



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Revurdering af grundvandsrisiko fra kulbrinte- forureninger

Miljøprojekt, nr.2311

Juni 2026

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: Bolette Badsberg Jensen, Thomas Hauerberg Larsen (WSP), Per Loll (DMR), Katrine Lund Johansen, Jens Aabling og Kristian Tommerup Vad (Region Sjælland)

ISBN: 978-87-7564-106-2

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik

Forord

Denne rapport er udarbejdet som led i et teknologiprojekt finansieret af Miljøstyrelsens teknologipulje og har til formål I at revurdere grundvandsrisikoen fra kulbrinte-forureninger. Baggrunden for projektet er et behov for at vurdere, om en stor pulje af kulbrinte-forureninger – primært fra benzen og diesel-/fyringsolie – reelt udgør en risiko for grundvandet. Formålet er at skabe et fagligt velfunderet beslutningsgrundlag, der kan effektivisere regionernes prioritering af kulbrintesager, herunder identificere de mest risikopotente forureninger ud af de mange kortlagte kulbrinte-forureninger.

En særlig tak skal rettes til **Bolette Badsberg Jensen fra WSP**, som er hovedforfatter på rapporten og har udført de omfattende analyser, der danner grundlag for projektets konklusioner. Projektet har desuden været styrket af to fagpersoner med betydelig ekspertise inden for området: **Per Loll fra DMR** og **Thomas Hauerberg Larsen fra WSP**, som har ydet væsentlige bidrag til den faglige vurdering og metodiske tilrettelæggelse. Fra **Region Sjælland** har **Katrine Lund Johansen** og **Jens Aabling** bidraget med projektledelse, den overordnede koordinering og anbefalinger.

Region Sjælland vil gerne takke de involverede fra WSP og DMR for deres engagement og faglige indsats, som har været afgørende for at skabe et solidt grundlag for håndtering af eksisterende og kommende kulbrinte-forureninger i relation til grundvandsbeskyttelse.

Det bemærkes, at projektets pointer har været præsenteret og diskuteret på ATV Jord og Grundvands¹ Vintermøde marts 2025.

¹ Akademiet for de Tekniske Videnskaber.

Indhold

Forord	3	
1. Baggrund	5	
1.1	Motivation og formål	5
1.2	Metodebeskrivelse	6
2. Dataudtræk fra Jupiter	7	
2.1	Beskrivelse af udtræk	7
2.2	Benzen	7
2.3	Kulbrinte fraktion C ₅ – C ₄₀	10
3. Litteraturstudium	14	
3.1	Udbredelse af kulbrintefaner	15
3.2	Betydende parametre for fanelængde	17
3.3	Fanestabilitet	17
3.4	Dokumentation for nedbrydning	18
4. Udtræk fra Region Sjællands database	19	
4.1	Fordelinger, sumkurver og fraktiler for koncentrationer af benzen og C ₁₀ -C ₄₀ kulbrinte fraktion i grundvand	19
4.2	Højeste påviste koncentrationer for lokaliteter	21
4.3	Størrelsen på V2-kortlagte arealer	22
4.4	Koncentration i grundvandet som funktion af afstanden fra kildeområdet	23
4.5	Atypiske lokaliteter	26
5. GrundRisk-beregninger	27	
5.1	Parametervalg for scenarieberegninger	27
5.2	Scenarieberegninger	29
5.3	Resultater af scenarieberegninger.	30
5.3.1	Beregningsmodel 5	30
5.3.2	Beregningsmodel 1	31
6. Opsummering af resultater fra delanalyser	34	
6.1	Resultater fra delanalyser	34
6.1.1	Dataudtræk fra Jupiter	34
6.1.2	Litteraturstudium	34
6.1.3	Udtræk fra Region Sjællands database	35
6.1.4	GrundRisk scenarieberegninger	36
7. Anbefalinger til håndtering af kulbrintesager	38	
8. Referencer	40	
Bilag 1. Stancode-liste Jupiterudtræk	42	

1. Baggrund

Mineralske olieprodukter har været anvendt i Danmark i mere end 100 år. Forbruget af olie toppede i slut 1970'erne, hvor forbruget var oppe på omkring 15.000.000 m³/år og er i dag faldet til ca. det halve (Drivkraft Danmarks hjemmeside, Danmarks Olieforbrug). Af det samlede forbrug udgør diesel-/fyringsolie omkring halvdelen og det resterende af benzin, flybrændstof, tungere brændselsolier, petroleum og i mindre omfang hydrauliske væsker og smøremidler.

Antallet af tankstationer kulminerede i slutningen af 1960'erne, hvor der fandtes omkring 8.000 salgssteder i Danmark. Derudover har olietanke til privat brug været udbredt over hele landet. Ifølge Danmarks Statistik er der stadig omkring 200.000 olietanke, hvilket understreger, hvor omfattende anvendelsen af olieprodukter har været og fortsat er i alle dele af landet.

I forbindelse med håndtering af olie, f.eks. ved påfyldning af tanke, er der hyppigt sket spild, og dertil er mange tanke og rørføringer tæret igennem og har lækket olie over en længere årrække. Dette har forårsaget et stort antal olieforureninger, som, når de er blevet opdaget ved f.eks. gravearbejde, er blevet kortlagt af Amterne, og sidenhen af Regionerne på vidensniveau 2 (V2)². I forbindelse med kortlægningen blev forureningerne omfattet af den offentlige indsats, som er myndighedernes systematiske arbejde med at opspore, risikovurdere og håndtere jord- og grundvandsforureninger for at beskytte mennesker og miljø.

For at belyse størrelsesordenen af de spildte oliemængder kan et tænkt eksempel anvendes: Antager man at spild fra olieinstallationer i 1970'erne udgjorde 0,1 ‰ af den samlede håndterede mængde olie, så ville det årlige tab have været omkring 1.200 ton olie/år. Blander man denne mængde op i en nettoinfiltration fra nedbør på 250 mm/år over hele Danmarks areal på 43.000 km², så får man en gennemsnitlig oliekoncentration i det infiltrerende vand på lidt over 100 µg olie/liter svarende til ca. 10 gange Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium. Når vi trods den lange periode med store mængder spildt olie ikke ser udbredt olieforurening af vores grundvand, så skyldes det, at naturlig biologisk nedbrydning i høj grad er med til at reducere nedsivning og spredning af de mange spild (CL:AIRE, 2024). Når det i dag er veldokumenteret, at der sker en naturlig biologisk nedbrydning af kulbrinter i jord og grundvand, og at det er årsagen til, at de mange oliespild ikke lukker indvindingsboringer, selv så mange år efter at forbruget toppede, så må risikoen være mindre end hidtil antaget. Derfor må en ansvarlig tilgang være at revurdere grundvandsrisikoen fra kulbrinteforureninger.

1.1 Motivation og formål

Projektet er drevet af behovet og mulighederne for at revurdere grundvandsrisikoen fra særligt V2-kortlagte diesel-/fyringsolieforureninger fra villaolietanke. Regionerne vurderer i dag, at de fleste af disse forureninger ikke udgør nogen eller kun en meget beskedent trussel mod grundvandsressourcen. Derfor er det relevant at udvikle et beslutningsgrundlag, der gør regionerne i stand til at identificere og indsatsmæssigt frasortere de forureninger, som ikke udgør en reel grundvandsrisiko, og i stedet målrette indsatsen mod de få kulbrinteforureninger, der potentielt kan udgøre en risiko.

² Et areal betegnes som kortlagt på vidensniveau 2, hvis der er tilvejebragt et dokumentationsgrundlag, der gør, at det med høj grad af sikkerhed kan lægges til grund, at der på arealet er en jordforurening af en sådan art og koncentration, at forureningen kan have skadelig virkning på mennesker og miljø (Miljø- og Ligestillingsministeriet, LBK nr. 282 af 27/03/2017).

Kulbrinteforureninger nedprioriteres allerede i dag til fordel for mere kritiske grundvandsforureninger, som f.eks. forureninger med klorerede opløsningsmidler, PFAS eller pesticider. Denne prioritering skyldes den aktuelle viden om kulbrinters nedbrydning i jord og grundvand, og har medført, at der nu findes et stort antal kortlagte kulbrinteforureninger, som afventer regionernes indsats. Alene i Region Sjælland er der på baggrund af påviste kulbrinte-indhold i jord- og/eller vandprøver registreret 485 V2-kortlagte arealer med offentlig indsats overfor grundvand og grundvandspåvirket overfladevand. Hvis forureningerne på disse arealer reelt ikke udgør en grundvandsrisiko, har regionerne et ansvar for at revurdere behovet for en offentlig indsats. Det er vigtigt at bemærke, at det kun er den offentlige indsats relateret til grundvand, som skal revurderes og ikke selve forureningskortlægningen.

Projektet er målrettet lokaliteter kortlagt på vidensniveau 2 på baggrund af konstateret diesel-/fyringsolie, da det største potentiale for revurdering af grundvandsrisikoen forventes at ligge inden for denne type af kulbrinteforureninger. Afgrænsningen sikrer samtidig, at projektet primært fokuserer på de mange små og mellemstore spild ofte relateret til private fyringsolie-tanke og ikke på større spild fra f.eks. tankstationer, industrielle tankanlæg mv.

Projektets formål er at udvikle et fagligt velfunderet og praktisk anvendeligt beslutningsgrundlag for en revurdering, der gør det muligt at afgøre, hvilke kulbrinteforureninger, der fortsat kræver en offentlig indsats i forhold til grundvand, og hvilke der ikke længere gør. Fra projektets start har det været afgørende, at revurderingen kan gennemføres uden behov for yderligere, ressourcekrævende fysiske undersøgelser af forureningerne, men baseres på eksisterende data fra tidligere undersøgelser.

1.2 Metodebeskrivelse

Vurderingen af kulbrinteforureningernes grundvandsrisiko bygger på fire delanalyser:

1. Jupiterudtræk: Data er udtrukket fra Jupiter-databasen for at skabe overblik over, hvilken observeret risiko kulbrinteforureninger udgør for drikkevandsindvinding.
2. Litteraturgennemgang: En solid forståelse af transport og nedbrydning af kulbrinter fra oliespild i jord og grundvand er afgørende. Litteraturgennemgangen fungerer som dokumentation af både internationale og danske erfaringer og identificerer de forhold, der kan øge eller reducere grundvandsrisici.
3. Udtræk fra Region Sjællands database: Analyse af data fra Region Sjællands kortlagte kulbrinteforureninger, med henblik på at vurdere den overordnede risiko.
4. GrundRisk³-beregninger: Modelberegning af kulbrintekoncentrationer langs forureningsfaner og i det administrative kontrolpunkt 100 m nedstrøms kildeområde for en række scenarier.

³ GrundRisk er et værktøj til at vurdere forurenede grunde og deres påvirkning på grundvandet. Beregningsværktøjet beregner, ved en analytisk model for vertikal og horisontal stoftransport, koncentrationer langs fanen i grundvandsmagasinet samt for et administrativt kontrolpunkt 100 m nedstrøms fra punktkilden.

2. Dataudtræk fra Jupiter

For at vurdere den samlede risiko, som kulbrinteureninger udgør for drikkevandsforsyningerne, er relevante forureningsdata udtrukket fra Jupiter-databasen.

2.1 Beskrivelse af udtræk

Data er udtrukket af Jupiter-databasen pr. den 11. februar 2025. Datasættet indeholder analyseresultater for grundvandsprøver siden 1. januar 2008 for benzen og kulbrintefraktioner i intervallet C₅ – C₄₀ (se Bilag 1 for oversigt over kulbrintefraktioner). Der er ikke skelnet mellem kulbrintefraktionerne, og de er heller ikke aggregeret til en total kulbrintekonzentration. Det medfører, at analyseresultater for f.eks. C₁₀–C₂₅ er sidestillet med resultater for C₂₅–C₃₅, og at eventuelle påviste koncentrationer ikke er summeret pr. prøve eller boring. Benzen er inkluderet i analysen da benzen er en risikodrivende komponent i kulbrinteureninger.

