykkelse) efterfulgt af clusteranalyse og redox-rate-strukturer samt DS (Direct Sampling)
- Alternativ metode som beskrevet af (Madsen *et al.* 2021) hvor hydrogeologien baseres på modellering af geologiske elementer og redox-rate-strukturer samt DS (Direct Sampling).

I løsningsmodeller i dette kapitel er der taget udgangspunkt i en stokastisk tilgang i Den Nationale Kvælstof model som baseres på ML med følgende trin:

- I. Stokastiske realisationer af eksisterende hydrogeologiske modeller
 - Vurdering af usikkerhed på tolkningspunkter/elementer

- Dannelse af population med stokastiske realisationer af tolkningspunkter/elementer
 - Interpolation af geologiske flader ud fra hver af de stokastiske realisationer med hjælp af en MLsmodel, der bruger rumligt distribueret input variable som fx topografi, jordartskortet og geofysik til at lave en "intelligent" interpolation
 - Gennemførelse af flade-justering/konsistens-tjek af tolkningselementer og tolkningskoncept per stokastisk realisation
- II. Stokastiske realisationer af redox-strukturer med tilhørende N-omsætningsrater
- Vurdering af usikkerhed på "observationsdata" (farveskift, vandkemi, rater etc.)
 - Dannelse af population med stokastiske realisationer af "observationsdata"
 - Dannelse af multiple redox-grænser
 - Gennemførelse af flade-justering / konsistens-tjek af observationsdata per stokastisk realisation
- III. Stokastiske realisationer af N-udvaskning fra rodzonen
- Samme metodik som N-MAP-konceptet bare i grid-opsætningen i Den Nationale Kvælstofmodel
- IV. Stokastiske realisationer af hydrogeologisk parameter-usikkerhed
- Estimering af modelparameters udfaldsrum fra kalibreringsresultat af basismodel (ud fra centralt bud på tolkningspunkter, redox-forhold, og N-udvaskning)
 - Stokastiske realisationer af modelparametre
- V. Stokastiske realisationer af gridcelle N-retention med N-model
- Dannelse af multiple modelopsætninger ud fra kombinationer af I, II, III og IV
 - Simulering af N-transport og omsætning med de multiple modelopsætninger
 - Beregning af spredning og middelværdi af N-omsætning på gridcelleniveau ud fra simuleringer af N-omsætning for hver af modellerne

Det skal bemærkes at der selv ved fuldstændig sammensmeltning af de to koncepter ikke gennemføres analyser af usikkerheden relateret til drænstrømning/drænfraktionering, da der endnu ikke er udviklet en metodik for håndteringen af denne. Med udviklingen af en metode til beskrivelse af usikkerheden på N-retention relateret til dræning, så vil dette element relativt uproblematisk kunne indbygges/adderes i alle fire løsninger. Dette vil give en mere komplet beskrivelse af usikkerheden på N-retention indenfor et ID15-opland. Det skal også bemærkes at de stokastiske realisationer i den beskrevne form ikke inddrager usikkerhedsanalyser af overfladevands retention, og at hvis overfladevandsretentionen skal differentieres under ID15-niveau, så vil dette formentligt kræve dataindsamling og metodeudvikling relateret til overfladevand.

6.2 Løsning 1 – Afstemning af grundvandsretentionen fra N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel

Formål

I løsning 1 kan der gennemføres en afstemning af N-retentionen i grundvandet fra N-MAP med N-retentionen i grundvandet fra Den Nationale Kvælstofmodel. Afstemningen af N-retentionen for grundvandet i N-MAP-modellen med Den Nationale Kvælstofmodel kan sikre konsistens mellem den gennemsnitlige N-retention på ID15-oplandsniveau fra rodzone til kystvande og konsistens mellem den gennemsnitlige N-retention indenfor ID15-oplandet fra rodzone til vandløbskant.

Udvikling i N-MAP

Afstemningen kan foregå ved at N-transporten fra grundvandet til vandløbet i N-MAP afstemmes mod grundvandsdelen af N-transporten fra Den Nationale Kvælstofmodel. Dette kan blive udført for hvert ID15-opland, hvor der opstilles en N-MAP-model. Før afstemningen vil der være brug for en ændring af N-MAP-modelleringen, sådan at drænfraktionering og N-omsætning i lavbundslande håndteres ens i de to modelopsætninger. Ligeledes vil der være brug for at NLES5 udvaskningsberegningerne afstemmes i de to modeller, sådan at den samlede N-udvaskning fra rodzonen er ens i middel.

Der er i denne løsning mulighed for at udvide N-MAP og inkludere N-retention i alle dele af oplandet som vist i Figur 6.

Udvikling i Den Nationale Kvælstofmodel

Der laves ingen udvikling i Den Nationale Kvælstofmodel.

Forventede resultater

Med løsning 1 arbejdes der videre med det landsdækkende resultat fra den Nationale Kvælstofmodel, så der foreligger N-retentionskort differentieret under ID15-niveau for udvalgte relevante oplande, hvor N-MAP-konceptet er implementeret. Den Nationale Kvælstofmodel dækker hele landet, men kun for de oplande, hvor der er gennemført en N-MAP-modellering vil der opnås en differentiering af N-retentionen indenfor ID15-oplandet med en gridcellestørrelse på 25 × 25 m.

Med afstemningen under løsning 1 sikres en sammenhæng mellem gennemsnitsretentionen på ID15-niveau fra rodzone til kystvande og variationen i retention fra rodzone til vandløbskant indenfor ID15-oplandet og at der samtidig gennemføres stationskorrektion.

6.3 Løsning 2 – Stokastisk simulering i Den Nationale Kvælstof-model

Formål

I Løsning 2 indbygges stokastisk modellering i Den Nationale Kvælstofmodel, der bl.a. bygger på ML og der indgår udelukkende eksisterende data som pt. indgår i Den Nationale Kvælstofmodel. Formålet med den stokastiske modellering er at beskrive betydningen af usikkerheden relateret til den hydrogeologiske model på retentionsforskelle indenfor oplandet. Det overordnede koncept fra N-modellen med bias- og stationskorrektur vil fortsat kun kunne gennemføres på oplandsniveau, da det er afhængigt af tilgængeligheden af afstrømningsmålinger.

Udvikling i N-MAP

Der laves ingen udviklinger i N-MAP, da denne ikke direkte indgår i Løsning 2.

Udvikling i Den Nationale Kvælstofmodel

Der er mulighed for at vælge forskellige metoder til stokastisk modellering i Den Nationale Kvælstofmodel. I Løsning 2, som beskrives her, kan der tages udgangspunkt i opsætningen af de stokastiske realisationer med data fra de hydrogeologiske modeller, der stammer fra 3D tolkningsdatabasen (DK-model2019 / tolkningsdata fra grundvandskortlægningen). Hydrogeologien simuleres ved stokastisk modellering på baggrund af en intelligent interpolation af geologiske flader med hjælp af tolkningspunkter. Interpolationen vil honorere forskellige usikkerhedsniveauer associeret til tolkningspunkter.

Den stokastiske realisation af redox-forholdene baseres på ML, mere præcist multivariate regressionsmodeller til simulering af flere redox-zoner i undergrunden. De stokastiske realisationer bygger på farveskift data (fra eksisterende ML-model for redox) og vandkemi data (redox vandtyper) fra Jupiter og momentan omsætning af kvælstof. Udvidelsen indebærer, at der potentielt vil være transportveje, som medfører, at der kan optræde oxideret/nitratholdigt vand under overliggende reducerede zoner. Modeludvidelserne vil kræve en genkalibrering af N-modellen.

Opløsningen vil være grovere end N-MAP-modelleringen, da grundvandsretentionsberegningerne i Den Nationale Kvælstofmodel opsættes og beregnes i 500 x 500 m og spredningen på N-udvaskningen kvantificeres med NLESS til 500 x 500 m skala.

Der er mulighed for at arbejde med en anden metode for stokastisk modellering.

Forventede resultater

Med Løsning 2 opnås et landsdækkende N-retentionskort, hvor grundvandsretentionen er differentieret under ID15-niveau. Udbygningen af Den Nationale Kvælstofmodel med stokastisk modellering af hydrogeologi og redox-forhold giver mulighed for kvantificering af variationen i N-retentionen i grundvandet indenfor ID15-oplandet relateret til hydrogeologi og redoxforhold.

Med løsning 2 sikres en direkte sammenhæng mellem gennemsnitsretentionen på ID15-niveau fra rodzone til kystvande og variationen i retention fra rodzone til vandløbskant indenfor ID15-oplandet og at der samtidig gennemføres stationskorrektur.

