

Promilleafgiftsfonden for landbrug

Notat

SEGES Innovation
Planter & Miljø

Vurdering af behovet for hydrogeologisk modellering til BNBO afgrænsning	Ansvarlig	RILA
	Oprettet	22-11-2022
Projekt: 7876, Grundvandsbeskyttelse – den rigtige løsning for landmanden	Side	1 af 7

Et boringsnært beskyttelsesområde (BNBO) afgrænses og udpeges i dag af Miljøstyrelsen. Dette har de gjort siden 1. januar 2019 [1]. For at sikre en standardiseret beregning af BNBO'erne har Miljøstyrelsen udarbejdet en beregningsprocedure, som vil blive benyttet fremadrettet ved etablering af nye boringer til almene vandforsyninger eller ved væsentligt ændrede indvindingsforhold [2].

En standardisering af BNBO-beregningen har været nødvendig, fordi Miljøstyrelsens 2007-vejledning om BNBO og tilhørende præciserende skrivelser har givet mulighed for stor variation i både beregningsmetode og parametersætning. Dette har betydet, at BNBO-beregningsmetoden har varieret kommunerne imellem, og udpegningsgrundlaget ikke har været ensartet for hele landet.

Nærværende notat beskriver kort de anvendte BNBO-beregningsmetoder, og går derefter dybere ind i beregningen af et BNBO via numerisk modellering. Dette for at øge forståelsen for de overordnede modelleringsprincipper, usikkerheder mv. ved en numerisk metode/tilgang.

Metoder til beregning af et boringsnært beskyttelsesområde (BNBO)

Et BNBO kan beregnes via tre forskellige beregningsmetoder afhængig af kompleksiteten af de hydrogeologiske forhold omkring indvindingsboringen. De tre beregningsmetoder er listet herunder med den simpleste metode først og den mest komplekse metode sidst.

- A. Analytisk beregnet BNBO via cirkel metoden
- B. Semianalytisk beregnet BNBO via AEM metoden
- C. Numerisk beregnet BNBO via en lokal grundvandsmodel [2,3]

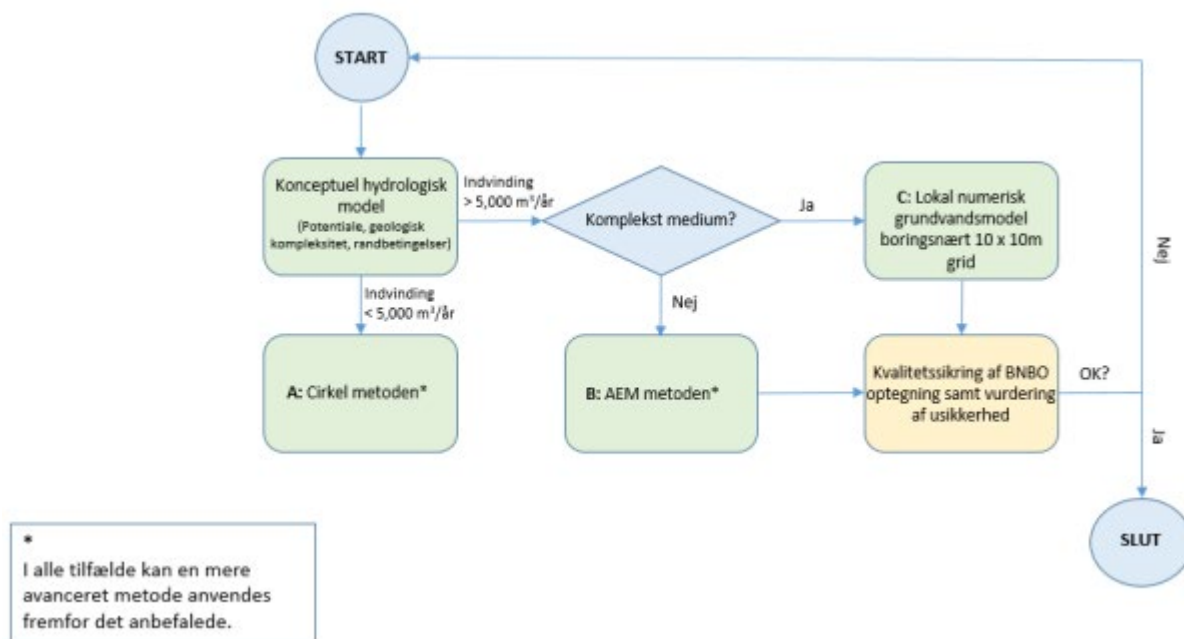
For at vurdere hvilken af beregningsmetoderne der skal anvendes til BNBO beregningen for en indvindingsboring, er det nødvendigt bl.a. at forstå den geologiske kompleksitet, potentialeforholdene og de hydrologiske randbetingelser i området omkring indvindingsboringen, samt om der er flerlagsstrømninger. Dette gøres ved at indsamle data og viden i en konceptuel hydrogeologisk forståelsesmodel [2], som beskriver, hvad der opfattes som de vigtigste geologiske forhold og hydrologiske processer i et givent område. Konkret er en konceptuel hydrogeologisk forståelsesmodel en visuel eller skitse-mæssig beskrivelse af områdets geologiske opbygning og forventede grundvandsstrømninger via kort, tværsnit/profiler, diagrammer mv. [4]. Forståelsen for de geologiske lags rumlige opbygning og strukturer kommer fra en geologisk model, som er en simplificeret udgave af de komplekse, naturlige geologiske forhold.