Følgende boringstyper er inkluderet i dataanalysen:

- V Vandforsyningsboring/nødvandsforsyningsboring/sænkning
- VP Privat husholdning/drikkevand udenfor vandværk
- VR Reserve/Nødvands boring
- VV Vandværksboring

Desuden er boringer, hvor anlægsnavnet indeholder "afværge" eller "losse" sorteret fra, for at sikre at analysen er målrettet påvirkningen af vandforsyningerne.

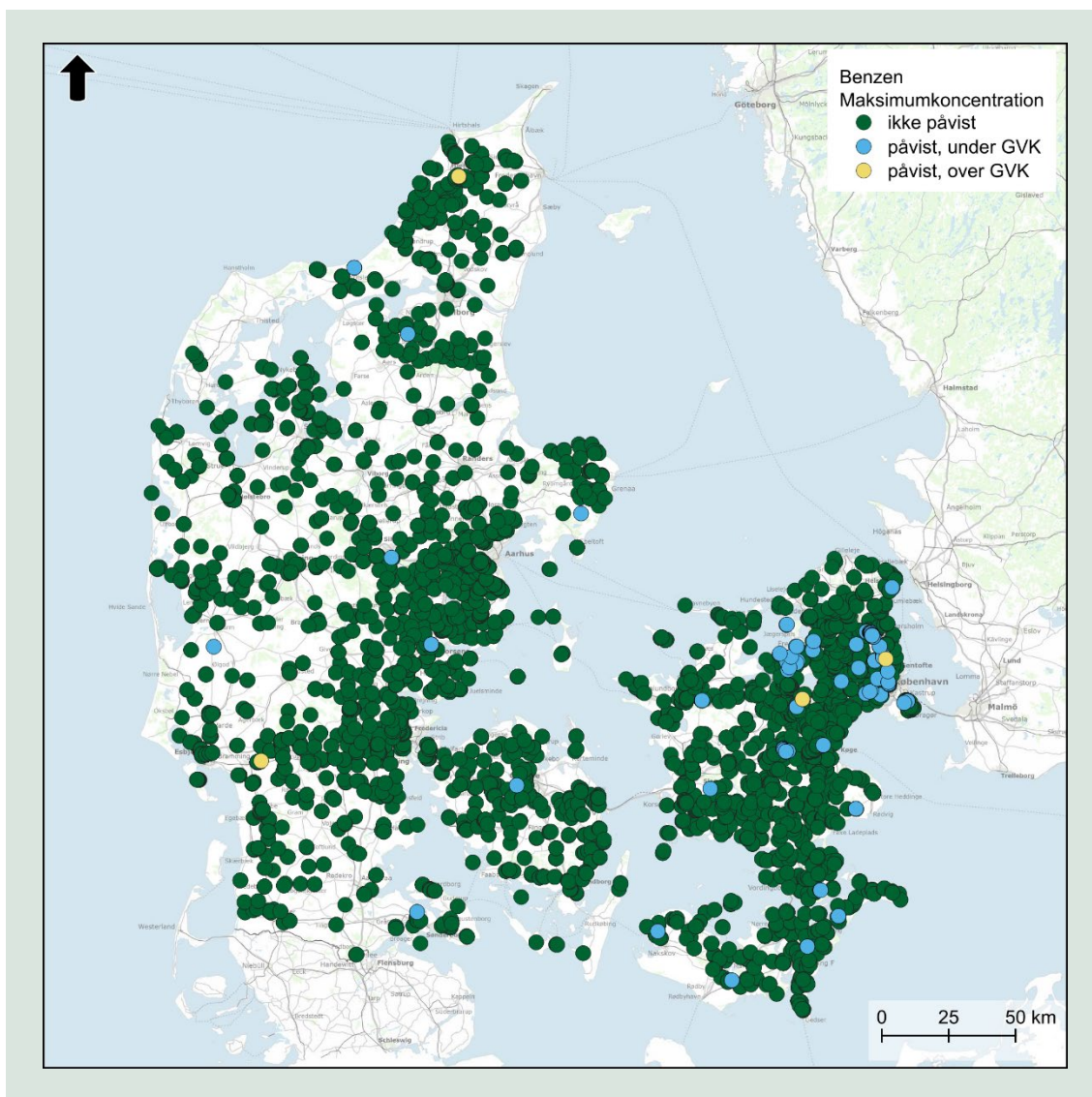
For alle boringer er der udarbejdet en opgørelse over påviste kulbrinteindhold samt overskridelser af Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium (GVK). For hver boring er både den højeste påviste kulbrintekonzentration og koncentrationen i den senest analyserede vandprøve (2008–2025) angivet.

2.2 Benzen

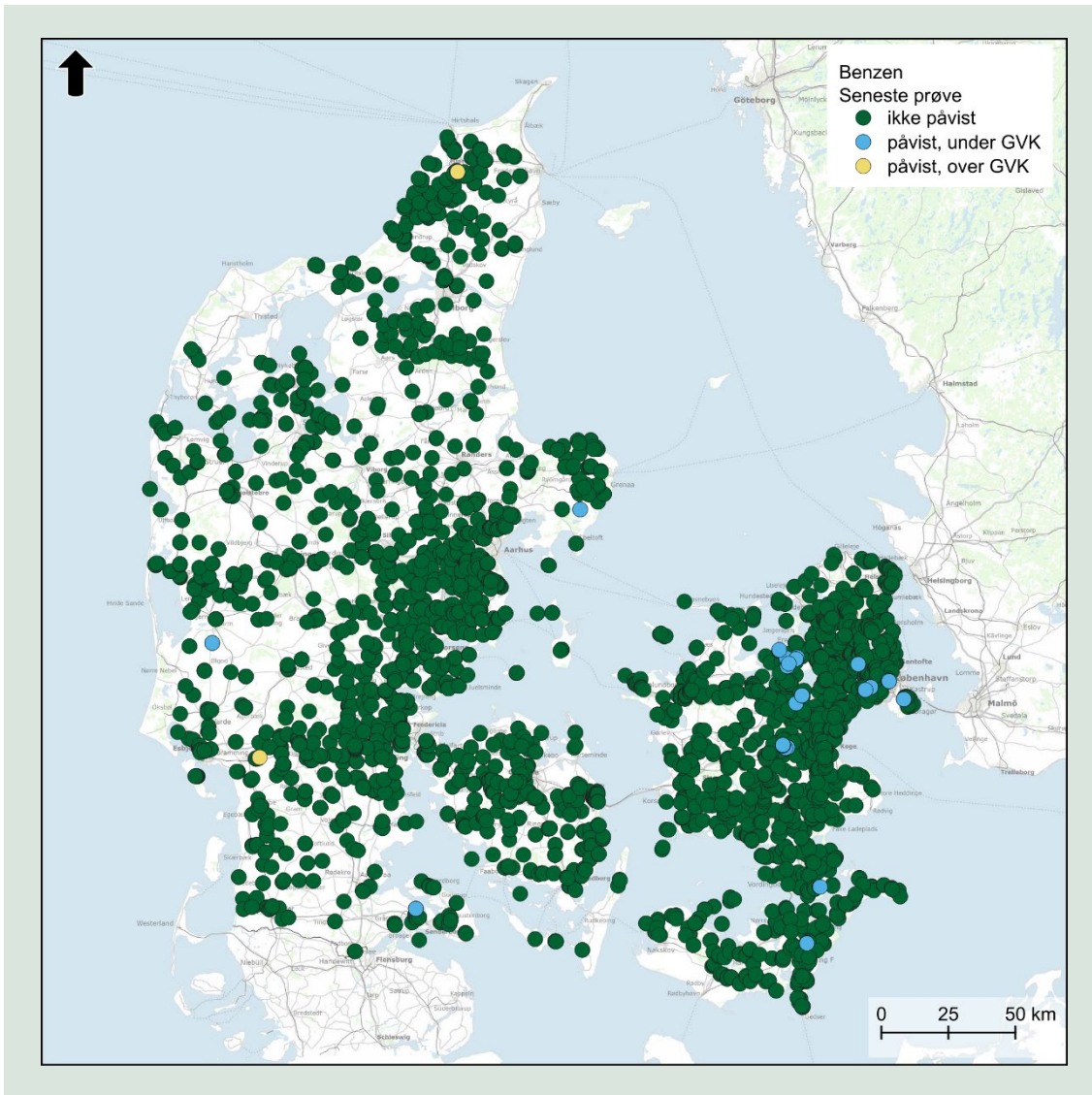
I datasættet er der analyseresultater for indhold af benzen i vandprøver udtaget fra 3.961 boringer. På landsplan er der påvist indhold af benzen over detektionsgrænsen (DG) i 70 boringer, hvoraf indholdet i fire af disse var over GVK på 1 µg/l (TABEL 1, FIGUR 1). I den senest analyserede vandprøve fra hver boring, er der påvist indhold af benzen over detektionsgrænsen i 27 af de 3.961 boringer, hvoraf der i kun to boringer er påvist indhold af benzen over GVK (TABEL 1, FIGUR 2). Fund af benzen, der overstiger GVK, er altså sjældne og ikke nødvendigvis vedvarende.

TABEL 1. Opgørelse over antal boringer med højeste påviste benzenkoncentration over henholdsvis detektionsgrænsen (DG) og Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium (GVK) samt resultatet af den senest analyserede vandprøve.

Benzen	DG (µg/l)	GVK (µg/l)	Boringer antal			Boringer andel (%)	
			I alt	≥DG	≥GVK	≥DG	≥GVK
Højeste påviste konc.	0,02	1	3961	70	4	1,8 %	0,1 %
Seneste vandprøve	0,02	1	3961	27	2	0,7 %	0,05 %



FIGUR 1 Den geografiske fordeling af boringer med angivelse af de højeste påviste benzenkoncentrationer siden 1. januar 2008. Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium (GVK) for benzen er 1 µg/l.