6.4 Løsning 3 – Stokastisk simulering i Den Nationale Kvælstof-model og integration af data fra N-MAP

Formål

Løsning 3 kan bygge videre på løsning 2 med stokastisk modellering med ML af hydrogeologi og redoxzoner indbygget i Den Nationale Kvælstofmodel, hvor gridcellerne reduceres fra 500×500 m til 100×100 m. Der kan foretages N-MAP-dataindsamling i udvalgte oplande og Den Nationale Kvælstofmodel kan blive opsat på en kombination af eksisterende data og nye detaljerede data fra N-MAP-kortlægningen. Ligesom ved løsning 2, så er formålet med den stokastiske modellering at beskrive betydningen af usikkerheden relateret til den hydrogeologiske model på retentionsforskelle indenfor oplandet. Det overordnede koncept fra N-modellen med bias- og stationskorrektur vil fortsat kun kunne gennemføres på oplandsniveau, da det er afhængigt af tilgængeligheden af afstrømningsmålinger.

Udvikling i N-MAP

Der kan foretages en prioritering af oplande til N-MAP-kortlægning og dataindsamling baseret på prioriteringsværktøjet udviklet i MapField (Voutchkova *et al.* 2021). Der kan arbejdes videre med den detaljerede N-MAP-dataindsamling i de udvalgte oplande hvad angår geofysiske data, geokemiske data og udvaskningsdata.

Udvikling i Den Nationale Kvælstofmodel

Der er mulighed for at vælge forskellige metoder til stokastisk modellering i Den Nationale Kvælstofmodel. I løsning 3, som beskrives her, kan der tages udgangspunkt i stokastiske realisationer af de hydrogeologiske modeller med data, som stammer fra 3D tolkningsdatabasen (DK-model2019 / tolkningsdata fra grundvandskortlægningen), lokale geofysiske modeller evt. suppleret med nye data fra N-MAP-kortlægningen. Stokastiske realisationer af redox-zoner kan baseres på farveskift-data (fra eksisterende ML-model for redox), vandkemi data (redox-vandtyper) fra Jupiter og evt. de nye geokemiske data fra N-MAP. Udvidelsen indebærer, at der potentielt kan være transportveje, som medfører, at der kan optræde nitratholdigt vand under reducerede lag. Modeludvidelsen vil kræve en egentlig gen-kalibrering af N-modellen.

I løsning 3 er der mulighed for at indbygge tilgangen fra N-MAP med simulering af N-omsætningen i 3D-redoxzoner med forskellige omsætningsrater for nitrat.

Grundvandsretentionsberegningerne i Den Nationale Kvælstofmodel opsættes i 100×100 m og spredningen på N-udvaskningen kvantificeres med NLESS til 100×100 m skala.

Forventede resultater

Med løsning 3 opnås et landsdækkende N-retentionskort, hvor grundvandsretentionen er differentieret under ID15-niveau på finere skala end i løsning 2, ligesom der i løsning 2 sikres en direkte sammenhæng mellem gennemsnitsretentionen på ID15-niveau fra rodzone til kystvande og variationen i retention fra rodzone til vandløbskant indenfor ID15-oplandet og der samtidig

gennemføres stationskorrektur. Samtidig sikrer løsningen mulighed for direkte at udnytte data fra N-MAP-kortlægning i udvalgte oplande.

6.5 Løsning 4 – Detaljeret N-retention med ML i Den Nationale Kvælstofmodel

Formål

Løsning 4 kan bygge videre på løsning 3 og tager udgangspunkt i en opsætning af Den Nationale Kvælstofmodel i finere skala for udvalgte oplande og en fuld opsætning af Den Nationale Kvælstofmodel i 100 m grid-opsætning for hele landet. Der kan blive udviklet en ML-model (ML) for opgørelse af N-retention på finere skala for hele landet på baggrund af lokal forfinede modeller for udvalgte oplande. Formålet med løsning 4 er at nedskalere de landsdækkende 100 x 100 m N-retentions resultater til 20 x 20 m skala. Ligesom ved løsning 2, så er formålet med den stokastiske modellering at beskrive betydningen af usikkerheden relateret til den hydrogeologiske model på retentionsforskelle indenfor oplandet. Det overordnede koncept fra N-modellen med bias- og stationskorrektur vil fortsat kun kunne gennemføres på oplandsniveau, da det er afhængigt af tilgængeligheden af afstrømningsmålinger.

Udvikling i N-MAP

Der kan arbejdes videre med udviklingen af N-MAP fra løsning 3. Der kan foretages en prioritering af oplande til N-MAP-kortlægning baseret på prioriteringsværktøjet udviklet i MapField (Voutchkova *et al.* 2021). Der kan arbejdes videre med den detaljerede N-MAP-dataindsamling i de udvalgte oplande hvad angår 1) geofysiske data, 2) geokemiske data og 3) udvaskningsdata.

Udvikling i Den Nationale Kvælstofmodel

Den Nationale Kvælstofmodel opsættes for hele landet i 100 m grid-opsætning med stokastisk simulering af geologi og redox-zoner/rater-zoner som i løsning 3. Parallelt med 100 m grid-opsætning kan der blive udviklet N-submodeller for ID15-oplande i 20 m skala baseret på de samme data som 100 m opsætningen for udvalgte oplande. Nedskalering kan gennemføres med en ML-rutine, der lærer sammenhænge mellem N-retention og usikkerhed på 100 m og 20 m grid i områder, hvor submodeller er sat op.

Forventede resultater

Med løsning 4 opnås et landsdækkende N-retentionskort differentieret under ID15-niveau. På baggrund af resultater fra Den Nationale Kvælstofmodel og submodellerne forventes det at en ML-rutine kan overføre sammenhængen mellem den grove og den fine skala fra submodeller til et landsdækkende produkt i fin skala, og at der kan arbejdes med at identificere type-oplande.

Tabel 3 herunder opsummerer fordele og ulemper ved de præsenterede løsningsforslag 1-4 for sammensmeltning af N-MAP og Den Nationale Kvælstofmodel. På grund af tidsrammen for dette projekt har det ikke været muligt at afprøve løsningerne i udvalgte ID15-oplande.

Indhold	Løsning 1	Løsning 2	Løsning 3	Løsning 4
Titel	Afstemning af grundvandsretentionen fra N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel	Stokastisk simulering i Den Nationale Kvælstofmodel	Stokastisk simulering i Den Nationale Kvælstofmodel og integration af data fra N-MAP	Detaljeret N-retention med ML i Den Nationale Kvælstofmodel
Mulighed for udvælgelse af N-MAP oplande baseret på prioriteringsværktøjet fra MapField	Ja	Nej	Ja	Ja
Mulighed for nye data fra N-MAP	Ja	Nej	Ja	Ja
Udvikling i N-MAP	Modellering i N-MAP tilpasses Den Nationale Kvælstofmodel Mulighed for udvidelse af N-MAP til at inkludere N-retention i hele oplandet	Nej	Geofysisk og geokemisk dataindsamling, samt detaljeret N-udvaskning.	Geofysisk og geokemisk dataindsamling, samt detaljeret N-udvaskning.
Udvikling i Den Nationale Kvælstofmodel	Nej	Stokastisk modellering af hydrogeologi og redox-zoner/rate-zoner	Videreudvikling af løsning 2 med mulighed for integration af detaljerede N-MAP-data	Videreudvikling af løsning 3 med udvikling af metode for detaljering af skala
Landsdækkende	Ja, men kun detaljeret for udvalgte oplande	Ja	Ja	Ja
Skala (grid str.)	25 m i N-MAP oplande, 500 m i resten af landet	500 m	100 m	20 – 100 m
Stationskorrigerede resultater	Ja	Ja	Ja	Ja
Nøjagtighed kvantificeret	ID15-niveau	ID15-niveau	ID15-niveau	ID15-niveau
Udviklingsbehov	Ja, lille	Ja, lille	Ja, stort	Ja, meget stort

Tabel 3. Opsummering af fordele og ulemper ved løsningsforslag 1-4 for sammensmeltning af N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel.

7. Numeriske analyser

Formålet med dette kapitel er at udføre analyser med brug af de beregningsmetoder der er udviklet i N-MAP-konceptet til at understøtte en evt. sammensmeltning af N-MAP-konceptet og Den Nationale Kvælstofmodel til N-retentionskortlægning. Dette gøres ved at en række forhold undersøges med N-MAP's numeriske modelleringskoncept:

- Redoxgrænsens beliggenhed: Det skal undersøges om usikkerheden ved ikke at have detailkendskab til placeringen af redoxgrænsen og/eller omsætningsrater har væsentlig indflydelse på usikkerheden på retentionsestimatet.
- Tilstedeværelsen af dræn: Det skal undersøges om usikkerheden ved ikke at have detailkendskab til placering af dræn har væsentlig indflydelse på usikkerheden på retentionsestimatet og om de endelige retentionsestimater får systematisk bias.
- Usikkerheden på NLES5-beregninger af N-udvaskningen fra rodzonen på forskellig skala: Det skal undersøges hvilken betydning det har for den samlede usikkerhed.
- Sammenligning af målt og modelberegnet N-transport på deloplandsniveau i udvalgte oplande i rOPEN og MapField: Dette til kontrol af at konceptet kan fordele N-retentionen opnået for hele oplandet og til de forskellige deloplande.