Generelt anvendes den simple, analytiske cirkel metode (metode A) til at beregne BNBO for enkeltstående indvindingsboringer med en indvindingsmængde på under 5.000 m³/år, et fladt grundvandsspejl, og hvor simpel 2D strømning kan antages i magasinet. For større indvindinger anvendes den konceptuelle hydrogeologiske forståelsesmodel til at vurdere, hvor komplekse forholdene er omkring indvindingsboringen, og om metode B eller C skal anvendes [2]. Figur 1 viser et flowdiagram for valg af BNBO beregningsmetode. AEM metoden (metode B) anvendes til beregning af BNBO for en enkelt boring, eller hvis der er flere tætliggende boringer, hvor der kan antages simpel 2D strømning, og hvor der er en

gradient på grundvandsspejlet. De numeriske grundvandsmodeller (metode C) anvendes, hvor strømningsmønstret til magasinet er så komplekst, at 3D beregninger vurderes nødvendige. Dette er bl.a., hvor der indvindes fra magasiner i opsprækket kalk, eller hvis magasinet har et dæklag af opsprækket moræneler. Desuden bør BNBO for større kildepladser altid beregnes med numeriske grundvandsmodeller [2].

For yderligere information om og gennemgang af de enkelte beregningsmetoder henvises til [2].

Nærværende notat fokuserer herfra på BNBO'er (og andre zoner) beregnet med numeriske modeller (metode C).



Figur 1. Flowdiagram for valg af BNBO beregningsmetode [2].

En numerisk hydrogeologisk model samler data og viden

En numerisk hydrogeologiske model repræsenterer en forenkling af et virkeligt fysisk system via en matematisk beskrivelse af vands strømning fra overfladen ned gennem rodzonen, den umættede zone og den mættede zone, hvor den også kan udveksles med vandløb og søer, hvis det er valgt at tilkoble en vandløbsmodel.

Den hydrogeologiske model udgøres nemlig af et samlet integreret modelsystem bestående af en række delkomponenter (moduler/modeller), som kan tilkobles ved behov. Vandløbsmodellen, som kun simulerer vandets strømning i vandløb, er et eksempel herpå, ligesom en grundvandsmodel udgør et af disse delkomponenter, som kan tilvælges, da en grundvandsmodel kun beskriver processerne i den mættede zone [9].