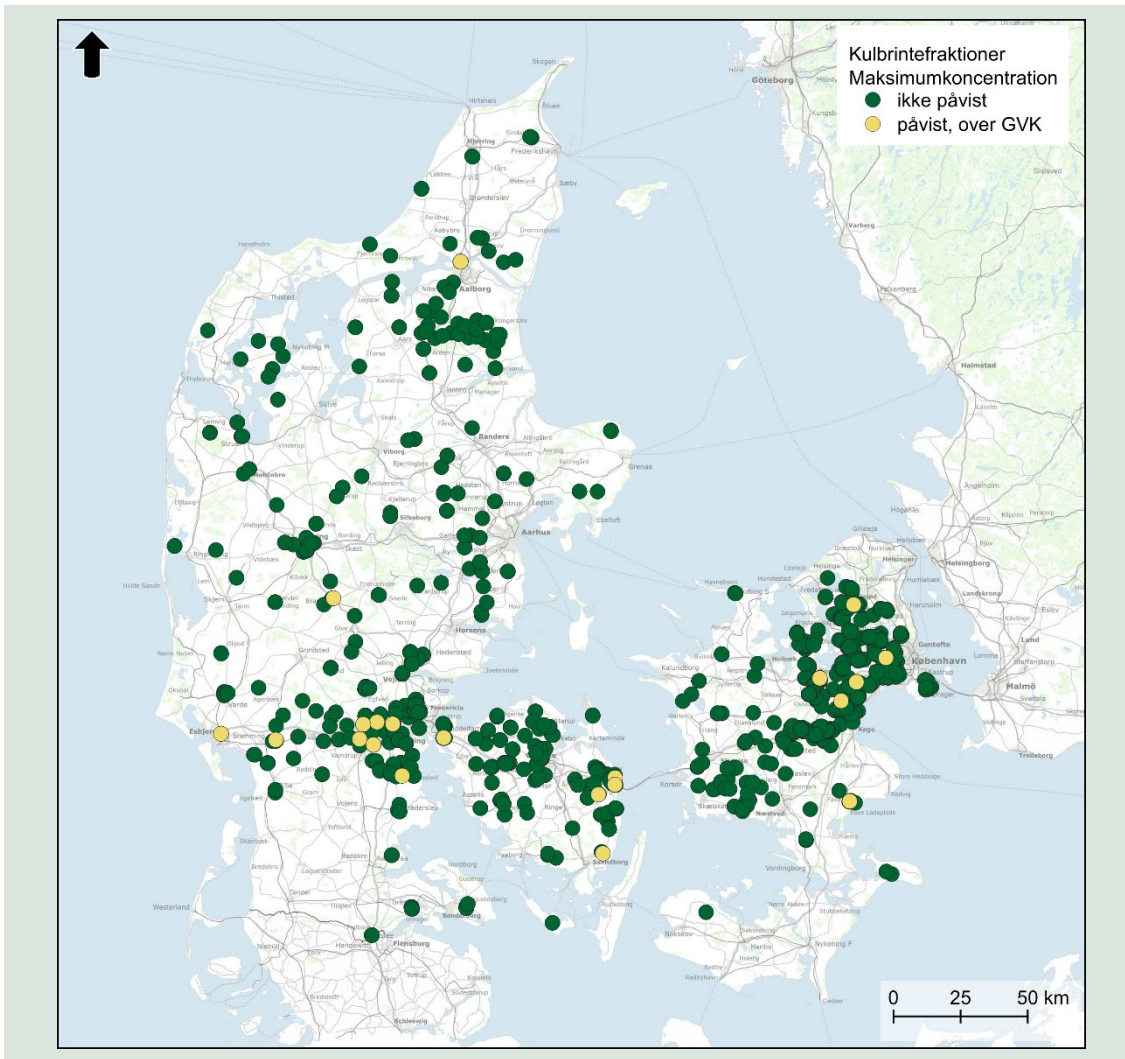
FIGUR 2. Den geografiske fordeling af boringer med angivelse af de seneste målte benzenkoncentrationer. Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium (GVK) for benzen er 1 µg/l.

2.3 Kulbrintefraktion C₅ – C₄₀

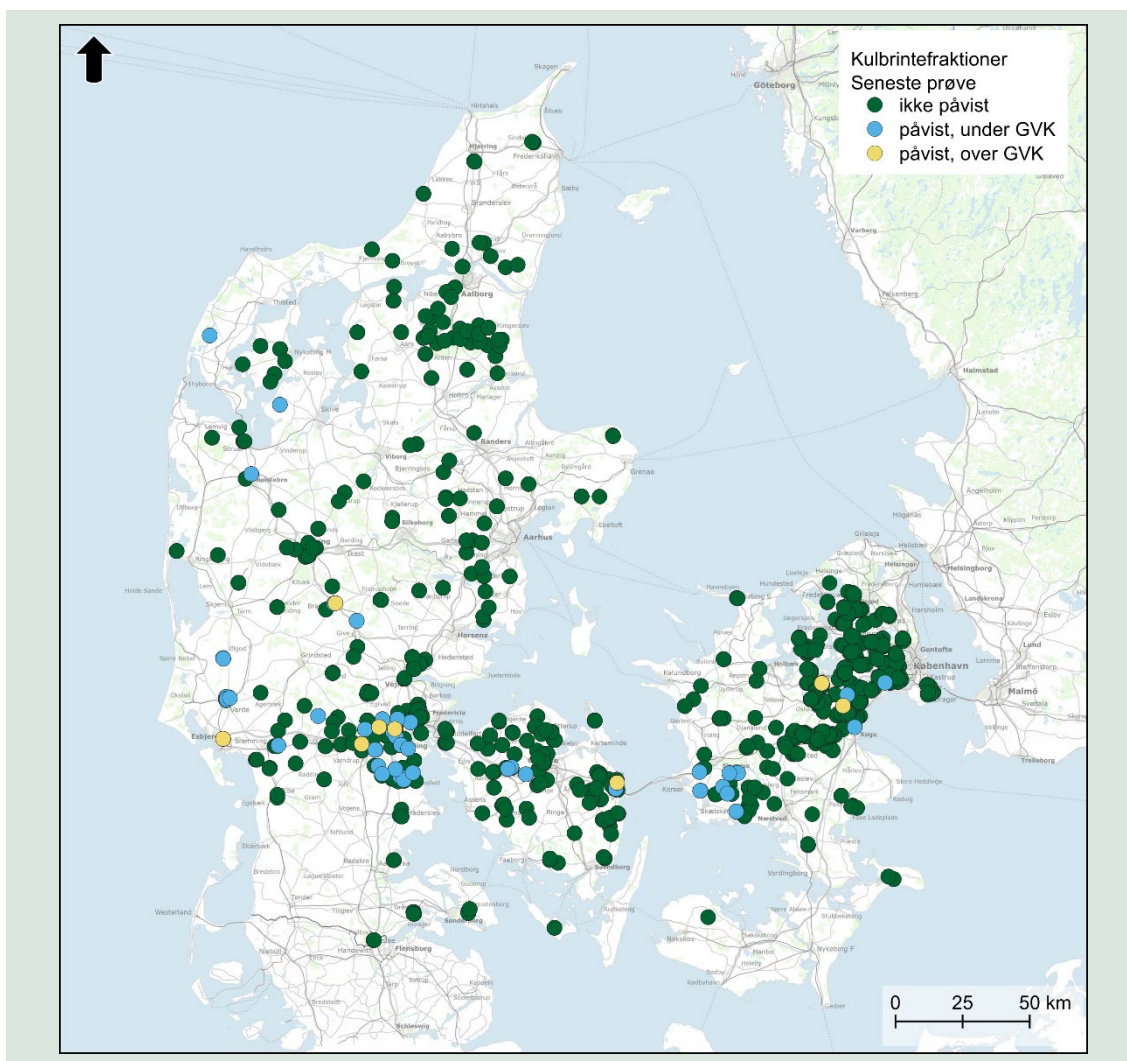
I datasættet er der analyseresultater for indhold af kulbrintefractionen C₅ – C₄₀ i vandprøver udtaget fra 1.063 borer. På landsplan er der i 21 borer påvist kulbrinteindhold over grundvandskvalitetskriteriet (GVK) på 9 µg/L (**TABEL 2, FIGUR 3**). For den senest analyserede vandprøve i hver boring er der påvist kulbrinteindhold over detektionsgrænsen (DG) i 63 af de 1063 borer, men kun i 8 borer er indholdet over GVK (**TABEL 2, FIGUR 4**). Det skal bemærkes, at DG alene angiver den laveste koncentration, der kan måles analytisk, og derfor ligger væsentligt under GVK. Desuden dækker betegnelsen "kulbrinter" ikke nødvendigvis forurening fra oliespild, men også kan stamme fra f.eks. smøremidler brugt under borearbejde (fedt på forerør m.v.).

TABEL 2. Opgørelse over antal borer med højeste påviste kulbrintekonzentration over henholdsvis detektionsgrænsen (DG) og Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium (GVK) samt resultatet af den senest analyserede vandprøve.

Kulbrintefraktioner	DG (µg/l)	GVK (µg/l)	Boringer antal			Boringer andel (%)	
			I alt	≥DG	≥GVK	≥DG	≥GVK
Højeste påviste konc.	2-9	9	1063	21	21	2,0 %	2,0 %
Seneste vandprøve	2-9	9	1063	63	8	5,9 %	0,8 %



FIGUR 3. Den geografiske fordeling af borer med angivelse af de højeste påviste kulbrintekonzentrationer (C₅-C₄₀) siden 1/1 2008. Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium (GVK) for totalkulbrinter er 9 µg/l.



FIGUR 4. Den geografiske fordeling af boringer med angivelse af de seneste målte kulbrintekonzentrationer (C₅-C₄₀). Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium (GVK) for totalkulbrinter er 9 µg/l.

Kulbrinter indgår ikke som en del af analyseprogrammet for den nationale grundvandsovervågning (GRUMO). Der rapporteres dog resultater fra de almene vandforsynings overvågning af indvindingsboringer (boringskontrollen) for kulbrintefraktioner samt BTEX⁴ (Thorling et al., 2024). I vandforsyningsindtag er der i perioden 2019-2023 påvist indhold over detektionsgrænsen for både benzen samt kulbrintefraktionerne C₆-C₃₅ og C₁₀-C₂₅. Af disse tre stoffer/kulbrintefraktioner var der kun tre fund af benzen over kravværdien (KV), se TABEL 3.

De rapporterede niveauer af benzen og kulbrintefraktioner i vandforsyningsindtag stemmer godt overens med andelen af fund i dataudtrækket fra Jupiter, som er udarbejdet i forbindelse med dette projekt.

⁴ BTEX omfatter Benzen, Toluen, Ethylbenzen og Xylener.

TABEL 3. Opgørelse over analyseresultater for kulbrinter og benzen fra aktive vandforsyningsindtag i perioden 2019-2023. Det totale antal indtag er angivet sammen med andelen af boringer med påviste indhold over detektionsgrænsen (DG) for indtag med mindst ét fund og påviste indhold over kravværdien (KV) for indtag med mindst én overskridelse. Det typiske interval for detektionsgrænsen (DG) er angivet. Redigeret fra Thorling et al. (2024).

Stofnavn	DG (µg/l)	KV (µg/l)	Indtag antal			Indtag andel (%)	
			I alt	≥DG	≥KV	≥DG	≥KV
Benzen	0,02	1	2782	29	3	1,0	0,1
C ₆ -C ₃₅ kulbrintefraktion	2-9	-	651	7	-	1,1	-
C ₁₀ -C ₂₅ kulbrintefraktion	5-8	-	743	18	-	2,4	-

Til sammenligning blev der i perioden 2019-2023 fundet mindst ét pesticid i knap 42 % af de undersøgte vandforsyningsindtag. Heraf havde ca. 12 % af indtagene mindst én overskridelse af kvalitetskravet (0,1 µg/l) og knap 2 % af indtagene havde mindst én overskridelse for summen af pesticider (0,5 µg/l).

Ligeledes blev der i samme periode påvist mindst én type kloreret opløsningsmiddel i ca. 10 % af 2.473 undersøgte vandforsyningsindtag og en overskridelse af kravværdien i 35 vandforsyningsindtag (1,4 %). De klorerede opløsningsmidler er mere sammenlignelige med kulbrinterne i den forstand, at de modsat pesticiderne alene er relateret til punktkilder. Det hyppigst påviste klorerede opløsningsmiddel var 1,1-dichlorethan med en fundandel på knap 4 %.

3. Litteraturstudium

En god forståelse af transport og nedbrydning af opløste kulbrinter fra oliespild er afgørende for at kunne vurdere risikoen for grundvandet fra en forureningsfane. Foruden de geologiske og hydrogeologiske forhold styres spredningen af kulbrinter i grundvandet af en række ikke-destruktive processer såsom sorption, dispersion og fordampning til den umættede zone, samt af destruktive processer som abiotisk og mikrobiel nedbrydning.

Sorption omfatter de mekanismer, hvor kulbrinter midlertidigt bindes til jord- og sedimentoverflader, hvilket reducerer deres bevægelseshastighed i forhold til grundvandsstrømningen. Dispersion beskriver den fortynding og udbredelse af forureningen, der opstår som følge af variationer i strømningshastighed og -retning i porestrukturen, og som medfører, at fanen spredes både langs og på tværs af strømningsretningen. Fordampning til den umættede zone kan desuden fjerne de mere flygtige kulbrintekomponenter fra grundvandet og dermed bidrage til en reduktion af den opløste masse.

Mikrobiel nedbrydning er den dominerende mekanisme for massereduktion i kulbrintefaner (f.eks. Bedient, Rifai og Newell, 1994).