Disse analyser er endnu ikke færdiggjorte og vil blive rapporteret senere i et fælles notat fra DCE, DCA og GEUS, hvor DCE er ansvarlig for leveringen.

8. Implementering af løsningsmodeller

I dette kapitel beskrives løsningsmodeller for implementering af N-MAP-konceptet. Jævnfor projektbeskrivelsen har kapitlet følgende formål:

- At vurdere om en kortlægning med N-MAP-konceptet kan overføres til andre oplande af tilsvarende type.
- At undersøge i hvilke områder det nationale retentionskort giver et tilstrækkeligt grundlag for regulering, samt at undersøge i hvilke områder N-MAP-konceptet med fordel kan anvendes.
- At undersøge udfordringer på tid og økonomi og udarbejde anbefalinger for mulig optimering samt anbefalinger vedr. anvendelse af konceptet i større testområder.

8.1 Udviklingsbehov

I dette afsnit vurderes det på baggrund af analyserne i de tidligere arbejdsplaner og anden erfaring, hvordan ny viden vil kunne bidrage til at mindske usikkerheden yderligere på de beregnede N-retentionskort med begge tilgange, dvs. både med N-MAP-konceptet og Den Nationale Kvælstofmodel.

I de første 6 underafsnit herunder beskrives fundamentale udviklingsbehov for mere detaljeret N-regulering:

- N-udvaskningen med NLES5
- N-retention i overfladevandssystemet
- Lavbund og ådale
- Dræn
- Tidsforsinkelse i N-transport mellem rodzone og vandløb
- N-omsætning i undergrunden
- Opbygning af undergrunden
- Nye måledata for N og Q indenfor udvalgte ID15-oplande

I de sidste 2 underafsnit beskrives specifikke udviklingsmuligheder for Den Nationale Kvælstofmodel og N-MAP-konceptet.

8.1.1 N-udvaskning med NLES5

Her beskrives overordnet udviklingsbehov for NLES5-udvaskningsmodellen:

- At indarbejde usikkerhed på den beregnede NLES5-udvaskning på markniveau. I den nuværende beregning af NLES5-udvaskning i Den Nationale Kvælstofmodel indgår ikke usikkerhed på den beregnede udvaskning for ID15-oplandene.

- At analyse af om datagrundlag for udvaskning kan afgrænses til årene med registerdata 2005-2016 og opgøre, hvor meget usikkerheden på NLES5-udvaskningen bliver mindre ved at anvende denne kortere periode med mere detaljerede landbrugsdata frem for årene 1990-2004, hvor der kun er sogndata for dyrkningsdata. Oplande med stor tidsforsinkelse vil have brug for en lang tidsserie for NLES5-udvaskning. Det analyseres hvad usikkerheden er på NLES5-udvaskning ved at bruge sogndata frem for aktuelle landbrugsdata fra LOOP-oplandene.
- At sammenholde perkolation med vandbalanceberegningen i Den Nationale Kvælstofmodel og opdatere vandbalanceberegningerne, der indgår i NLES5 for landbrugsarealer og de øvrige naturarealer i Den Nationale Kvælstofmodel.
- At indarbejde og teste ny model for fordeling af vand- og nitratudvaskning fra rodzonen til drænsystem og transport via dybere jordlag.
- At opdatere udvaskningen fra 2011 til det seneste år, 2020, med opdaterede landbrugsdata – specielt mht. indførte virkemidler (efterafrøder) implementeret i de seneste år. Desuden baseret på en ny kalibrering af Daisy - modelberegnet baseret på opdaterede vejrdato (nedbør, globalstråling og temperatur) og længere måleserier for vandtransport til havet.
- At forbedre og opdaterede jord og landbrugsdata som grundlag landsdækkende udvaskningsberegninger.
- At forbedre NLES5-modelberegninger for lavbundslande.

8.1.2 N-retention i overfladevandssystemet

Her beskrives overordnet udviklingsbehov for beskrivelse af N-retention i overfladevandssystemet:

- Indarbejde ny model for N-retention i vandløb
 - Som minimum indførelse af en maksimal kg N/ha/måned fjernelse.
- Opdatere beregning af N-retention i store søer.
 - Ligning for beregning af N-retention i store søer skal opdateres, da den giver for lav fjernelse i varme måneder.
- Opdatere beregning af N-retention i små søer.
 - Den nuværende model giver i nogle tilfælde en for høj N-retention. Der kan måske indarbejdes en grænseværdi for hvor høj N-retentionen kan være i små søer som andel af tilført N.
 - Det undersøges om der skal være en grænse ved andel af belastning fra oplande til små søer.
 - Det undersøges om der kan etableres en model for små afløbsløse søer.
- Opdatering af model for konstruerede vådområder
 - Inddragelse af monitoringsdata fra flere vådområder. Forskellige typer naturlige vådområder med separate del-modeller.
- Inkludering af matricevådområder (drænvandsrensningsmodeller), minivådområder, og intelligente buffer-zoner.
- Atmosfærisk deposition er en kilde til reaktivt N for store søer. Det bør også estimeres et input på vandløbsoverflader.

- Overvejelser om hvilken metodisk tilgang der er bedst for overfladevandbeskrivelsen.
- Overvejelser omkring om der kan skelnes mellem retention af organisk bundet N og nitrat. Organisk N beregnes med nyt korrigeret målegrundlag fra 2021. Det er vanskeligt at få til at fungere, da det kræver to parallelle modeller og en beskrivelse af optag og mineralisering.

8.1.3 Lavbund og ådale

Der er brug for udvikling af viden om lavbund og ådale:

- Mere viden om hvor meget drænvand og grundvand som transporteres via ådale til vandløbskanten.
- Mere viden om grundvands- og overfladevandsinteraktionen for vand og næringsstoffer.

8.1.4 Dræn

Der er brug for udvikling af metoder til beskrivelse af dræn:

- Mere viden om hvor stor en del af udvaskningen fra rodzonen som transporteres via dræn direkte til vandløbskanten uden at blive omsat.
- Bedre viden om hvilke marker, der er drænet:
 - Undersøge muligheder ift. at Staten kan indhente oplysninger hos landmænd i tilknytning til indberetning i forbindelse med hektarstøtte.
 - Kortlægge lavbund og vandlidende arealer ud fra ældre matrikelkort eller målebordsblade.
- Udvikling/test af nye teknikker til at kortlægge drænedede arealer
 - Analyse af fly/dronefoto.
- Udarbejde forbedrede teknikker til kortlægning af dræn på lokalt niveau.
- Bedre modeller for beskrivelse af i hvilket omfang drænene er aktive samt beregning af drænmængder.
- Opsamling af erfaringer fra igangsatte projekter om dræn, fx T-REX.

8.1.5 Tidsforsinkelse i N transport mellem rodzone og vandløb

Kvælstofkoncentrationerne i danske vandløb er faldet markant, men der er betydelige forskelle vandløbene imellem. I enkelte vandløb er der ingen eller kun et ringe fald. En af årsagerne hertil kan være, at der i nogle oplande er en betydelig forsinkelse før ændringer i kvælstoftabet fra de dyrkede marker slår igennem på kvælstofkoncentrationer i vandløb. I nogle vandløb er udviklingen parallel med udviklingen i den nationale erhvervsbalance for kvælstof, mens der i andre (fx Kastbjerg å og Villestrup å) ses en afkobling mellem udvikling i koncentration og balance. Det skal undersøges om udviklingen i den nationale markbalance for kvælstof er en brugbar overordnet variabel, der medvirker til at beskrive den generelle udvikling. Markbalancen udgør en

vigtig variabel i den kvælstofmodel, der i NOVANA bruges til at estimere kvælstofkoncentrationer og –transport i de umålte oplande. Når der i forbindelse med Vandplanerne skal vurderes, hvordan de udmeldte målbelastninger for kvælstof skal nås til de enkelte fjorde/kystafsnit, er det vigtigt at kunne fremskrive udviklingen i kvælstoftilførslerne uden yderligere tiltag. Det er derfor vigtigt at tidsforsinkelse mellem rodzone og vandløb er korrekt indarbejdet i N-retention-skortet. Ud fra analyser af ændringer i markbalance og ændringer i kvælstoftransporten i vandløb kan der opgøres en tidsforsinkelse for udvalgte målte oplande. Analyse af strømningsveje, dybde af nitratholdige grundvandsforekomster mv. vil kunne bidrage til at overføre denne tidsforsinkelse til umålte oplande.

8.1.6 N-omsætning i undergrunden

I de sidste fire år er der taget et stort skridt fremad med hensyn til dataindsamling, analyser, fortolkninger og 3D-modellering af nitratudbredelse, transport og reduktion i grundvandszonen i rOPEN og MapField. Der er udviklet nye tilgange til at designe feltarbejdet til indsamling af centrale og vigtige geokemiske data i et ID15-opland baseret på geologisk viden og i samarbejde med virksomheden Ejlskov.