Til beregning af BNBO kan anvendes både en numerisk grundvandsmodel eller en integreret hydrogeologisk model, hvor den numeriske grundvandsmodel er en delkomponent. Hvad der anvendes, afhænger blandt andet af formålet med modelopstillingen, datagrundlaget, kompleksiteten af de hydrogeologiske forhold, samt om en af modeltyperne allerede eksisterer og kan anvendes til formålet eventuelt med justeringer. I Danmark anvendes Mike SHE ofte som modelkode for integrerede hydrogeologiske modeller, mens MODFLOW anvendes til rene numeriske grundvandsmodeller [9]. I de efterfølgende afsnit vil der hovedsageligt fokuseres på den hydrogeologiske modellering. Meget af det, som gør sig gældende for den hydrogeologiske model, gælder også for grundvandsmodellen. Grundvandsmodellen kræver dog ikke samme mængde af inputdata som den hydrogeologiske model, og den foretager en forenkling af

udvekslingen mellem overfladevand og grundvand, men overordnet set foregår modelleringsprocessen ens uanset modeltype.

Den hydrogeologiske model opstilles på baggrund af forskelligt inputdata. Heraf er det vigtigste data de geologiske lag, som kommer fra den geologiske model af det fysiske system. De geologiske lag tildeles parametre som bl.a. hydraulisk ledningsevne, der karakteriserer lagenes strømningsegenskaber. Andet vigtigt inputdata er nedbør og fordampning. Desuden anvendes blandt andet data for topografi, arealanvendelse, jordtype, beliggenhed af dræn og grundvandsindvinding. Dette er komplekse dataset, som er indsamlet i felten. Den hydrogeologiske model samler og sammenkæder disse data og bidrager til øget forståelse af det fysiske hydrogeologiske system samt strømnings- og opmagasineringsforholdene i grundvandssystemet [4].

En hydrogeologisk model er dynamisk, hvilket betyder, at inputdata varierer både stedsligt og tidsligt. Anvendes en numerisk grundvandsmodel kan den både være dynamisk eller stationær. I en stationær model varierer inputdata kun stedsligt. Fordelen ved den dynamiske model er således primært, at den giver mulighed for at udnytte alle tilgængelige data herunder tidsserier uden at skulle anvende gennemsnitlige værdier [5, 6].

Overordnet kan en numerisk hydrogeologisk model anvendes til at forklare, hvad vi ser i det virkelige fysiske system (f.eks. at en vandløbsstrækning udtørre pga. overudnyttelse af grundvandsmagasin, der er i kontakt med vandløbet). Modellen kan også anvendes til at forudsige konsekvenserne ved at tillade en ændring i et system (f.eks. at en ændret indvindingsstrategi kan være mere skånsom ift. omkringliggende søer og vandløb) og løse problemer ved at finde den mest optimale løsning. Ligesom den kan anvendes til zoneringer af bl.a. BNBO, indvindings- og grundvandsdannende oplande til brug i vandforvaltningen [5]. Hydrogeologiske modeller kan således have mange formål. Det er dog vigtigt at være bevidst om, at til trods for at der eksisterer en hydrogeologisk model for et område, så er det ikke sikkert, at den kan anvendes til alle formål, hvis den ikke er opstillet med det specifikke formål. Skal modellen anvendes til at afgrænse BNBO (og andre zoneringer), bør der i kalibreringen tages specielt hensyn til dette formål [5].

Modelleringsprocessen

Opstilling af en numerisk hydrogeologisk model er en tidskrævende opgave, der ofte kræver flere iterationer undervejs, som modelløren opnår mere vidende om det modellerede opland. Der er en masse indledende overvejelser og vigtigt arbejde, inden opstillingen af den numeriske model kan igangsættes.

Når formålet med modelanvendelsen er defineret, følger en modelleringsproces overordnet set nedenstående trin:

1. Dataindsamling, processering og opstilling af hydrogeologisk forståelsesmodel.
2. Modelopsætning i det valgte modelprogram og fastsættelse af nøjagtighedskrav.
3. Kalibrering, validering og usikkerhedsanalyse.
4. Modelsimulering (scenarietørsel) [5].

De enkelte trin er yderligere beskrevet herunder. Nogle af de usikkerheder, som kan forekomme i forbindelse med de enkelte trin, er listet i afsnittene.