Litteraturgennemgangen er tilrettelagt med fokus på at dokumentere omfanget af mikrobiel kulbrintenedbrydning i forureningsfaner, samt bidrage med viden om fanernes udstrækning, der kan anvendes til at fastsætte afstandskriterier for f.eks. indvindingsboringer. Dertil har det været centralt at undersøge, hvilken betydning lokalitetsspecifikke forhold såsom geologi, spillets størrelse og koncentrationer har for fanernes udbredelse.

Grundlaget for indsamling af relevante litteraturkilder har været:

- Danske og udenlandske rapporter.
- Søgning på relevante fagfællebedømte artikler via Google Scholar og DTU findit. Der er ved litteratursøgningen søgt på følgende nøgleord i kombination: "Natural attenuation" med "hydrocarbons" og/eller "fuel", "petroleum", "groundwater", "monitored", "Underground storage tanks".
- Værktøjet "Research Rabbit". Værktøjet er anvendt for at identificere anden beslægtet og relevant litteratur.

Her er der sammenstillet dokumentation for faneudbredelse fra studier udført både i USA og EU. De fleste studier fokuserer på både benzen, toluen, MTBE og enkelte også på TBA⁵ og dieselolie. Da fokus i denne rapport er på diesel- og fyringsolie, vil resultaterne for benzen og dieselolier blive opsummeret her.

I de seneste 10 år har der desuden været stigende fokus på nedbrydningen af kulbrinter i kildeområdet (Natural Source Zone Depletion, NSZD) (Garg et al. 2017; Suthersan, Koons og Schnobrich 2015; CL:AIRE 2024). Denne litteraturgennemgang afgrænser sig til nedbrydning af opløste kulbrinter i grundvandet.

⁵ TBA: tert-butyl alkohol.

3.1 Udbredelse af kulbrintefaner

Danske undersøgelser

For at undersøge udbredelsen af grundvandsforureninger med fyringsolie fra villaolietanke på max 6.000 liter, udførte Larsen et al. (2009) en empirisk analyse baseret på data fra 14 udvalgte lokaliteter i Danmark. De fandt at medianfanelængden for totalkulbrinter var 13 m, og at 90 % af fanerne var under 28 m (afgrænset ved 9 µg/l). For benzenfaner var median-fanelængden 8 m og 90 % fraktilen for fanelængden var 20 m (afgrænset ved 1 µg/l). På samtlige lokaliteter var benzenfanerne kortere end fanerne for totalindhold af kulbrinter, både i medianværdien og i 90 % fraktilen.

Derudover blev der i forbindelse med det danske overfladevandsprojekt, delprojekt 2 (Miljøstyrelsen 2014), gennemført en spørgeskemaundersøgelse i branchen for at kortlægge erfaringsbaserede vurderinger af både typiske og worst-case fanelængder for en række stoffer, herunder benzen og oliestoffer. Den "konstaterede middel" for fanelængder fra olieforureninger var 30 m og 37 m for benzen, og den "konstaterede worst-case" var 150 m for olieforureninger og 250 m for benzenfaner. Disse rapporterede fanelængder er længere end de rapporterede fanelængder for villaolietanke, da svarene relaterer sig til benzen- og olieforureninger generelt, og ikke kun til de mindre villaolietanksager. Der kan desuden være en bias mod længere fanelængder i overfladevandsprojektet, idet jordforureningsloven indebærer, at de prioriterede forureningssager primært omfatter større forureninger med lange faner, hvor risikoen for påvirkning af grundvandet er betydelig (Miljøstyrelsen 2014).

Udenlandske undersøgelser

Opsamlende studier, der undersøger udbredelsen af grundvandsforureninger med benzen og andre oliekomponenter er udført i både Europa og USA. De amerikanske studier omhandler primært benzinspild fra "Underground Storage Tanks" (UST'er), som per definition er tanke med et volumen på mere end 4.160 liter og typisk anvendt i kommercielle sammenhænge (EPA). Studierne repræsenterer dermed primært benzinspild med væsentligt større produktmasser end dem, der normalt ses i Danmark ved spild fra diesel- og fyrings-olietanke. Resultaterne er dog vigtige, da de giver et perspektiv på absolutte worst-case scenarier.

Studier af fanelængder på tværs af lokaliteter har været i fokus i USA siden 1990'erne. Happel, Beckenbach og Halden (1998) undersøgte udbredelsen af grundvandsforureninger med benzen (og MTBE) forårsaget af benzinspild fra UST'er. De afgrænsede benzenfanerne ved en koncentration på 1 µg/l, tilsvarende det danske GVK for benzen, og fandt derved medianfanelængder på ca. 55 m. 90 % af fanerne var kortere end ca. 120 m (se TABEL 4).

Efterfølgende er der udført 13 publicerede studier om udbredelse og stabilitet af benzen-, MTBE- og TBA-faner fra UST'er (inkl. benzintanke/detailsalg) i USA. Resultater fra disse studier sammenstilles i Connor et al. (2015). For benzen evaluerede de fanernes længde baseret på både en 5 µg/l (165 lokaliteter) og en 10 µg/L (826 lokaliteter) koncentrationsgrænse. Hvis fanelængden betragtes ud fra en 10 µg/L koncentrationsgrænse, er 90 % af benzenfanerne 105 m eller kortere. Ved en 5 µg/L koncentrationsgrænse, der ligger tættest det danske grundvandskvalitetskriterium på 1 µg/l, er 90 % af benzenfanerne ca. 130 m eller kortere. Fanelængderne stemmer altså godt overens med de fastlagte fanelængder i Happel, Beckenbach og Halden (1998), til trods for forskelle i koncentrationsafgrænsningen.

For at undersøge om de typiske fanelængder dokumenteret i de amerikanske studier er repræsentative for Europæiske forhold, undersøgte Kulkarni et al. (2018) udbredelsen af bl.a. benzenfaner forårsaget af brændstoftspild (inkl. benzintanke/detailsalg og produktionsanlæg) for en række europæiske lokaliteter. De fandt at medianlængden for benzenfanerne (53 m) stemmer overens med medianfanelængderne rapporteret i Connor et al. (2015) og Happel, Beckenbach og Halden (1998), men at den estimerede 90 %-fraktil for fanelængder er

længere end rapporteret i de amerikanske studier, se TABEL 4. Forskellen i 90 %-fraktilen for fanelængderne tilskrives i studiet potentielt tilfældig bias, da der kun blev undersøgt 39 benzenfaner i Kulkarni et al. (2018). Forfatterne bag Kulkarni et al. (2018) kan derfor ikke afgøre, om den højere 90%-fraktil repræsenterer reelle forskelle mellem de hydrogeologi-ske forhold i USA og Europa, eller om forskellen skyldes tilfældigheder.

O'Reilly et al. (2021) undersøger, hvorvidt resultaterne for benzen er anvendelige til estimering af fanelængder for fx dieselolie. Datagrundlaget er baseret på den californiske GeoTracker-database, der rummer analyseresultater fra mere end 14.000 forurenede lokaliteter, hvoraf over 11.000 er forurenede med olieprodukter, antageligt hovedsageligt fra ben-zinspild (McHugh et al. 2022; CA gov. 2025). De finder, at 90 %-fraktilen er 71 m for benzen-faner og 80 m for dieseloliefaner, baseret på data fra hhv. 293 og 244 lokaliteter. De vurderer, at resultater for udbredelse af dieseloliefaner i grundvand er sammenlignelige med resultaterne for benzen-faner.

Det er vigtigt at bemærke, at selv for de store benzinspild repræsenteret i de udenlandske studier, er de allerfleste faner (90 %) ca. 130 m eller derunder, og den typiske fanelængde for både benzen og dieselolier er højst 55 mv.

TABEL 4. Opsummering af data for fanelængder for benzen og dieselolie.

Studie	Happel, Beckenbach og Halden (1998)	Connor et al. (2015)	Kulkarni et al. (2018)	O'Reilly et al. (2021)		Larsen et al. (2009)	
Geografisk område	USA (CA)	USA (flere stater)	Europa	USA (CA)			Danmark
Lokalitets-/tanktype	UST	UST	Brændstofspild, inkl. tankstationer.	UST			Villaolietanke (under 6000 L)
Stoffer (relevante)	Benzen	Benzen	Benzen	Benzen	Dieselolie (C ₁₀ -C ₂₈)	Fyringsolie (total kulbrinter)	Benzen
Afgrænsningskriterium (µg/l)	1 µg/l	5 µg/l 10 µg/l	10 µg/l	5 µg/l	100 µg/l	9 µg/l	1 µg/l
Antal faner evalueret	50	165 (5 µg/l) 826 (10 µg/l)	39	293	244	14	14
Median fanelængde	~55 m	55 m (5 µg/l) 43 m (10 µg/l)	53 m	27 m	32 m	13 m	8 m
90 %-fraktil fanelængde	~120 m	130 m (5 µg/l) 105 m (10 µg/l)	295 m	71 m	80 m	28 m	20 m

3.2 Betydende parametre for fanelængde

I de gennemgåede studier er der forsøgt identificeret parametre, der har betydning for længden af forureningsfaner fra kulbrinte-forureninger. Flere studier peger på, at spildets størrelse (produktvolumen) og koncentrationsniveauerne i fanen har større betydning, mens geologiske forhold har mindre betydning for udbredelsen af kulbrintefaner.

I Larsen et al. (2009) undersøges fanelængderne som en funktion af en række parametre, og de vurderer, at de styrende parametre for fanens udbredelse primært er spildets størrelse (produktmængde/masse) samt tilstedeværelsen af fri fase i kildeområdet.

Spildmængder over 500 kg medførte en fordobling af fanelængden sammenlignet med spild under 500 kg. På de lokaliteter, hvor der forekom fri fase, var fanelængderne 1,5-2 gange længere end på lokaliteter uden fri fase. Desuden fandt Larsen et al. (2009) en svag tendens til, at højere maksimal koncentration i grundvandet resulterer i længere faner, samt en svag indikation af, at fanelængderne er kortere, når der forekommer ler i de vandførende aflejringer.

Betydningen af den højeste påviste koncentration for fanernes længde bekræftes i Kulkarni et al. (2018), hvor det fremgår, at de ikke kunne vise en sammenhæng mellem fanelængden og andre lokalitetsspecifikke forhold som fx geologi, hydraulisk ledningsevne, samt hvorvidt der var udført afværgeforanstaltninger på lokaliteten. For benzen fandt de dog en (statistisk) signifikant sammenhæng mellem højere påviste koncentrationer i fanen og længere faner. Kulkarni et al. (2018) undersøgte ligeledes middellængden for benzenfaner med højeste koncentrationer i fanen under 680 µg/l, og fandt at faner med højeste koncentrationer over 680 µg/l var en faktor 5 længere (51 m ift. 260 m).

I Connor et al. (2015) blev der undersøgt 1.300 benzenfaner, der er geografisk fordelt over store dele af USA og placeret i en bred vifte af hydrogeologiske miljøer. De undersøgte fanelængder ligger i et relativt snævert interval, og studiet konkluderer, at hydrogeologiske forhold spiller en mindre rolle for kulbrintefaners udbredelse end andre faktorer som spildets størrelse og biogeokemiske/biologiske nedbrydningsprocesser.

Endeligt skal det bemærkes at Kulkarni et al. (2015) konkluderer, at lokaliteter, hvor der er observeret fri fase i borer, også har associerede højere koncentrationer af benzen i fanen og en lavere nedbrydningsrate i fanen (beregnet ud fra højeste koncentration) sammenlignet med lokaliteter, hvor der ikke er konstateret fri fase.

Selvom studierne omfatter forskellige kulbrintetyper (hhv. benzen og fyringsolie), indikerer resultaterne, at især de maksimale koncentrationer i fanen, spildstørrelse samt tilstedeværelsen af fri fase er afgørende for længden af forureningsfaner.