Derudover er der udviklet en laboratoriemetode til bestemmelse af N-reduktionsraterne tilpasset grundvandszonen i Geokemisk Afdeling ved GEUS. Stokastiske modelleringstilgange til geokemisk opskalering af information i borer til hele det hydrologiske opland er blevet udviklet ved integration til højopløselige geofysiske data på oplandsniveau. Disse resultater har fremhævet vigtigheden af 3D-kortlægning og fortolkning af undergrundens redoxstrukturer og stedspecifikke målinger af N-reduktionsrater til modellering af N-transport og bestemmelse af N-retentionen på markniveau.

En geokemisk udfordring er at opskalere data fra lille skala om N-reduktionsrater målt på sediment fra kerneboringer via grid-skalaen anvendt i modelleringen og derfra til oplandsskalaen. Desuden har den nuværende acetylen-blok-laboratoriemetode til bestemmelse af N-reduktionsrater en række udfordringer mht. forstyrrelse af sedimentet i forbindelse med udførelsen af kerneboringen og forstyrrelse i forbindelse med opsætning af laboratorieanalyserne.

Forskningsområdet er relativt nyt og der kan identificeres udviklingsmuligheder som kan reducere usikkerheden og muligvis også prisen:

- Der er behov for at udbrede de udviklede geokemiske metoder til flere ID15-oplande for at opnå viden til vurdering af om generalisering er muligt, fx hvad angår identifikation af geokemiske typeoplande.
- Der er behov for at arbejde videre med opskalering af den kemiske viden fra borer til oplandsniveau ved integration til geologiske og geofysiske data fx ved geostatistisk bearbejdning af indsamlede data fra flere ID15-oplande
- Der er behov for at undersøge og videreudvikle metoder til bestemmelse af N-omsætningsrater på oplandsskala.

- Push-pull testen (fx Kruisdijk og van Breukelen, 2021) er fx en udviklingsmulighed med hensyn til skala og opnåelse af mere repræsentative in-situ N-omsætningsrater. I en push-pull test pumpes grundvand fra en boring ind i en tank, hvor der tilsættes nitrat og en bromid-tracer. Efter prøvetagning fra tanken reinjiceres grundvandet i boringen. Efter en forsinkelse, afhængigt af forventede N-omsætningsrater og grundvandsstrømningshastigheder, prøvetages der fra boringen og der måles for nitrat og bromidtraceren over tid. På denne måde kan repræsentative rater bestemmes for sedimentvoluminet omkring boringen. Denne skala svarer til modelgrid-skalaen, men der er også et behov for at kunne opskalere resultaterne til skalaen for cluster-elementerne.
- Der er også behov for kritisk at gennemgå litteraturen for andre mulige metoder
- Boringerne udført i rOPEN og MapField nåede maksimalt ned til ca. 25 meter dybde. Der er behov for at udvikle andre boremetoder til brug i områder med en dyb umættet zone og derved et dybt grundvandsspejl specielt hvad angår geokemisk prøvetagning af sandede grundvandssedimenter.
- Der er behov for mere viden om N-reduktion i den umættede zone. Den umættede zone betragtes overordnet som iltet, men hvilken betydning har reducerede forhold i lokale zoner på reduktion af N? Dette kan undersøges ved at kombinere geofysiske og geokemiske metoder med måling af N-emissioner, som også vil være vigtige når mulige effekter af klimaforandringer undersøges.

8.1.7 Opbygning af undergrunden under rodzonen

Bedre opløsning af den allerøverste geologi, så højtstående grundvand og dræn kan modelleres bedre. Fx ved udvikling af et forbedret geofysisk instrument med øget opløsning af de øverste 4 meter.

8.1.8 Udviklingsmuligheder med Den Nationale Kvælstofmodel

Den Nationale Kvælstofmodel er udviklet i samarbejde mellem GEUS, DCA og DCE. Her beskrives overordnet hvilke områder i Den Nationale Kvælstofmodel, der med fordel kan opdateres og/eller udvikles:

- Forbedret modellering af overfladevand:
 - Revideret kortgrundlag (ID15)
 - Meget små ID15-oplande fungerer dårligt, skal slås sammen med andre ID15-oplande.
 - Opdatering af mangler i det nuværende kort som er identificeret.
 - Undersøgelse af om ID15-kortet kan neddeles i mindre oplande til IDX.
 - Vandløbskort (nyeste/den fælles vandløbsreference).
 - Søkort (nyeste). Dette vil nogle steder kræve et nyt ID15-kort.
 - At få ændret beregningsrækkefølgen på nogle elementer, fx at få punktkilder lagt på den gennemstrømmede del.

- Indbygge minivådområder, matrice-vådområder mm.
- Naturlige vådområder:
 - Indarbejdelse af flere typer vådområder.
 - Kan N-retention i naturlige vådområder adskilles fra N-omsætningen på redoxgrænsen i grundvandszonen?
- Konstruerede vådområder
 - Der mangler en del ældre konstruerede vådområder i opsætningen
- Det er velkendt at Den Nationale Kvælstofmodel ikke har en korrekt tidsforsinkelse for oplande omkring Mariager Fjord og Limfjorden. Der er desuden flere mindre oplande, hvor tidsforsinkelsen er længere end tidsforsinkelsen fra modellen.
 - Klimadata griddet for før 1990 (fx 1980) vil være godt for initialisering af modellen.
 - Empirisk analyse af sammenhænge mellem kvælstofbalancer og afstrømningsvægtede koncentrationer for målte oplande.
 - Udvikling af modul for forsinkelse- og opblanding i umættet zone.
- Kalibrering og validering på månedligt tidsskridt frem for periode-balancer.
- Dræn
 - Metodeudbygning, validering og kalibrering af drænfraktionering.
 - Indarbejde drænafrænsninger.

Endelig kunne der være en fordel at udvide kalibreringen af Den Nationale Kvælstofmodel med lokale målinger af vandtransport og N-transport. Her kunne landmands-initiativpligten (indført med Landbrugs og fødevarepakken tilbage i 2016) udnyttes til at forbedre datagrundlaget til forståelse af vandtransporten mellem dræn, øvre grundvand og dybt grundvand, samt bruges til at kvantificere modelresultater på ID15-deloplands niveau.

8.1.9 Udviklingsmuligheder med N-MAP-konceptet

En række af de udviklede værktøjer i N-MAP-konceptet baserer sig på kortlægningen af ét ID15-opland, og der er brug for en undersøgelse af en mulig forsimpning ved at kortlægge i sammenhængende områder:

- Hvilken besparelse vil der være ved implementering af N-MAP i flere sammenhængende ID15-oplande, som er en del af det samme store hydrologiske opland? Der forudses en besparelse ved modelleringen, men ikke på selve dataindsamlingen. Det skyldes, at detaljeringsgraden skal bevares af både den hydro-stratigrafiske og geokemiske kortlægning og modellering, samt det resulterende N-retentionskort for grundvandszonen (løsning B i afsnit 8.2.1)?
- Hvilken betydning vil en grovere geofysisk kortlægning og færre geokemiske borer have i forhold til besparelse og detaljeringsgraden af de hydro-stratigrafiske og N-omsætningsmodeller samt det resulterende N-retentionskort for grundvandszonen (løsning C i afsnit 8.2.1)?

Desuden har N-MAP-kortlægningen i MapField af to oplande (demoområderne) til Skive Fjord i Limfjorden sat fokus på følgende problemstilling:

- Hvilken betydning har det direkte grundvandsbidrag med N til marine områder? Den detaljerede kortlægning i demoområderne ved Salling viser et fint netværk af begravede dale og sandede grundvandsmagasiner med direkte forbindelse til Skive Fjord. Spørgsmålet er, hvor stor den direkte N-udstrømning via grundvand i begravede dale med lave N-omsætningsrater er til et følsomt marint område som Limfjorden eller andre kystnære områder?

Generelt er der i N-MAP mulighed for at arbejde videre med følgende specifikke problemstillinger i forhold til betydningen for N-retentionen:

- Usikkerhedsbeskrivelse af alle input-parametre, fx N-udvaskningen
- Øget geokemisk forståelse for N-omsætningen i grundvandszonen
- Bedre indarbejdelse af dræn på baggrund af eksisterende (sandsynligheden for dræn) og ny viden
- Indarbejdelse af N-retention i andre dele af landskabet i et ID15-opland end grundvandszonen og dræn, såsom overfladevandssystemet og lavbund

8.2 Tekniske kompromiser for implementering på nationalt niveau

I dette afsnit vurderes de tekniske kompromiser for at nedbringe prisen per hektar for implementering af N-MAP-konceptet på nationalt niveau. Fx vurderes det om N-MAP-konceptet kan overføres til andre oplande af tilsvarende type i forhold til generalisering af fx: 1) geologiske forhold og 2) redox-forhold og omsætning af nitrat samt 3) drænforhold.