Trin 1: Dataindsamling, processering og opstilling af hydrogeologisk forståelsesmodel

Som tidligere nævnt skal der inden en model kan opstilles udarbejdes en hydrogeologiske forståelsesmodel (konceptuel model). Den konceptuelle model beskriver bl.a. hvilke processer, der er vigtige at inkludere i modellen, samt definerer modelafgrænsningen og randbetingelser. Den hydrogeologiske forståelsesmodel udgør således en drejebog for, hvordan det hydrogeologiske system skal fortolkes og

modelleres [8,9]. På baggrund af den konceptuelle model udvælges hvilken modelkode (f.eks. Mike SHE), som skal anvendes til modelleringen [8].

Herefter indsamles det nødvendige feltdata. Det gennemgås for fejl og bearbejdes til at kunne indsættes i modellen. I nogle tilfælde kan det være nødvendigt at indsamle ekstra data, f.eks. hvis der er områder i modellen, hvor der ikke er meget data tilgængeligt.

USIKKERHEDER

Herunder listes nogle af de usikkerheder, der kan forekomme i forbindelse med Trin 1:

- Monitoringsdata kan indeholde fejl, outliers og der kan være huller i datasættet.
- Manglende inputdata f.eks. i et specifikt hjørne af modelområdet.
- Usikkerhed omkring den geologiske tolkning.
- Mangelfuld hydrogeologisk forståelsesmodel. Usikkerhed på den konceptuelle model eller elementer heraf [5].

Trin 2: Model opsætning

Når der er styr på, hvilken modelkode der skal anvendes til modelleringen, og det er verificeret, at denne kan beskrive de i den konceptuelle model beskrevne vigtige processer, kan modelopsætningen starte. Dermed inkluderes det indsamlede feltdata i modellen. Samtidig vælges den rumlige og tidlige diskretisering, rand- og startbetingelser fastsættes og der gættes på parameterverdier for bl.a. den hydrauliske ledningsevne for de forskellige jordlag.

USIKKERHEDER

Herunder listes nogle af de usikkerheder, der kan forekomme i forbindelse med Trin 2:

- Usikkerhed på inputdata, randbetingelser og parameterverdier.
- Usikkerhed på modelstruktur.
- Gridstørrelsen i modellen kan have indflydelse på beregningsresultatet [5].

Trin 3: Kalibrering, validering og usikkerhedsanalyse

Efter modellen er opsat, skal den kalibreres for at sikre, at modellen kan reproducere processerne i det virkelige fysiske system. Kalibreringen foregår ved, at simulerede trykniveauer og vandføringer kalibreres op imod observerede trykniveauer i magasinerne og observerede vandføringer i vandløbene for at få dem til at stemme overens. Kalibreringen kan gennemføres manuelt (trial-and-error) eller automatisk ved brug af numeriske parameteroptimeringsalgoritmer. Således justeres udvalgte, følsomme parametre, så simulerede og observerede data ligger indenfor et på forhånd fastsat nøjagtighedskrav. Nøjagtighedskriterierne definerer et spænd, hvor både observerede og modellerede værdier skal ligge indenfor, for at modellen accepteres.

Kan nøjagtighedskriterierne ikke opnås, kan det være nødvendigt at gå tilbage og forbedre den hydrogeologiske forståelsesmodel og justere modellen eller indsamle mere data.

Opnås en tilfredsstillende kalibrering, skal modellen valideres. Dette foregår ved at gennemføre en test, hvor modellen med de kalibrerede parameterverdier simuleres over en anden periode, end den der blev anvendt under kalibreringen. Simuleret og observeret data sammenlignes for valideringsperioden for at dokumentere, at modellen med tilstrækkelig nøjagtighed kan gengive det, der sker i det virkelige fysiske system. Når en hydrogeologisk model skal anvendes i forbindelse med zonerings er validering mod trykniveauer og vandføringer ikke tilstrækkeligt. I disse tilfælde bør modellen for eksempel også valideres op imod potentialekort fra forskellige magasiner. Dette for at sikre korrekt placering af f.eks. indvindingsoplande og BNBO [5].