3.3 Fanestabilitet

Efter et spild gennemgår den resulterende forureningsfane et udviklingsforløb: 1) Udvidelse, hvor fanens længde og/eller koncentrationer i et punkt er stigende, 2) Stabilitet, hvor fanens længde og/eller koncentrationer i et punkt ikke ændrer sig og 3) Aftagende, hvor fanens længde og/eller koncentrationer i et punkt reduceres over tid (Newell og Connor 1998; Connor et al. 2015).

Larsen et al. (2009) undersøgte, hvor længe der går inden fanelængderne er stabiliseret. De vurderer, at alle undersøgte faner er stabiliseret inden for en periode på 2-3 år. Desuden ses indikationer på, at der kan forventes størst reduktion i fanelængder fra spild med en masse under 500 kg olie, samt hvor der ikke forekommer fri fase i kildeområdet.

Da regionerne særligt varetager ældre forureninger, må det antages, at kulbrintefanerne indenfor deres ansvarsområde enten er stabile eller aftagende.

3.4 Dokumentation for nedbrydning

For kulbrinter er biologisk nedbrydning den mest betydningsfulde proces i naturlig nedbrydning af kulbrintefaner.

Larsen et al. (2009) undersøgte analyseresultater med målte indhold af ilt, nitrat og sulfat målt hhv. opstrøms, i fanen og nedstrøms grundvandsforureningen. Data var tilgængelige for 9 ud af 14 sager, og blev vurderet for de otte sager, hvor magasinet er aerobt opstrøms forureningsfanen. I analysen finder Larsen et al. (2009) at indhold af ilt, nitrat og sulfat er lavest i fanerne, hvilket indikerer, at der generelt forekommer mikrobiel nedbrydning af oliekomponenter i fanerne i oprindeligt aerobt grundvand.

Kulkarni et al. (2018) undersøgte ligeledes analyseresultater med målte indhold af ilt, nitrat og sulfat, og desuden for metan, jern og mangan. Redoxforholdene blev undersøgt i fanerne og opstrøms grundvandsforureningen. I alt havde 16 lokaliteter tilstrækkelige data til at vurdere redoxforhold, og af disse viste 13 lokaliteter tegn på mikrobiel nedbrydning. Den mikrobielle nedbrydning ses både ved fald i ilt, nitrat og sulfat i forureningsfanerne, samt ved stigning i metan, jern og mangan i fanen sammenlignet med data opstrøms forurenin-gerne.

McHugh et al. (2022) analyserede nedbrydningsrater i relation til afværgeindsatser på lokaliteter og identificerede, at mikrobiel nedbrydning er en central proces i omsætningen af kulbrinter i grundvand, selv på lokaliteter med en aktiv afværgeindsats.

4. Udtræk fra Region Sjællands database

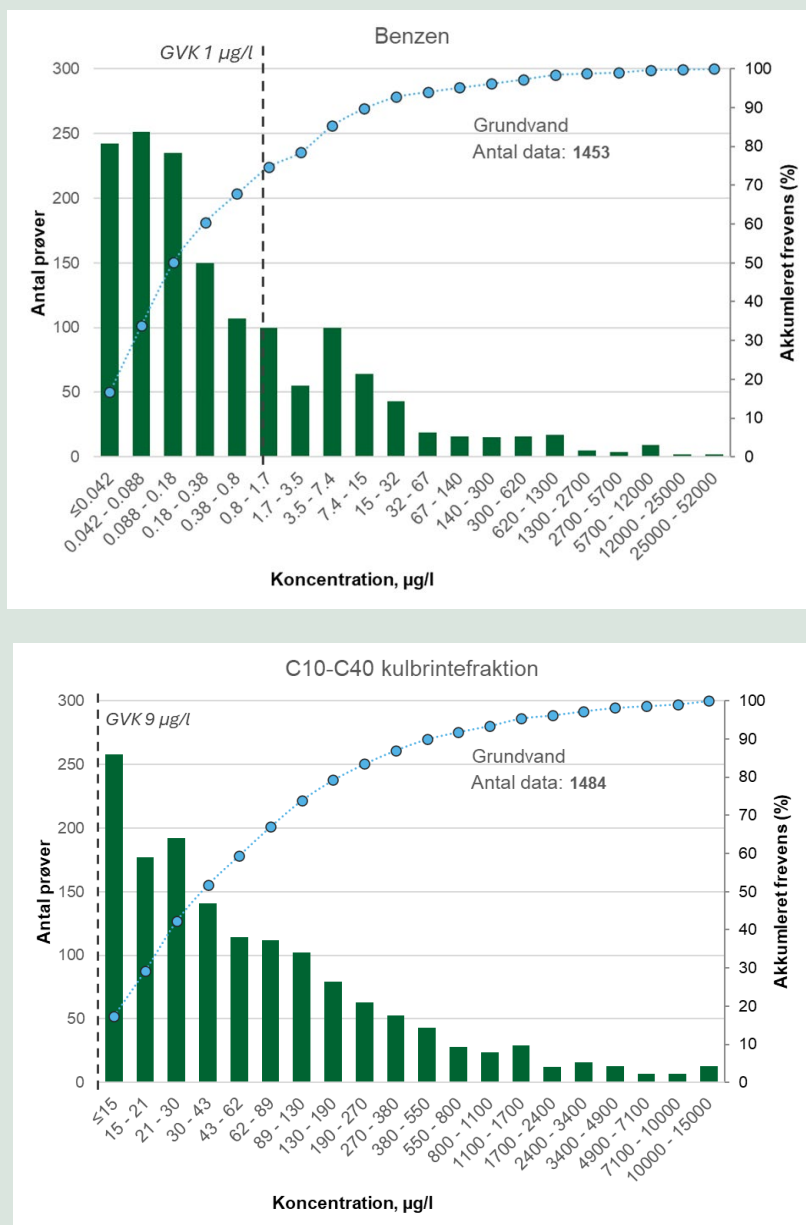
For at vurdere risikoen i forhold til grundvand i regionernes kulbrintesager er der gennemført en overordnet kvantitativ beskrivelse af forureningsdata fra alle V2-kortlagte lokaliteter med analyseresultater for kulbrinter i Region Sjællands database. Datasættet er udtrukket fra Geo-GIS databasen i januar 2025 og indeholder i alt analyseresultater fra 5.003 vandprøver fra 802 lokaliteter. Der findes enkelte prøver fra perioden 1993 – 2010, men størstedelen af prøverne er fra perioden 2010 – 2024. Lokaliteter, der primært er undersøgt på grund af forurening med andre stoffer end kulbrinter, f.eks. klorerede opløsningsmidler, er inkluderet i datasættet, når der også forelå kulbrinteanalyser.

Der er ikke fuld overensstemmelse mellem de anvendte analysepakker i deres opdeling af kulbrintefraktioner. For at kunne sammenligne kulbrintekoncentrationer på tværs af analyseprogrammer og lokaliteter er alle målte fraktioner i en given vandprøve derfor aggregeret til en C₁₀-C₄₀ kulbrintefraktion. Hvis en prøve har påvist indhold af fx C₁₀-C₁₅, men ikke for C₁₅-C₂₀, er koncentrationen af C₁₅-C₂₀ fraktionen inkluderet i den aggregerede fraktion (C₁₀-C₄₀) med 0.5 detektionsgrænsen for prøven, jf. Miljøstyrelsens retningslinjer (FAQ - Miljøfarlige forurenende stoffer). Fraktionen C₆-C₁₀ er ikke medtaget i dataudtrækket, da projektet primært fokuserer på de tungere kulbrinter, og benzen er håndteret særskilt.

I den følgende analyse er alle prøver medtaget uanset prøvedybden. Dybderne for vandprøver fordeler sig således at 90 % af prøverne er udtaget mindre end 25 m u.t., og heraf er halvdel af prøverne udtaget i dybder i intervallet 0 til 6 m u.t.

4.1 Fordelinger, sumkurver og fraktiler for koncentrationer af benzen og C₁₀-C₄₀ kulbrintefraktion i grundvand

For at få et overordnet billede af, hvilke koncentrationsniveauer af kulbrinter, der påvises i vandprøver i regionens database, er der udarbejdet histogrammer og sumkurver samt beregnet fraktiler for koncentrationer af hhv. benzen og den aggregerede C₁₀-C₄₀ kulbrintefraktion. Histogrammer og sumkurver for benzen og C₁₀-C₄₀ kulbrintefraktion ses i FIGUR 5, og medianværdier og 90 %-fraktiler ses af TABEL 5.



FIGUR 5. Fordeling og sumkurve af koncentrationer for påviste vandprøver for benzen samt C₁₀-C₄₀ kulbrintefractionen i Region Sjællands datasæt. Bemærk logaritmisk x-akse.

Det ses af sumkurven for benzen, at ca. 70 % af prøverne ligger under GVK for benzen på 1 µg/l. Koncentrationsfordelingen domineres af prøver med lave koncentrationer, og kun få prøver indeholder benzen i koncentrationer over 1.300 µg/l. TABEL 5 viser, at mediankoncentrationen for benzen ligger på ca. 0,18 µg/l, og 90 % af prøverne har en koncentration under 16 µg/l benzen.

For kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ ligger næsten alle prøver over GVK for totalkulbrinter på 9 µg/l. Detektionsgrænsen for analyseresultatet er rapporteret for en del af prøverne, og for disse prøver ligger detektionsgrænsen for kulbrintefraktionerne typisk på 5 – 10 µg/l for enkeltfraktionerne og på 10 – 18 µg/l for den aggregerede C₁₀-C₄₀ kulbrintefraktion, dvs. tæt på eller over GVK for totalkulbrinter. TABEL 5 viser, at mediankoncentrationen for kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ ligger på ca. 42 µg/l, og 90 % af prøverne indeholder koncentrationsniveauer under 775 µg/l.

TABEL 5. Mediankoncentration og 90 %-fraktil for påviste indhold i vandprøver for koncentrationer af hhv. benzen og C₁₀-C₄₀ kulbrintefraktion.

Parameter	GVK (µg/l)	Antal prøver (påvist)	Median (µg/l)	90 %-fraktil
Benzen	1	1.452	0,18	16,0
C ₁₀ -C ₄₀ kulbrintefraktion	9	1.511	42	775

Da ca. halvdelen af de sager, der indgår i datagrundlaget, er undersøgt på baggrund af risiko fra andre stoffer end kulbrinter, er medianværdien og 90 %-fraktilen genberegnet for alle prøver, der har indhold af kulbrinter over grundvandskvalitetskriteriet, som en mere repræsentativ beskrivelse af fordelingen af koncentrationer på lokaliteter med påvist kulbrinteforurening. De genberegnete medianværdier og 90 %-fraktiler for hhv. benzen og C₁₀-C₄₀ kulbrintefractionen kan ses i TABEL 6. Mediankoncentration for benzen øges til 7,3 µg/l og 90 %-fraktilen øges til 470 µg/l. For kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ er medianen og 90 %-fraktilværdien uændret, da alle prøver for den aggregerede kulbrintefraktion, har koncentrationer over GVK.

TABEL 6. Mediankoncentration og 90 %-fraktil for påviste indhold i vandprøver over grundvandskvalitetskriteriet (GVK). For koncentrationer af hhv. benzen og C₁₀-C₄₀ kulbrintefractionen.