8.2.1 Implementering af N-MAP på ID15-oplandsniveau

Omkostningerne ved implementering af N-MAP på oplandsniveau er vist i Tabel 4. Her vises et overslag over omkostningerne per ha landbrugsareal ved implementering af N-MAP's aktiviteter i de 5 trin, som er vist i Figur 7 og nærmere beskrevet i afsnit 4.2. Selve kortlægningen og fortolkningen af data (trin 2-5) udgør hovedparten af prisen (87 %) og ligger på ca. 1.017 DKK per hektar.

Total set ligger overslaget på ca. 1.76 mil. DKK for 1500 ha landbrugsareal, hvilket giver en pris på 1.175 DKK per hektar. Den geofysiske kortlægning og den geokemiske dataindsamling fra borerer udgør ca. 46 % af prisen, mens det kemiske laboratorieanalysearbejde ligger på ca. 10 %, fortolkning og modellering på 35 % og implementering i trin 5 udgør ca. 9 % af den samlede pris.

Tabel 4 skal læses med en række forbehold. Overslagene baserer sig på vurdering af omkostningerne på baggrund af forbrug af ressourcer i MapField estimeret ud fra erfaringer fra de involverede forskningsinstitutioner. Ved afslutningen af MapField har ikke alle aktiviteter og teknologier nået det samme teknologiske modenhedsniveau i forhold til kommerialisering. Prisen på de geokemiske analyser er vurderet på baggrund af omkostningerne i det geokemiske laboratorium på GEUS. Derudover er prisen på beregning af N-udvaskningen sat relativt lavt. Prisen på modellering bygger på erfaringerne fra Institut for Geoscience på Aarhus Universitet.

Tabel 4. Overslag over omkostninger for implementering af N-MAP's 5 trin på 1500 ha landbrugsjord og per ha landbrugsareal. Nærmere beskrivelse af aktiviteterne i trinene findes i afsnit 4.2 og i Figur 7.

Trin	Aktiviteter	Pris (DKK)	Pris (DKK pr. ha)	Pris i %
1	Eksisterende viden	87.500	58	5
2	Scanning af undergrunden	745.000	497	42
3	Undersøgelse af centrale steder	402.000	268	23
4	Fremstilling af N-retentionskort	378.000	252	21
5	Implementering med interessenter	150.000	100	9
Total		1.762.500	1.175	100

Indtil videre har N-MAP-konceptet været afprøvet i 8 ID15-oplande (Sillerup, Javngyde, LOOP 2, 3, 4 og 6 samt demoområderne ved Salling) og det er vist, at der opnås helt ny viden om undergrundens kompleksitet både med hensyn til geologiske strukturer og redoxforhold (Sandersen *et al.* 2021, Sandersen and Kallesøe 2021, Hansen *et al.* 2021, Kim *et al.* 2021). Det vurderes derfor ikke p.t. muligt at overføre N-MAP-konceptet til andre oplande af tilsvarende type i forhold til generalisering af fx: 1) geologiske forhold og 2) redox forhold og omsætning af nitrat samt 3) drænforhold.

Der er derfor arbejdet med 3 løsninger med henblik på at vurdere muligheder for, hvordan prisen på implementering af N-MAP-konceptet og teknologier kan nedbringes. Tabel 5 giver et overblik over pris, produkter, gridcelle-størrelse og detaljeringsniveau ved de tre løsninger.

Løsning A: Gradvis implementering af N-MAP

I løsning A implementeres N-MAP-konceptets trin gradvist i form af stop-and-go kriterier for et ID15-opland, idet implementeringen kan afsluttes efter hvert trin, hvis det viser sig, at der ikke er potentiale for differentieret N-regulering mellem marker indenfor ID15-oplandet (Tabel 5). I første trin skabes der et overblik over eksisterende data og viden, hvor kompleksiteten af undergrunden vurderes samt niveauet af N-udvaskning og dræning. Det kan fx gøres ved vurdering af forskellige GIS-kort. På dette grundlag besluttet det, om der skal ske en videre implementering af trin 2, hvis analysen i trin 1 bekræfter potentialet for differentieret regulering på markfladen indenfor ID15-oplandet. Ligeledes vil der efter scanningen af undergrunden under trin 2 og undersøgelse af centrale steder fra boringer under trin 3 kunne træffes en lignende afgørelse, hvis de ekstra data og viden viser, at undergrundens heterogenitet har betydning for differentieringen af N-reguleringen mellem marker indenfor oplandet. Hvis implementeringen stopper efter trin 1, 2 eller 3 vil der ikke være produceret et nyt N-retentionskort men etableret et overblik og nye detaljerede data.

Den fulde N-MAP-kortlægning og modellering foregår ved implementering af trin 1-4, hvor der produceres N-retentionskort med gridceller på 25 × 25 m ved en samlet pris på ca. 1.075 DKK pr. hektar. Ved yderligere implementering af trin 5 vil der udover det detaljerede N-retentionskort også ligge en implementeringsplan udarbejdet i et samarbejde med interessenter og myndigheder (Tabel 5).

Løsning B: Implementering af N-MAP i store oplande

I løsning B anvendes også den trinvis implementering, som vist i løsning A, dog med den forskel at implementeringen af N-MAP foregår i flere samhørende ID15-oplande, som er en del af et større hydrologisk opland. Prisen for dataindsamlingen og for tolkning af data vil være den samme som under scenarie 1, men der vil kunne opnås en mindre besparelse på selve modelleringen. Besparelsen vil være størst ved sammenlægning af mindre ID15-oplande i forhold til store ID15-oplande beliggende i det samme store hydrologiske opland (Tabel 5). Det kræver et forsknings- og udviklingsprojekt at undersøge denne mulighed nærmere, og dette er beskrevet i afsnit 8.1.8 om udviklingsbehov.

Løsning C: Grovere kortlægning med N-MAP

I løsning C anvendes en grovere kortlægning med N-MAP end i løsning A & B fx med en større geofysisk linjeafstand i kortlægningen og færre boringer til geokemisk dataindsamling. På denne måde kan prisen på dataindsamlingen reduceres og dette vil resultere i en mindre detaljeringsgrad på N-retentionskortet (Tabel 5). Det kræver et forsknings- og udviklingsprojekt at undersøge denne mulighed nærmere, og dette er beskrevet i afsnit 8.1.8 om udviklingsbehov.

Tabel 5. Implementering af N-MAP på ID15-oplandsniveau i de 3 løsninger A-C.

	Trin	Pris (DKK/ha marker)	Produkt	Grid-cel- ler	De- taljeringsniveau	Bemærkninger
Løsning A: Gradvis Implementering	1	58	Overblik over eksisterende data			Overblik vil vise om der er potentiale for differentieret regulering
	1-2	555	Detaljerede geofysiske data og geologisk notat			Scanningen vil vise om der er potentiale for differentieret regulering pga. heterogen undergrund
	1-3	823	Detaljerede geofysiske, geologiske og geokemiske data			Detail undersøgelser fra boringer vil vise om der er potentiale for differentieret regulering
	1-4	1.075	N-retentionskort	25 × 25m	100 × 100m (1 ha)	
	1-5	1.175	N-retentionskort inkl. implementeringsplan	25 × 25m	100 × 100m (1 ha)	
Løsning B: Implementering i store oplande		Mindre besparelse afhængig af antal ID15-oplande	N-retentionskort	25 × 25m	100 × 100m (1 ha)	Pris på dataindsamling vil være uændret, men selve modelleringen kan gøres en anelse billigere.
Løsning C: Grovere kortlægning		Mindre besparelse	N-retentionskort	25 × 25m	Mindre detaljeringsgrad	Pris på dataindsamling vil reduceres

8.2.2 Implementering af N-MAP-konceptet i Den Nationale Kvælstofmodel

Dette afsnit beskriver omkostningerne ved de 4 løsningsmodeller for implementering af N-MAP i Den Nationale Kvælstofmodel som teknisk er nærmere beskrevet i kapitel 6.

Det skal pointeres, at der i omkostningerne i dette afsnit kun indgår prisen for opdatering af Den Nationale Kvælstofmodel og ikke omkostninger ved implementering af N-MAP-konceptet eller enkelte dele af konceptet i udvalgte oplande.

Tabel 6. Løsningsforslag 1 - 4 for sammensmeltning af N-MAP i Den Nationale Kvælstofmodel. De 4 løsninger er nærmere beskrevet i kapitel 6 og Tabel 3. I økonomien indgår kun prisen for opdatering af Den Nationale Kvælstofmodel og ikke implementering af N-MAP-konceptet eller enkelte elementer i udvalgte oplande.

Fordele/udlemper	Løsning 1	Løsning 2	Løsning 3	Løsning 4
Tidsbehov for operationel model	1-3 måneder pr opland	2 – 3 år	5 år	7 år
Tidsramme for nationalt resultat		2 – 3 år	5 år	7 år
Økonomi (DKK)	100-300.000 pr opland	5 – 10 mio.	20 mio.	25 mio.