I forbindelse med valideringen skal der foretages en systematisk usikkerhedsanalyse, for at finde ud af hvilke data, parametre o.l. som tilskrives modelresultaterne (dem modellen skal kunne simulere ift.

formålet) mest usikkerhed. På baggrund af usikkerhedsanalysen kan modellens repræsentativitet og begrænsninger med hensyn til konkrete påtænkte modelanvendelser konkluderes [8].

USIKKERHEDER

Herunder listes nogle af de usikkerheder, der kan forekomme i forbindelse med Trin 3:

- Ikke nok kalibrerings- og valideringsdata.
- De kalibrerede parameterverdier skal være troværdige (indenfor anbefalinger) [5].

Trin 4: Model simulering (scenarietørsel)

Modellen er herefter klar til at blive anvendt til simuleringer og scenarietørsler. Til de enkelte scenarietørsler skal der som oftest laves nogle modelændringer, eller scenariedata skal processeres, inden det bruges i simuleringen af scenariet.

USIKKERHEDER

Herunder listes nogle af de usikkerheder, der kan forekomme i forbindelse med Trin 4:

- Beregningsresultaterne indeholder uventede resultater eller numeriske fejl.
- Usikkerhed på scenariedata [5].

Beregning af BNBO og andre zoneringer

Efter den hydrogeologiske model er opsat, kalibreret og valideret til det formål, at den skal kunne anvendes til zonerung, skal den kobles til en partikelbanemodell. Med partikelbanemodellen indsættes partikler i en boring, og ved baglæns partikelbanesimulering kan strømningerne/partikelbanerne og deres alder fra boringen til jordoverfladen vises [5]. Traditionelt benyttes de hydrogeologiske modeller anvendt til kortlægningen ifm. vandforvaltningen en diskretisering på 100 m x 100 m. Disse modeller kan anvendes til beregning af indvindings- og grundvandsdannende oplande. Diskretiseringen er dog for grov i forbindelse med bestemmelse af BNBO [10], som jf. figur 1 skal være 10 m x 10 m omkring boringen. Således er det ofte nødvendigt at forfine griddet i området omkring boringen, for hvilken et BNBO ønskes beregnet. I nogle modeller kan dette gøres direkte i modellen, mens det andre gange er nødvendigt at opstille en lokal og mere detaljeret grundvandsmodell til afgrænsning af BNBO. Her vil væsentlige input til den konceptuelle modell, potentialeforhold og vigtige parametre som f.eks. magasin tykkelse, strømningens retning, gradient, transmissivitet samt valg af randbetingelser kommer fra 100 m x 100m modellen [10].

Ved partikelbanesimulering til afgrænsning af BNBO begrænses partiklens alder til 1 år [9]. Således svarer størrelsen af et BNBO til den afstand, som grundvandet er om at strømme fra randen af BNBO og ind til boringens filter på 1 år [7].

Med en fast strømningstid på 1 år, er de væsentligste usikkerheder i forbindelse med afgrænsning af BNBO knyttet til fastsættelsen af magasinmægtighed, effektiv porøsitet, transmissivitet, gradient, strømningens retning og indvindingsmængde [10]. Bortset fra indvindingsmængden så er disse parametre defineret i forbindelse med modelopsætningen eller fastsat ved kalibrering af den numeriske modell. Om disse afspejler de fysiske forhold, er uvist, da parametrene kan være svære at bestemme i virkeligheden. Dette introducerer en vis usikkerhed i afgrænsningen af et BNBO. Specielt fordi den effektive porøsitet har stor betydning for størrelsen af et BNBO.

Når BNBO er beregnet på baggrund af numeriske modeller, tilføjes en sikkerhedsmargin på BNBO svarende til størrelsen af modeldiskretiseringen/griddet. Således vil et BNBO beregnet på baggrund af en numerisk modell med en cellediskretisering på 10x10 m tilføjes en usikkerhedsmargin på 10 m rundt om hele BNBO. Denne usikkerhedsmargin placeres fra grænsen af partikelbanernes placering eller selve partiklernes placering projiceret op på terrænoverflade. Ligeledes udglattes BNBO afgrænsningen, så den ikke er kantet som følge af eksempelvis manuelle punkter sat i GIS [2].