Parameter	GVK (µg/l)	Antal prøver over GVK	Median (µg/l)	90 %-fraktil (µg/l)
Benzen	1	431	7,3	470
C ₁₀ -C ₄₀ kulbrintefraktion	9	1.511	42	775

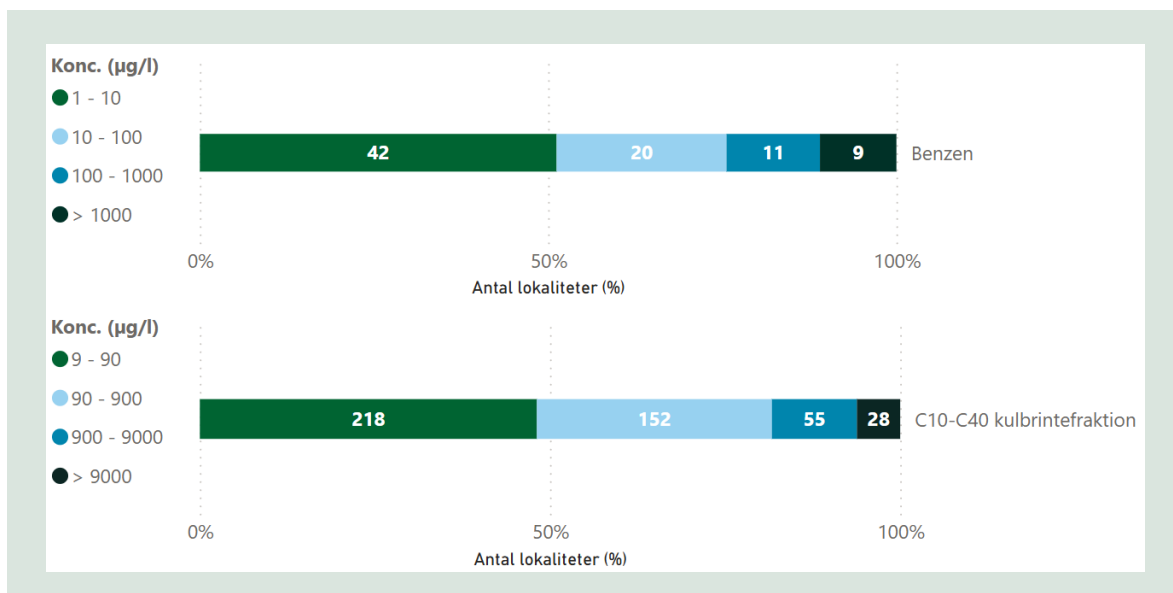
4.2 Højeste påviste koncentrationer for lokaliteter

For at klarlægge koncentrationsniveauer på lokalitetsniveau frem for på prøveniveau er maksimumkoncentrationen i vandprøver for hver enkelt lokalitet udtrukket.

For at klarlægge koncentrationsniveauer på lokalitetsniveau frem for på prøveniveau er den højeste påviste koncentration for hver enkelt lokalitet udtrukket.

Derefter er de højeste påviste koncentrationer grupperet i intervaller efter koncentrationsniveau. Ud af 342 lokaliteter med påviste indhold af benzen, har 260 lokaliteter (76 %) den højeste påviste koncentration under GVK for benzen på 1 µg/l, mens 82 lokaliteter (24 %) har den højeste påviste koncentration over GVK. I datasættet for kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ ligger højeste påviste koncentration for alle 453 lokaliteter over GVK for totalkulbrinter på 9 µg/l.

I FIGUR 6 ses fordelingen af antal lokaliteter med højeste påviste koncentrationer i et givent koncentrationsinterval. Kun lokaliteter med højeste påviste koncentration over GVK for hhv. benzen og totalkulbrinter er vist på figuren.



FIGUR 6. Andelen af lokaliteter med højeste påviste koncentration af benzen (antal lokaliteter: 82, øverst) og kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ (antal lokaliteter 453, nederst) i vandprøver fordelt på koncentrationsniveau. Kun lokaliteter med højeste påviste koncentration over GVK er medtaget i visningen.

FIGUR 6 (øverst) viser at ca. halvdelen af lokaliteterne med højeste påviste koncentration over GVK, har en højeste påviste koncentration af benzen under 10 µg/l (10 gange GVK), mens 9 lokaliteter (ca. 10 % af lokaliteterne med højeste påviste koncentration over GVK) har højeste påviste koncentrationer af benzen over 1.000 µg/l (1.000 gange GVK).

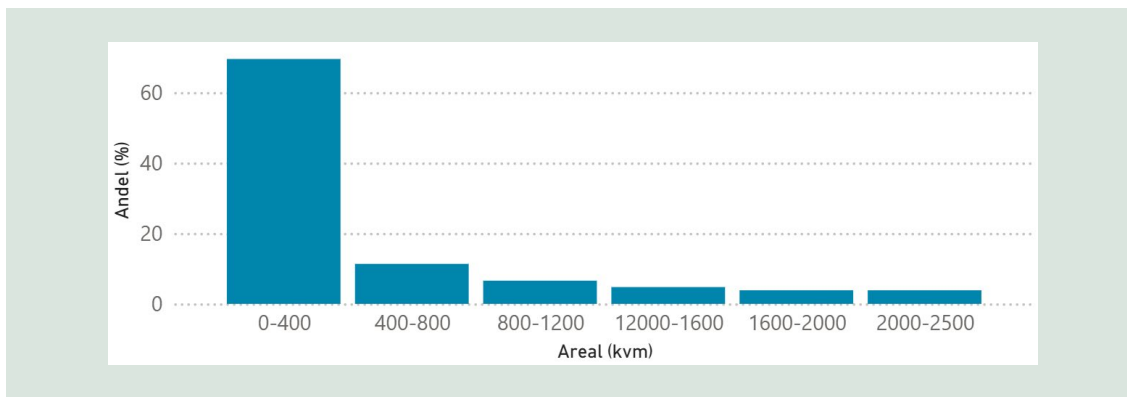
FIGUR 6 (nederst) viser at ca. halvdelen af lokaliteterne med højeste påviste koncentrationer over GVK har en højeste påviste koncentration af kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ under 90 µg/l (10 gange GVK), mens 28 lokaliteter (ca. 6 % af lokaliteterne med højeste påviste koncentration over GVK) har højeste påviste koncentrationer over 9.000 µg/l (1.000 gange GVK).

4.3 Størrelsen på V2-kortlagte arealer

På baggrund af interessen for de mindre til middelstore kulbrinteforureninger er der udført en opgørelse over arealstørrelsen for de V2-kortlagte lokaliteter for at undersøge hvilke, der dominerer i regionens kulbrintesager. I datasættet er der information om arealets størrelse for 583 af lokaliteterne. Af disse er 75 % mindre end ca. 2.500 m².

Fordelingen af arealer for disse lokaliteter (under 2.500 m²) ses i FIGUR 7. For disse mindre lokaliteter, med arealer under 2.500 m², er 70 % under ca. 400 m².

I de følgende afsnit, hvor den rumlige variation i koncentrationsniveauer analyseres, indgår kun lokaliteter med et V2-kortlagt areal under 2.500 m². Analyserne af de generelle koncentrationsniveauer i vandprøverne omfatter derimod samtlige lokaliteter i datasættet, uanset areal.



FIGUR 7. Fordeling af arealstørrelse (m²) af V2-kortlagte arealer i datasættet fra Region Sjælland.

4.4 Koncentration i grundvandet som funktion af afstanden fra kildeområdet

Med udgangspunkt i Region Sjællands database er der gennemført en analyse af, hvordan koncentrationer i grundvandsprøver varierer med afstanden til kildeområdet.

Metode

For hver lokalitet blev med boringen med den højeste påviste vandprøvekonzentration af kulbrinter identificeret. Det antages at placeringen af boringen i det geografiske punkt (x, y) er et repræsentativt punkt for kildeområdet på lokaliteten. Herefter er afstanden mellem dette punkt og andre målepunkter (boringer) beregnet. Koncentrationen i kildeområdet vil ligge i afstanden x=0 og koncentrationerne i de resterende målepunkter på lokaliteten plottes som funktion af afstanden til kildeområdet. Det forventes, at koncentrationerne i målepunkter på en lokalitet vil aftage med afstanden til punktet i kildeområdet, og at vi dermed kan få en indikation på den generelle fanelængde for benzen og kulbrintefaner uden at vurdere de enkelte sagsrapporter.

Data er ikke vurderet på baggrund af strømningsretning eller prøvetagningsdybde, men kun på den absolutte afstand til kildepunktet på jordoverfladen. Desuden er analysen af afstande og koncentrationer begrænset af de tilgængelige data, og det er ikke vurderet, hvorvidt en fane på en given lokalitet er afgrænset langs strømningsretningen. I Region Sjællands database er der fundet 295 lokaliteter med 5 eller flere prøvepunkter, og de danner basis for analysen.

For at få et overordnet billede af, hvor langt væk fra kildeområdet, der forekommer prøver med et givent koncentrationsniveau, er median- og 90 %-fraktilværdier for afstande beregnet på følgende måde:

Koncentrationerne er grupperet i logaritmisk fordelte intervaller, og median- og 90 %-fraktilværdien for afstandene i et givent koncentrationsinterval er beregnet. Kun V2-kortlagte arealer på 2.500 m² eller mindre er medtaget i analysen. Median og 90 %-fraktilværdierne for afstanden til punktet for maksimumskoncentrationen kan ses i FIGUR 8. Beregningen af medianværdier og 90 %-fraktiler for afstandene for et givent koncentrationsinterval går på tværs af alle lokaliteter i datasættet.

Sammenhæng mellem koncentrationsniveau og afstand til kildeområde

For både benzen (FIGUR 8, øverst) og C₁₀-C₄₀ kulbrintefraktion (FIGUR 8, nederst) er det overordnede billede, at koncentrationsintervaller med lavere koncentrationer er et resultat af større afstande, både for median- og 90 %-fraktilværdien for afstande i det givne interval. Dette indikerer at koncentrationsniveauet i prøverne er lavere længere fra kildeområdet, mens de højeste koncentrationer er associeret med kort afstand til kildeområdet.

For benzen (FIGUR 8, øverst) findes 90 % af prøverne i de fleste koncentrationsintervaller mindre 50 m fra kildeområdet. Kun for de laveste koncentrationer, under GVK, er 90 %-fraktilen for afstande til kildeområdet længere end 50 m.

For kulbrintebraktion C₁₀-C₄₀ (FIGUR 8, nederst) er 90 %-fraktilafstanden under 50 m for alle koncentrationsintervaller.



FIGUR 8. Median og 90 %-fraktil for afstande til kildeområdet for koncentrationsintervaller. Data-markøren ligger ved øvre intervalgrænse. Kun afstande, der er tilknyttet prøver med påvist indhold er medtaget i beregningen. For lokaliteter med totalt V2-kortlagt areal på 0 – 2.500 m².