Løsning 1 - Afstemning af grundvandsretentionen fra N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel

I Løsning 1 gennemføres en afstemning af N-retentionen i grundvandet fra N-MAP med N-retentionen i grundvandet fra Den Nationale Kvælstofmodel, som teknisk beskrevet i afsnit 6.2 og opsummeret i Tabel 3. Løsning 1 vurderes at kunne gennemføres på 1-3 måneder per N-MAP ID15-opland indenfor en økonomi af 100-300.000 DKK, med et potentiale for effektivisering ved samtidig processering af flere N-MAP ID15-oplande (Tabel 6). Der er i dette overslag ikke indregnet økonomi for implementering af N-MAP i udvalgte oplande.

Løsning 2 – Stokastisk simulering i Den Nationale Kvælstofmodel

I Løsning 2 indbygges elementer af N-MAP-konceptet for stokastisk modellering af N-retention indenfor ID15-oplande i Den Nationale Kvælstofmodel, som teknisk beskrevet i afsnit 6.3 og opsummeret i Tabel 3. Løsning 2 forventes at kunne gennemføres indenfor en tidsramme på 2-3 år og en budgetramme på 5-10 mio. DKK (Tabel 6).

Løsning 3 – Stokastisk simulering i Den Nationale Kvælstofmodel og data fra N-MAP

I Løsning 3 indbygges elementer af N-MAP-konceptet for stokastisk modellering og nye detaljerede data. Disse geofysiske, geologiske og geokemiske data kan inddrages direkte i modelleringen, som teknisk beskrevet i afsnit 6.4 og opsummeret i Tabel 3. Projektet forventes at kunne gennemføres indenfor en tidsramme på 5 år og en budgetramme på 20 mil. kr. I det omfang at opgaven skal gennemføres indenfor en tidsramme på 3 år, må det forventes at budgetrammen

skal udvides med 2-5 mio. DKK (Tabel 6). Der er i dette overslag ikke indregnet økonomi for implementering af N-MAP i udvalgte oplande.

Løsning 4 – Detaljeret N-retention med ML i Den Nationale Kvælstofmodel

Løsning 4 tager udgangspunkt i en opsætning af Den Nationale Kvælstofmodel i finere skala for udvalgte oplande og fuld opsætning af Den Nationale Kvælstofmodel i 100 m opsætning for hele landet samt udvikling af en ML-model for opgørelse af N-retention på finere skala på baggrund af detaljeret modellering for udvalgte oplande, som teknisk beskrevet i afsnit 6.5 og opsummeret i Tabel 3. Projektet forventes at kunne gennemføres indenfor en tidsramme på 7 år og en budgetramme på 25 mio. DKK. Det vurderes ikke realistisk at opgaven kan gennemføres indenfor en tidsramme på 3 år (Tabel 6). Der er i dette overslag ikke indregnet økonomi for implementering af N-MAP i udvalgte oplande.

8.3 Prioritering af ID15-oplande for implementering af N-MAP

I dette kapitel gives der en vurdering af hvilke oplande, hvor det pt. er mest fordelagtigt at implementere N-MAP. GIS-prioriteringsværktøjet tages i brug, som er udviklet i MapField, og det forudsættes at de valg og beslutninger, der er truffet i udviklingen af værktøjet, er fyldestgørende.

I prioriteringsværktøjet fra MapField tages der udgangspunkt i det udskudte indsatsbehov for kvælstof fra det gældende administrationsgrundlag fra Vandplan II. Det vil være muligt at opdatere analysen, når indsatsbehovet for målrettet N-regulering kendes i Vandplan III.

Prioriteringsværktøjet er udviklet til at rangordne ID15-oplande efter behov for implementering af N-MAP til målrettet N-regulering på markniveau og er detaljeret beskrevet i Voutchkova *et al.* (2021).

Prioriteringsværktøjet består af tre trin og er en hierarkisk sammensat indikatormetode hvor scoren fra 5 korttemaer multipliceres. De valgte korttemaer er 1) geologisk kompleksitet, 2) redox kompleksitet, 3) N-retention i overfladevand fra Den Nationale Kvælstofmodel, 4) N-transport i dræn fra Den Nationale Kvælstofmodel og 5) udskudt N-reduktionskrav til kystvande fra Vandplan II.

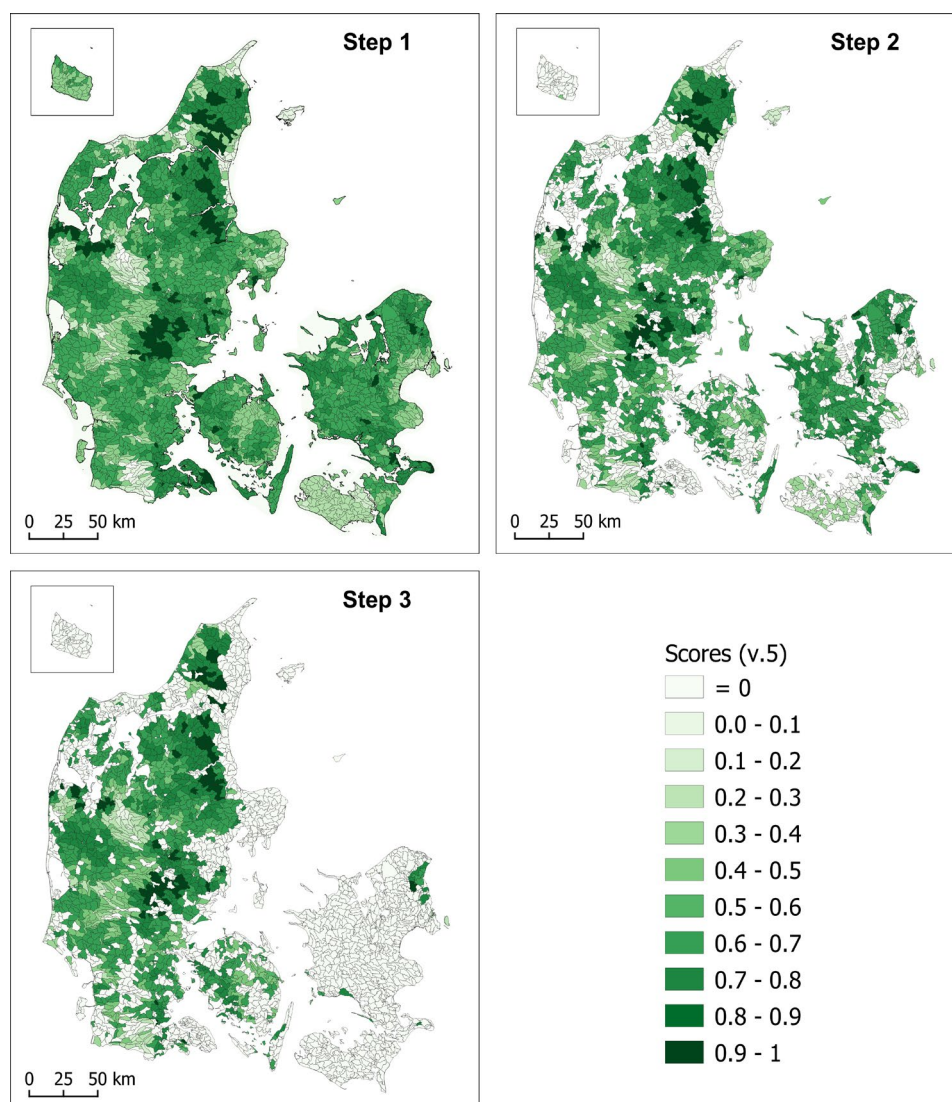
Prioriteringsværktøjet bygger på følgende beslutninger og antagelser:

- Jo højere heterogenitet i geologi og redoxforhold i undergrunden, jo højere prioritet, da dette antages at resultere i stor variation i N-retentionen mellem marker og dermed i et potentiale for differentieret N-regulering i oplandet på markfladen. Ligeledes vil der i disse områder sandsynligvis være det største behov for mere detaljerede data for at mindske usikkerheden på N-retentionen.

Dernæst bruges der en binær tilgang til følgende forhold:

- En høj grad af N-retention i overfladevandssystemet betyder, at områderne udelukkes, fordi hovedparten af den samlede N-retention til havet foregår i overfladevandssystemet og N-retentionen i grundvandet er dermed ikke betydelig.
- En høj grad af N-tilstrømning direkte til dræn og grøfter betyder, at disse arealer udelukkes, fordi N-retentionen i grundvand ikke er betydelig.
- Alle områder med N-reduktionskrav er inkluderet, mens områder uden krav er ekskluderet.

De endelige kort ved step 1, 2 og 3 fremgår af Figur 18 og de absolutte scorer fremgår af Tabel 7, hvor en score tæt på 1 betyder høj prioritet og en score tæt på nul betyder lav prioritet. Kortet ved step 1 viser prioriteringen af ID15-oplande i forhold til geologisk og redox kompleksitet af undergrunden. Kortet ved step 2 viser hvilke ID15-oplande der inkluderes, når ID15-oplande fra-vælges pga. stor grad af N-retention i overfladevandssystemet og stor grad af N-transport i dræn og grøfter. Det endelige prioriteringskort vises ved step 3, hvor ID15-oplande uden krav til ud-skudt N-reduktion i Vandplan II er udelukket.