Et BNBO skal være så fagligt korrekt som muligt

Til trods for de mange usikkerheder m.v. ved udpegningen af et BNBO (og andre zoneringer) er der et ønske fra både landbrugets og vandforsyningens side om, at udpegningen er så faglig korrekt som muligt, så det sikres, at det er det rigtig areal der udpeges til grundvandsbeskyttelse. For landbruget betyder dette, at udpegningen foretages denne ene gang, og driften derefter kan tilpasses de nye restriktioner. For vandforsyningen er det vigtigt, at det rigtige areal udpeges, så de får sikret grundvandsbeskyttelsen i fremtiden og får værdi for deres investering.

Når et BNBO er afgrænset via en numerisk model, er det vigtigt at huske, at modellen altid vil repræsentere en væsentlig forenkling af det fysiske system og de tilhørende hydrologiske processer, og modellen ikke er bedre end de data, der bliver lagt ind i den [9]. Ligeledes er modellering en proces, som ikke stopper efter modellen er udarbejdet. Kommer der nye data f.eks. i form af mere detaljerede geologiske oplysninger fra en geofysisk kortlægning af modelområdet, så bør disse data indarbejdes i den numeriske model. Dette data bidrager til øget forståelse, men det kan også medføre, at et udpeget BNBO ændrer form, størrelse eller placering.

Fordelen ved at anvende numeriske modeller til beregning af BNBO er, at modellerne kan anvende komplekst og detaljeret data fra det fysiske system til beregningen. Dette kan de simple metoder ikke. Med det sagt bør der ikke anvendes en kompleks metode, hvis datagrundlaget ikke er til det.

Referencer

- [1] Vejledning om boringsnære beskyttelsesområder (BNBO). MST, 2020. Vejledning nr. 45. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2020/06/978-87-7038-195-6.pdf>
- [2] BNBO Beregningsprocedure. MST, 2020. <https://mst.dk/media/195749/procedure-for-afgraensning-af-bnbo.pdf>
- [3] Eksempler på BNBO-afgrænsning og tiltag. Eksempelsamling. MST, 2020. <https://mst.dk/media/196404/eksempler-paa-bnbo-afgraensning-og-tiltag.pdf>
- [4] [Den konceptuelle vandmodel – Ferskvandets kredsløb \(I\)](#). Henriksen, H. J. og Nyegaard, P. 2003. Geologisk nyt, 5, 4-9.
- [5] [Geo-vejledning 2017/1: Hydrologisk vejledning](#). Henriksen, H. J., Trolborg, L., Sonnenborg, T., Højberg, A. L. Stisen, S., Kidmose, J. B. og Refsgaard, J. C. 2017. MST.
- [6] Håndbog i grundvandsmodellering. Sonnenborg, T. O. og Henriksen, H. J. 2005. Danmarks og Grønlands geologiske undersøgelse rapport 2005/80.
- [7] Boringsnære beskyttelsesområder, BNBO, vejledning nr. 2, 2007, Miljøstyrelsen, <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2007/978-87-7052-458-2/pdf/978-87-7052-458-2.pdf>
- [8] Retningslinjer for opstilling af grundvandsmodeller. Henriksen, H. J., Sonnenborg, T., Christiansen, H. B., Refsgaard, J. C., Harrar, B., Rasmussen, P. og Brun, A. 2001. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen nr. 17 2001. [forord-hjh.PDF \(mst.dk\)](#)
- [9] Zonering. Detailkortlægning af arealer til beskyttelse af grundvandsressourcen. Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 3. 2000. <https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2000/87-7944-132-7/pdf/87-7944-133-5.pdf>

[10] [GEUS's vurdering af BNBO-beregningskonceptet](#). Henriksen, H. J., Rosenbom, A. E., Andersen, L. T., Albers, C. N., Sonnenborg, T. O. 2019. GEUS-notat.