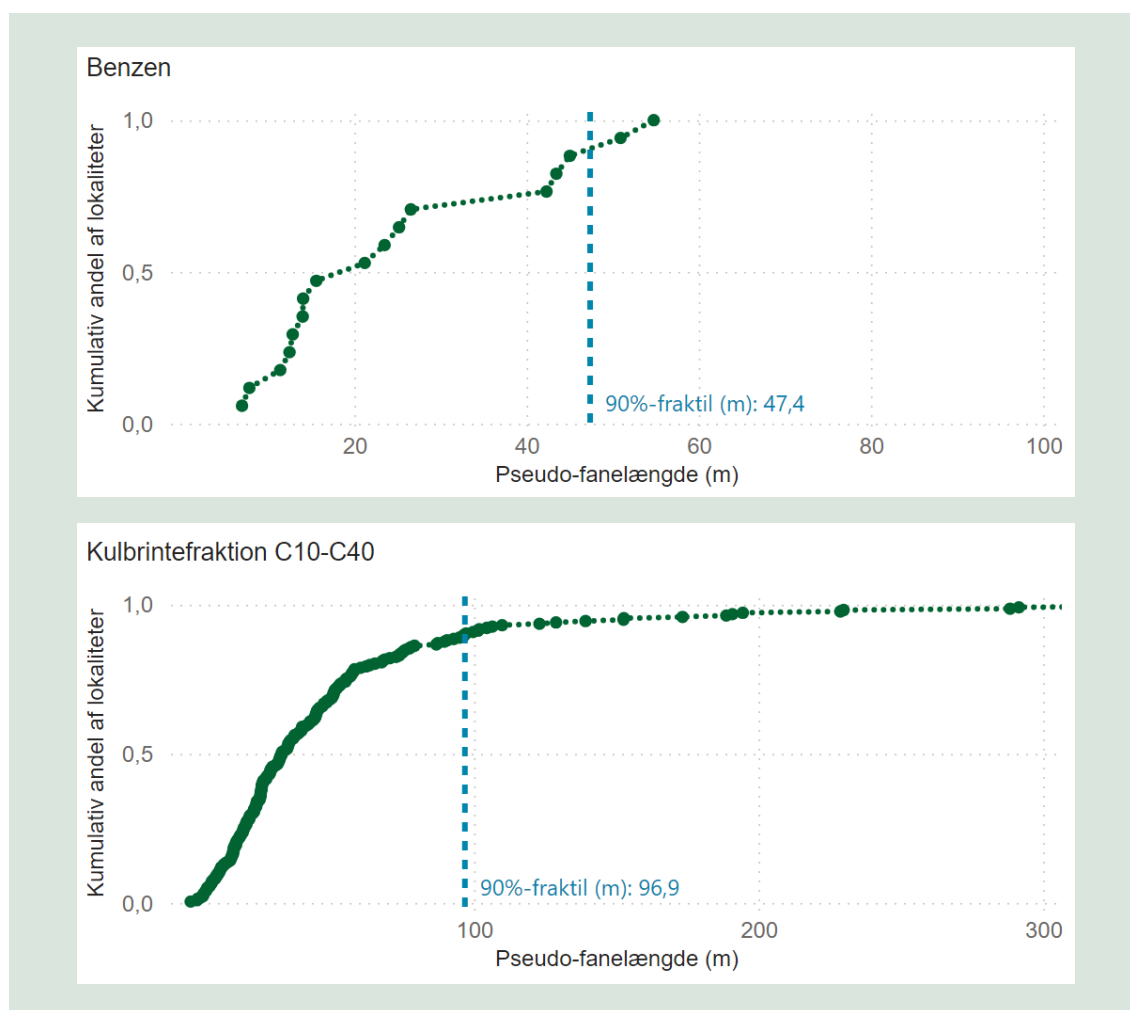
Pseudo-fanelængder

Der er desuden beregnet en såkaldt "pseudo-fanelængde" for hver lokalitet. Pseudo-fanelængden er beregnet for at kunne relatere forureningsfanerne fra sagerne i Regions Sjællands database med fanelængderne rapporteret i litteraturen (se afsnit 3) uden at gå detaljeret ind i

hver sag. Pseudo-fanelængden er beregnet ved at udtrække den længste afstand mellem kildeområdet og et punkt, hvor der er påvist en koncentration, der overskrider GVK. For benzenfaner er afgrænsningsværdien/GVK 1 µg/l, for kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ er afgrænsningsværdien/GVK 9 µg/l. Den beregnede pseudo-fanelængde for hver lokalitet er vist i FIGUR 9, hvor hver prik repræsenterer fanelængden på én lokalitet. Kun lokaliteter med 5 eller flere prøvepunkter og et V2-kortlagt areal ≤2.500 m² er medtaget.

Den beregnede 90 %-fraktil for pseudo-fanelængde for de inkluderede lokaliteter er ca. 100 m for kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ (n=217) og ca. 50 m for benzen (n=17). Det skal dog bemærkes, at der er relativt få lokaliteter med benzenindhold, hvor datagrundlaget har været tilstrækkeligt til at gennemføre beregningen.

Fanelængderne er beregnet fra punktet (boringen) med den højeste påviste koncentration og ikke fra kildeområdets nedstrøms kant, som anvendt i GrundRisk-modellen, jf. afsnit 5. Det betyder, at den beregnede fanelængde i høj grad er afhængig af den rumlige placering af boringer på lokaliteten.



FIGUR 9. Beregnet pseudo-fanelængde per lokalitet, for lokaliteter med 5 eller flere prøvepunkter (grøn prik). Beregnet for lokaliteter med kortlagt V2-areal under 2.500 m².

Tendensen til at de tungere kulbrinter findes i højere koncentrationer længere væk fra kilden end benzen, er i overensstemmelse med Larsen et al. (2009) og O'Reilly et al. (2021), der observerede at kulbrintefaner var længere end benzenfaner.

4.5 Atypiske lokaliteter

I datasættet findes enkelte lokaliteter, hvor grundvandsrisikoen må vurderes særskilt for hver lokalitet og grundvandsrisikoen ikke kan revurderes alene med udgangspunkt i nærværende rapportens konklusioner og anbefalinger.

Lokaliteter, hvor der er påvist koncentrationer i prøver beliggende mere end 100 m fra kildeområdet (som defineret i afsnit 4.4), er udvalgt til videre analyse for at undersøge evt. fælles karakteristika for disse "atypiske lokaliteter".

For benzen er der fire prøver med koncentrationer over kriteriet (1 µg/l), der stammer fra prøvepunkter beliggende mere end 100 m fra kildeområdet. Datagrundlaget er for begrænset til at kunne sige noget kvalificeret om fælles karakteristika for de fire lokaliteter. Derfor vurderes de "atypiske lokaliteter" med fokus på koncentrationen af kulbrintebrændstof C₁₀-C₄₀.

I datasættet indgår der vandprøver med påvist indhold af kulbrintebrændstof C₁₀-C₄₀ der overstiger GVK fra i alt 453 lokaliteter. Heraf er der på 34 af lokaliteter påvist koncentrationer over GVK i 110 vandprøver, som stammer fra prøvepunkter beliggende mere end 100 m fra kildeområdet.

Af de 34 V2-kortlagte lokaliteter har 6 lokaliteter koncentrationer i kildeområdet, der overskrider 10 gange GVK (≥90 µg/l). De kortlagte arealer er for 5 af de 6 lokaliteter større end 2.500 m², og er registreret som hhv. gasværk, sukkerfabrik, losseplads/affaldsdepot, kemisk fabrik og et militært operationsområde. Den 6. er et affaldsdepot med et kortlagt areal på 92 m².

Høje koncentrationer i stor afstand fra kildeområdet kan indikere, at disse typer af lokaliteter enten dækker store arealer og at der dermed er stor afstand mellem undersøgte punkter inden for kildeområdet, eller at forureningen påvirker grundvandet i større afstand fra kildeområdet end hvad der almindeligvis observeres. Sådanne lokaliteter kan derfor kræve særlig opmærksomhed i forbindelse med risikovurdering i forhold til grundvand.

5. GrundRisk-beregninger

GrundRisk er et modelbaseret værktøj til at vurdere forurenede grunde og deres påvirkning af grundvandet. Modellen beregner blandt andet koncentrationer langs fanen i grundvandsmagasinet samt for et administrativt kontrolpunkt 100 m nedstrøms fra punktkildens nedstrøms kant.

For at vurdere den beregnede risiko ved forskellige scenarier for kulbrinte-forureninger er koncentrationen i kontrolpunktet beregnet med en række forskellige parametre for at vurdere betydningen af nedbrydning i risikovurderingen.

5.1 Parametervalg for scenarieberegninger

Formålet med beregningerne i GrundRisk er at undersøge, hvor tykt et dæklag med nedbrydning der skal til, for at grundvandskvalitetskriteriet for hhv. benzen og totalkulbrinter ikke overskrides i kontrolpunktet 100 m nedstrøms kilden.

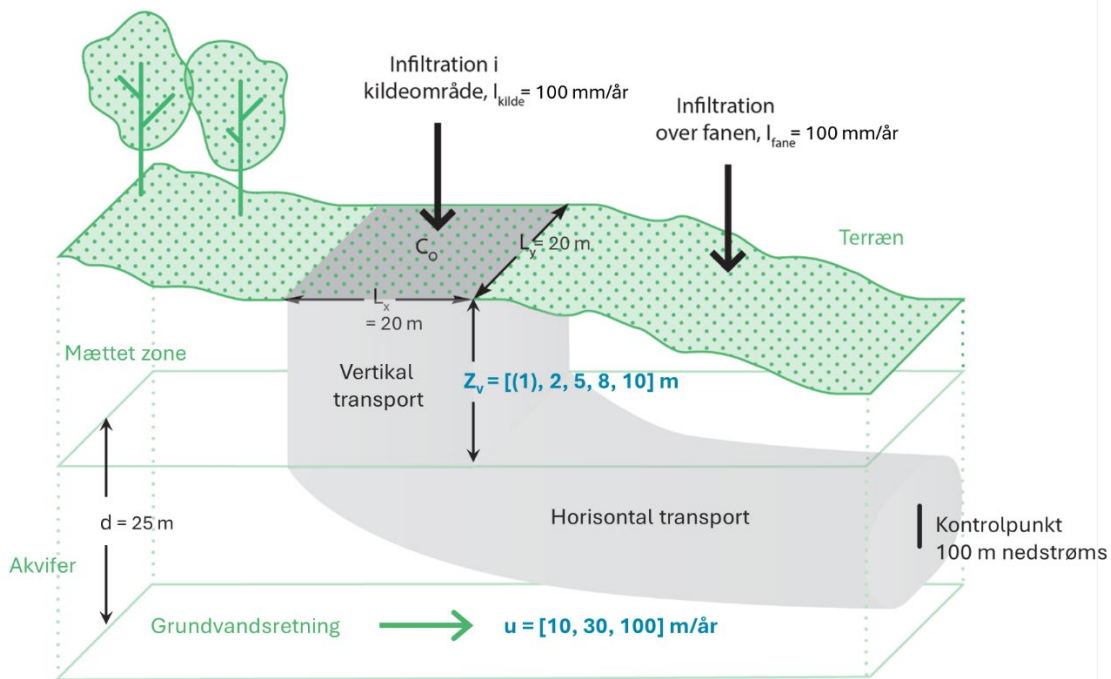
Der er derfor gennemført en række scenarieberegninger for en fiktiv testlokaltet. Scenarierne tager udgangspunkt i udvalgte kombinationer af dæklagstykkelser og grundvandshastigheder i en repræsentativ beregningsmodel for den vertikale transport, og resultaterne er derfor ikke udtømmende. Derudover er der gennemført enkelte beregninger i beregningsmodel 5 for at illustrere betydningen af nedbrydning i den horisontale transport i grundvandsmagasinet.

Nedenfor er beskrevet hvilke parametre, der er valgt som input i scenarieberegningerne. Værdier for input til beregningerne ses i FIGUR 10. Inputparametrene i GrundRisk er valgt med henblik på at simulere et konservativt worst-case scenarie for en kulbrinte-forurening.

Kildeområde og infiltration

Kildeområdets størrelse er sat til 20 x 20 m (400 m²). Godt halvdelen af alle V2-kortlagte arealer i Region Sjællands database er 400 m² eller derunder. Derudover udgør arealer mindre end 400 m² omkring 70 % af de mindre V2-kortlagte arealer under 2.500 m², jf. af-snit 4.3.