Figur 18. Prioriteringen af ID15-oplande ved step 1 (tilvalg af oplande med stor geologi og redox kompleksitet), step 2 (fravalg af oplande med stor overfladevandsretention og/eller dræning) og det endelige kort ved step 3 (fravalg af oplande uden krav til N-reduktion ift. udskudt krav i Vandplan II) ved brug af prioriteringsværktøjet fra MapField. En score tæt på 1 betyder høj prioritet og en score tæt på nul betyder lav prioritet (Voutchkova *et al.* 2021).

En høj kompleksitet af geologi og redoxforhold (score 0,8 -1) resulterer i en score fra 0,64-1 i det endelige prioriteringskort (Tabel 7). Denne høje kompleksitet i henholdsvis step 1, 2 og 3 forefindes på 68 %, 49 % og 36 % af landets areal (Tabel 7) og på 70 %, 50 % og 37 % af marker i omdrift (Tabel 8).

Tabel 7. Prioriteringen (scoren) af ID15-oplande ved de 3 steps vist i Figur 18, hvor antal (n) og areal (ha) er vist.

Score	Step 1		Step 2		Step 3	
	<i>n</i>	<i>ha</i>	<i>n</i>	<i>ha</i>	<i>n</i>	<i>ha</i>
0,1	11	16.302	6	9.791	5	9.711
0,12	5	2.256	2	1.435	1	275
0,16	52	48.801	14	8.061	14	8.061
0,2	74	92.313	36	44.922	25	29.668
0,3	123	145.996	90	119.689	74	101.492
0,32	43	46.747	26	28.070	17	23.679
0,4	190	224.672	91	111.669	38	45.399
0,48	441	555.377	261	360.272	186	279.365
0,5	50	62.663	17	24.536	12	12.547
0,6	116	163.366	83	122.194	34	53.571
0,64	1.239	1.613.122	773	1.130.054	538	815.040
0,8	826	1.081.377	533	799.008	365	565.117
1	180	253.230	112	182.874	94	158.096
I alt	3.350	4.306.222	2.044	2.942.575	1.403	2.102.021
%	100	100	61	68	42	49

I step 1 prioriteres hele landet, alle marker og alle ID15-oplande og der gives en score i forhold til kompleksiteten af geologi og redoxforhold (Tabel 7 og Tabel 8).

I step 2 frasorteres områder med høj grad af N-retention i overfladevandssystemet og høj grad af dræning, hvilket resulterer i prioritering af 61 % (2.044 ud af 3.351) af ID15-oplandene, 68 % (ca. 2,9 ud af ca. 4,3 mio. ha) af landets areal og 69 % (ca. 1,8 ud af ca. 2,6 mio. ha) af alle marker (Tabel 7 og Tabel 8).

I step 3 frasorteres ID15-oplande uden krav til N-reduktion i forhold til det udskudte reduktionskrav i Vandplan II. Dette resulterer i prioritering af 42 % (1.403 ud af 3.351) af ID15-oplandene, 49 % af landets areal (ca. 2,1 ud af ca. 4,3 mio. ha) og 50 % (ca. 1,3 ud af ca. 2,6 mio. ha) af alle marker (Tabel 7 og Tabel 8).

Tabel 8. Prioriteringen (scoren) af ID15-oplande ved de 3 steps vist i Figur 18, hvor areal af marker i hektar er vist.

Score	Step 1 (ha marker)	Step 2 (ha marker)	Step 3 (ha marker)
0,1	10.387	6.046	6.006
0,12	482	358	15
0,16	12.048	2.364	2.364
0,2	47.718	20.327	16.541
0,3	84.201	67.288	56.842
0,32	23.425	15.719	12.886
0,4	146.505	75.487	27.486
0,48	321.297	212.191	169.969
0,5	34.868	15.087	7.947
0,6	95.519	75.461	35.793
0,64	996.462	696.363	508.703
0,8	658.683	487.925	347.264
1	160.774	116.307	100.694
I alt	2.592.368	1.790.921	1.292.511
% af alle marker	100	69	50

8.4 Forslag til løsningsmodeller

I dette afsnit diskuteres hvordan løsningsmodeller, der fx kan frembringe landsdækkende retentionskort indenfor beløbsniveauer på henholdsvis 30, 60 og 120 mio. kr. fordelt over 3 år, kunne sammensættes som kombinationer af flere aktiviteter. På baggrund af analyserne i denne rapport anbefales det at disse løsningsmodeller sammensættes på baggrund af en overordnet fordeling af ressourcer til følgende aktiviteter:

- Udvikling af ny viden, der kan nedbringe usikkerheden på N-retentionskortene som beskrevet i afsnit 8.1.
- Udvælgelse af et antal ID15-oplande, hvor N-MAP eller dele af N-MAP-konceptet skal implementeres.
- Sammensmeltning af N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel ved løsning 1, 2, 3 eller 4 som beskrevet i kapitel 6 og opsummeret i Tabel 3 og Tabel 6.

Nærmere konkretisering af løsningsmodellerne vil også kunne udføres når:

- Forventningerne til detaljeringsniveauet for den fremtidige målrettede N-regulering kendes
- Kravene til N-reduktion for kystvande er fastlagt for Vandplan III, så prioriteringen præsenteret i afsnit 8.3 kan opdateres

9 Konklusion

Denne rapport tager udgangspunkt i et oplæg fra Miljøstyrelsen og GEUS med det overordnede formål at finde løsninger til sammenstilling af koncepter for kortlægning af N-retention for marker. Der er blevet arbejdet med hvordan teknologier, koncept og viden i N-MAP-konceptet fra rOPEN- og MapField-projekterne under Innovationsfonden kan integreres i Den Nationale Kvælstofmodel.

I rapporten er der fokus på at beskrive de koncepter, der hidtil er anvendt til kortlægning af N-retention fra bunden af rodzonen til kystvande. Først beskrives Den Nationale Kvælstofmodel, som hidtil er anvendt til N-retentionsberegning fra rodzone til kystvande i myndighedsopgaver. Dernæst beskrives N-MAP-konceptet, som er udviklet i de to Innovationsforskningsprojekter rOpen og MapField, der har fokus på undergrunden og beregning af N-retention i grundvandszonen.

N-retentionen beskriver andelen af nitrat, der udvaskes fra marken, og som ikke når kystvande på grund af naturlig omsætning eller denitrifikation i forskellige dele af landskabet og undergrunden. I et hydrologisk opland kan N-retention overordnet set både foregå i den umættede zone inkl. rodzonen, omkring dræn, i lavbundsområder, i ådale, i vandløb og søer samt i grundvandszonen.

Grundvandets N-retention er styret af vandets strømningsveje og af nitrats omsætning undervejs. Det har fx stor betydning om marker er drænet eller grøftet eller om vand fra rodzonen strømmer ned til grundvandet, hvor nitraten potentielt kan omsættes inden vandet når frem til vandløbet. En lille N-retention i grundvandet kan forekomme: 1) når vandet fra rodzonen strømmer direkte via dræn og grøfter til vandløbet, hvor kvælstof kun i begrænset omfang bliver omsat eller 2) når vandet fra rodzonen strømmer via den nitratholdige grundvandszone til vandløbet med lille omsætning af kvælstof. Derimod kan en høj N-retention i grundvandet forekomme når vandet fra rodzonen strømmer igennem den iltfrie, reducerende grundvandszone, hvor nitraten omsættes og herfra via den nitratfrie grundvandszone til vandløbet.

I rapporten gives et overblik over mulighederne for at udvikle et koncept til sammensmeltning af de to tilgange på retentionskortlægning med beskrivelse af fordele og ulemper for fire løsninger, hvor hele eller dele af N-MAP-konceptet integreres i Den Nationale Kvælstofmodel. Det er ikke muligt på nuværende tidspunkt at overføre en kortlægning med N-MAP-konceptet til andre oplande af tilsvarende type uden en decideret N-MAP-kortlægning. Men der er mulighed for at indbygge dele af N-MAP-konceptet i Den Nationale Kvælstofmodel. Herved vil det være muligt at differentiere N-retentionen i grundvandszonen indenfor et ID15-opland i Den Nationale Kvælstofmodel og samtidig tage højde for N-retentionen i lavbundslande, vandløb og søer.

I rapporten gives et overslag over prisen fra MapField-projektet for implementering af N-MAP i udvalgte oplande og for opdatering af Den Nationale Kvælstofmodel med elementer fra N-MAP ved fire løsningsmodeller:

- **Løsning 1:** Afstemning af grundvandsretentionen fra N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel
- **Løsning 2:** Stokastisk modellering i Den Nationale Kvælstofmodel
- **Løsning 3:** Stokastisk modellering i Den Nationale Kvælstofmodel og integration af data fra N-MAP
- **Løsning 4:** Detaljeret N-retention med ML i Den Nationale Kvælstofmodel

Det har ikke været muligt med ressourcerne i dette projekt at afprøve de forskellige løsninger skitseret i denne rapport. I stedet diskuteres det, hvordan løsningsmodeller, der fx kan frembringe landsdækkende retentionskort indenfor beløbsniveauer på henholdsvis 30, 60 og 120 mio. kr. fordelt over 3 år, kunne sammensættes som kombinationer af flere aktiviteter.

På baggrund af analyserne i denne rapport anbefales det, at implementering af en løsning sammensættes på baggrund af en overordnet fordeling af ressourcer til følgende aktiviteter:

- Aktiviteter, der kan adressere de i afsnit 8 beskrevne udviklingsbehov for mere detaljeret N-regulering
- Udvælgelse af et antal ID15-oplande, hvor N-MAP eller dele af N-MAP-konceptet skal implementeres
- Sammensmeltning af N-MAP med Den Nationale Kvælstofmodel ved løsning 1, 2, 3 eller 4

10 Referencer

- Auken E, Christiansen A V, Westergaard J H, Kirkegaard C, Foged N and Viezzoli A 2009 An integrated processing scheme for high-resolution airborne electromagnetic surveys, the SkyTEM system *Explor. Geophys.* **40** 184 Online: <http://www.publish.csiro.au/?paper=EG08128>
- Auken E, Foged N, Larsen J J, Lassen K V T, Maurya P K, Dath S M and Eiskjær T T 2019 tTEM – a Towed TEM-system for Detailed 3D Imaging of the Top 70 meters of the Subsurface *Geophysics* **84** 1–37
- Blicher-Mathiesen G, Houlborg T, Petersen R J, Rolighed J, Andersen H E, Jensen P G, Wienke J, Hansen B and Thorling L 2021 *Landovervågningsoplande 2020. NOVANA. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi*
- Børgesen C D, Sørensen P, Blichers-Mathiesen G, Kristensen K M, Pullens J W M, Zhao J and Olesen J E 2019 *NLESS - An empirical model for predicting nitrate leaching from the root zone of agricultural land in Denmark* Online: <http://web.agrsci.dk/djfpublikation/index.asp?action=show&id=1313>
- Christiansen A V, Foged N and Auken E 2014 A concept for calculating accumulated clay thickness from borehole lithological logs and resistivity models for nitrate vulnerability assessment *J. Appl. Geophys.* **108** 69–77 Online: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.06.010>
- Foged N, Marker P A, Christiansen A V., Bauer-Gottwein P, Jørgensen F, Høyer A S and Auken E 2014 Large-scale 3-D modeling by integration of resistivity models and borehole data through inversion *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **18** 4349–62
- Grant R, Blicher-Mathiesen G, Jensen P G, Hansen B and Thorling L 2010 *Landovervågningsoplande 2009. NOVANA. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. Faglig rapport fra DMU nr. 802*
- Hansen A L, Gunderman D, He X and Refsgaard J C 2014 Uncertainty assessment of spatially distributed nitrate reduction potential in groundwater using multiple geological realizations. *J. Hydrol.*
- Hansen B, Christiansen A V, Dalgaard T, Iversen B V, Larsen J J, Jacobsen B H, Auken E and Schaper S 2020 *Danish review on advances in assessing : N retention in the subsurface in relation to future targeted N-regulation of agriculture*
- Hansen B and Thorling L 2008 *Interkalibreringen af grundvandsprøvetagningen 2007, NOVANA*
- Hansen B, Thorling L, Kim H and Blicher-Mathiesen G 2019 Long-term nitrate response in shallow groundwater to agricultural N regulations in Denmark *J. Environ. Manage.* **240** 66–74 Online: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.075>
- Hansen B, Voutchkova D D, Sandersen P B E, Kallesøe A, Thorling L, Møller I, Madsen R B, Jakobsen R, Aamand J, Maurya P and Kim H 2021 Assessment of complex subsurface redox structures for sustainable development of agriculture and the environment *Environ. Res. Lett.* **16**
- Harbough; A W 2005 *MODFLOW-2005, The U . S . Geological Survey Modular Ground-Water Model — the Ground-Water Flow Process MODFLOW-2005, The U . S . Geological Survey Modular Ground-Water Model — the Ground-Water Flow Process*
- Højberg A L, Thodsen H, Børgesen C D, Tornbjerg H, Nordstrøm B O, Trolborg L, Hoffmann C C, Kjeldgaard A, Holm H, Audet J, Ellermann T, Christensen J H, Bach E O and Pedersen B F 2021a *National kvælstofmodel – version 2020. Bilag* Online: https://www.geus.dk/Media/637576521825668552/NKM2020_Bilag_18maj2021_web.pdf
- Højberg A L, Thodsen H, Børgesen C D, Tornbjerg H, Nordstrøm B O, Trolborg L, Hoffmann C C, Kjeldgaard A, Holm H, Audet J, Ellermann T, Christensen J H, Bach E O and Pedersen B F

- 2021b *National kvælstofmodel – version 2020. Metode rapport* Online:
https://www.geus.dk/Media/637576521860083405/NKM2020_Rapport_18maj2021_web.pdf
- Kim H, Høyer A-S, Jakobsen R, Thorling L, Aamand J, Maurya P K, Christiansen A V and Hansen B 2019 3D characterization of the subsurface redox architecture in complex geological settings *Sci. Total Environ.* **693** 133583 Online:
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133583>
- Kim H, Sandersen P B E, Jakobsen R, Kallesøe A J, Claes N, Blicher-Mathiesen G, Foged N, Aamand J and Hansen B 2021 A 3D hydrogeochemistry model of nitrate transport and fate in a glacial sediment catchment: A first step toward a numerical model *Sci. Total Environ.* **776**
- Madsen R B, Kim H, Kallesøe A J, Sandersen P B E, Vilhelmsen T N, Hansen T M, Christiansen A V, Møller I and Hansen B 2021 3D multiple-point geostatistical simulation of joint subsurface redox and geological architectures *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **25** 2759–87
- Petersen R J, Blicher-Mathiesen G, Rolighed J, Andersen H E and Kronvang B 2021 Three decades of regulation of agricultural nitrogen losses: Experiences from the Danish Agricultural Monitoring Program *Sci. Total Environ.* **787** 147619 Online:
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147619>
- Refsgaard J C, Stisen S, Højberg A L, Olsen M, Henriksen H J, Børgesen C D, Vejen F, Kern-Hansen C and Blicher-Mathiesen G 2011 *Vandbalance i Danmark. Vejledning i opgørelse af vandbalance ud fra hydrologiske data for perioden 1990-2010. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse*
- Sandersen P B E, Kalles A J, Ingelise M, Anne-sophie H, Flemming J, Pedersen J B and Christiansen A V 2021 Utilizing the towed Transient ElectroMagnetic method (tTEM) for achieving unprecedented near-surface detail in geological mapping **288**
- Sandersen P B E and Kallesøe A J 2021 *Geological mapping in MapField LOOP-areas and demo sites*
- Smith M S, Firestone M K and Tiedje J M 1978 The Acetylene Inhibition Method for Short-term Measurement of Soil Denitrification and its Evaluation Using Nitrogen-131 *Soil Sci. Soc. Am. J.* **42** 611
- Stisen S, Ondracek M, Troldborg L, Schneider R J M and van Til M J 2019 National Water Resource Model - Construction and calibration of the DK-model2019 (in Danish) 125 Online: http://vandmodel.dk/media/21560/geusrapport2019_31_dkmodel2019_web-1.pdf
- Thorling, L., Brusch, W., Ernstsén, V., Hansen, B., Laier, T., Larsen, F., Mielby, S., Sørensen B 2015 *Grundvand. Status og udvikling 1989 – 2013*. Online:
http://www.geus.dk/DK/publications/groundwater_monitoring/Sider/1989_2013.aspx
- Vejen F 2013 *Korrigeret Nedbør 2011-2012. Del 2 af 2: Beskrivelse af metode, resultater og modeltekniske specialtilfælde. Dataleverance til DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet. Danmarks Meteorologiske Institut*
- Viezzoli A, Christiansen A V, Auken E and Sørensen K 2008 Quasi-3D modeling of airborne TEM data by spatially constrained inversion
- Vignoli G, Fiandaca G, Christiansen A V, Kirkegaard C and Auken E 2015 Sharp spatially constrained inversion with applications to transient electromagnetic data *Geophys. Prospect.* **63** 243–55
- Voutchkova D D, Christiansen A V., Højbjerg A L, Iversen B V., Jacobsen B H, Willerslev E, Blicher-Mathiesen G, Holm H M, Møller I, Koch J, Nygaard K, Nørgaard L B, Thorling L, Sandersen P B E, Schaper S, Hvid S K, Dalgaard T and Hansen B 2021 *Prioritization tool for implementing the N-MAP concept. GEUS report 2021/67*
- Wu, J., 2012. *Advances in K-means Clustering: A Data Mining Thinking*. Springer.