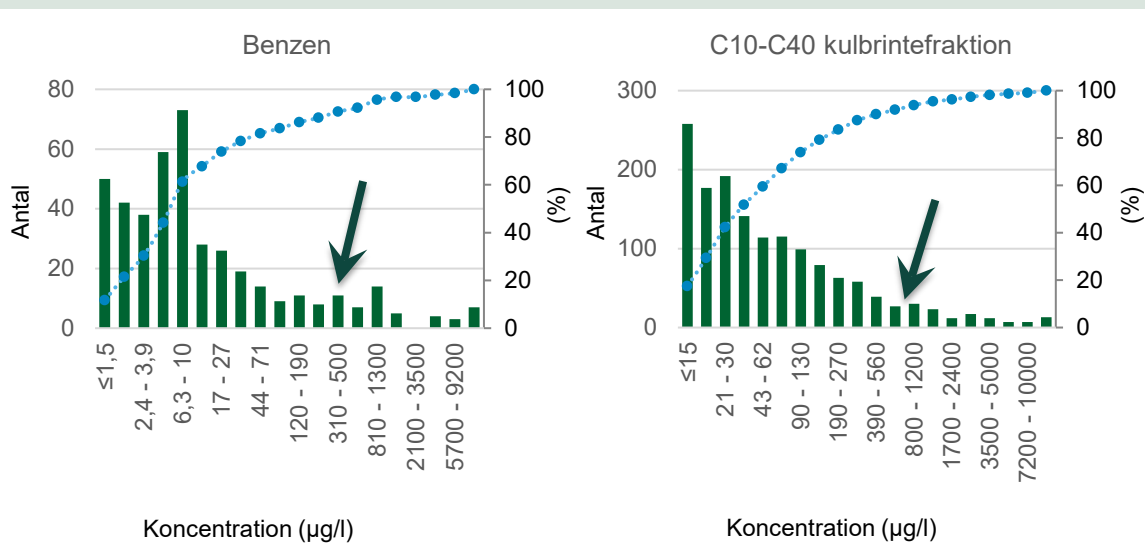
Infiltrationen over kildeområdet er sat til 100 mm/år for at repræsentere grundvandsdannelsen til det førstkomende betydende magasin, dvs. et magasin hvorfra der kan ske eller sker drikkevandsindvinding. I GrundRisk risikovurderes i forhold til dette magasin (Stisen, et al. 2019), og det helt terrænnære vand betragtes derfor ikke som et egentligt indsatsområde. Tidligere DTU-simuleringer har vurderet at en grundvandsdannelse på 100 mm/år er repræsentativ for størstedelen af Region Sjælland og samme værdi anvendes derfor her (Stisen, et al. 2019). Infiltrationen over fanen er sat til samme rate som over kilden (Guide til inputparametre i GrundRisk 2025).



Kildestyrkekoncentration, C_0 (90 %-fraktil)

Benzen: $C_0 = 470 \mu\text{g/L}$

Kulbrinter: $C_0 = 775 \mu\text{g/L}$



FIGUR 10. Inputparametre til GrundRisk-beregninger. Sorte værdier er konstante, værdier angivet med blå skrift er de parametre, der varierer i scenarieberegningerne. Kildestyrkekoncentration, C_0 , er 90 %-fraktil-koncentrationer fra Region Sjællands datasæt for hhv. kulbrintefraktion $C_{10}-C_{40}$ og benzen (pil på histogrammer) i prøver med påvist indhold over GVK ($9 \mu\text{g/l}$ for $C_{10}-C_{40}$ kulbrintefractionen og $1 \mu\text{g/l}$ for benzen).

Modelstof

GrundRisk kan modellere grundvandskoncentrationer af en række stoffer i forureningsfane som funktion af afstanden til kildeområdet. Modelstofferne omfatter ikke de tungere kulbrintefraktioner, som indgår i diesel-/fyringsolie, da det i forbindelse med arbejdet med at definere

nedbrydningsrater til brug i GrundRisk-modellen blev vurderet, at de tungere kulbrinte-fraktioners opløselighed er så lav og deres sorptionsevne så høj, at de sjældent vil udgøre et problem i det administrative kontrolpunkt 100 meter nedstrøms i grundvandet (Ottosen, et al. 2018). Der er derfor ikke identificeret nedbrydningsrater for de tungere kulbrintefraktioner i diesel-/fyringsolie. Modelberegningens risikoscenarier for kulbrintefraktionerne er således beregnet på baggrund af "Kulbrinter, >C₁₀-C₁₅", som er tilgængelig i GrundRisk som modelstof. Risikoscenarierne for benzen er beregnet med benzen som modelstof.

Kildestyrkekonzentration, C₀

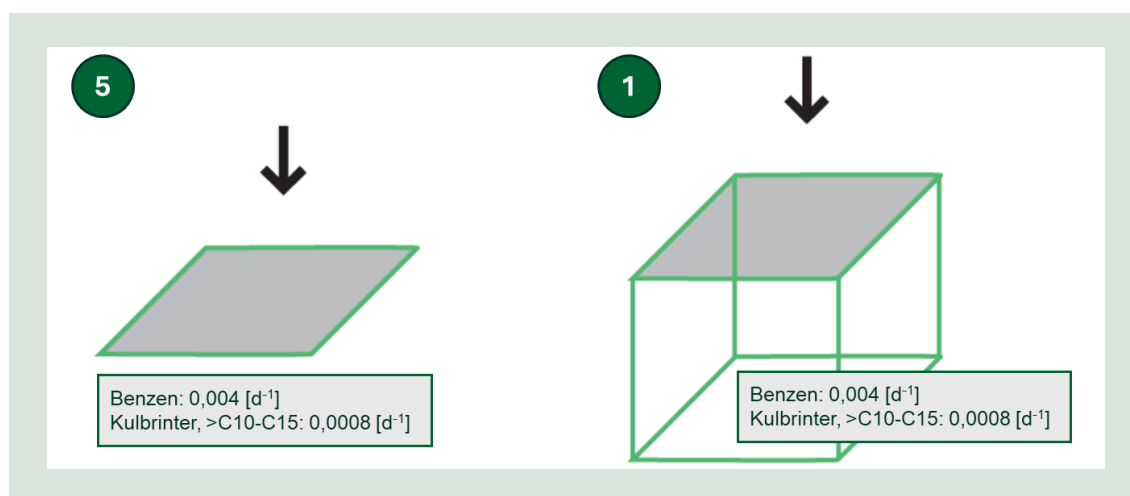
Til beregningerne er anvendt en kildestyrkekonzentration, der svarer til 90 %-fraktilkonzentrationen for prøver i Region Sjællands datasæt, beregnet for prøver med indhold over GVK for hhv., benzen og C₁₀-C₄₀ kulbrinter. De i GrundRisk anvendte kildekonzentrationer kan ses i FIGUR 10.

I beregningerne er det altså høje koncentrationer (90 %-fraktilen), der anvendes over hele kildens areal på 20 x 20 m, hvilket resulterer i konservative risikoberegninger.

Den samlede koncentration af kulbrinter i hver prøve, fordelt over hele C₁₀-C₄₀-intervallet, udgør input til kildekonzentrationen. I GrundRisk modelleres stoftransporten for kulbrinter, >C₁₀-C₁₅, og da modelstoffets fysisk-kemiske egenskaber formentlig ikke er repræsentative for hele C₁₀-C₄₀ spektret, kan det resultere i højere koncentrationer i kontrolpunktet.

5.2 Scenarieberegninger

Der er lavet scenarieberegninger i to forskellige beregningsmodeller for stoftransporten: Model 5 og model 1. En illustration af de anvendte beregningsmodeller ses i FIGUR 11.



FIGUR 11. Beregningsmodeller, hvori der er udført risikoberegninger. Beregningsmodel 5, hvor kilden er placeret direkte oven på grundvandsspejlet (til venstre). Beregningsmodel 1, hvor den vertikale stoftransport sker gennem mættede (anaerobe) forhold (til højre). Anvendte nedbrydningsrater i modellerne er angivet i grå boks.

Der er udført beregninger i beregningsmodel 5, hvor kilden er placeret direkte oven på det betydende grundvandsmagasin, dvs. i kontakt med førstkommande betydende magasin. Dette repræsenterer den mest konservative model, da der ikke indgår et dæklag med nedbrydning.

Da undersøgelsen også omfatter betydning af varierende dæklagstykkelser for nedbrydningen, er der gennemført beregninger i beregningsmodel 1. Denne model beskriver en

forureningskilde beliggende over et dæklag af vandmættet ler, der overlejrer et betydende grundvandsmagasin. Modellen er repræsentativ for geologier med mættede dæklag af moræneler (også sandet/siltet moræneler) over det betydende grundvandsmagasin.

I GrundRisk-modellen medtages lineær sorption (Rosenberg, et al. 2016).

Vertikal transport

Nedbrydning af stofferne er inkluderet som 1. ordens nedbrydning under den vertikale transport og de anvendte nedbrydningsrater er de realistiske, konservative nedbrydningsrater, der er anbefalet i Ottosen et al. (2018) for mættede forhold under vertikal transport. Det er antaget at der er anaerobe forhold under den vertikale transport. De anvendte nedbrydningsrater for hhv. benzen og kulbrinter, >C₁₀-C₁₅, kan ses i FIGUR 11 og TABEL 7.

Der er udført beregninger for dæklagstykkelser på $Z_v = [2, 5, 8, 10]$ m. For benzen er der desuden beregnet for 1 m dæklagstykkelse.

Da risikoberegningen er rettet mod betydende grundvandsmagasiner, vil der langt de fleste steder være dæklag på mere end 5-10 m.

Horisontal transport

I den horisontale del af forureningstransporten er der i model 1 ikke medtaget nedbrydning (nedbrydningsrate = 0) for at kunne isolere effekten af nedbrydningen under den vertikale transport. Dermed er det alene fortynding, der påvirker koncentrationsniveauet i kontrolpunktet.

For at belyse betydningen af eventuel nedbrydning i magasinet er der desuden udført beregninger i model 5 både med og uden nedbrydning. Der er antaget anaerobe forhold, og de anvendte nedbrydningsrater fremgår af FIGUR 11 og TABEL 7.

TABEL 7. Anbefalede realistiske konservative nedbrydningsrater til brug i GrundRisk for mættede forhold for benzen og kulbrinter, >C₁₀-C₁₅ (Ottosen, et al. 2018).

Stof	Mættede (anaerobe) forhold Nedbrydningsrate [d ⁻¹]
Benzen	0,004
Kulbrinter, >C ₁₀ -C ₁₅	0,0008

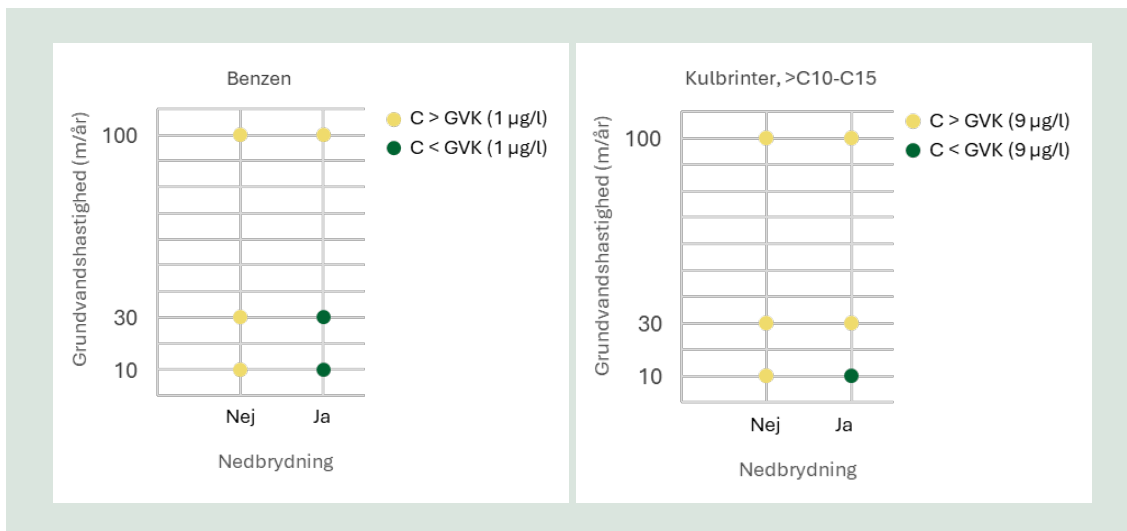
Grundvandshastighed

Der er beregnet risikoscenarier for grundvandshastigheder på $u = [10, 30, 100]$ m/år. Dette er valgt for at vise betydningen af varierende grundvandshastigheder på koncentrationen i kontrolpunktet for grundvandshastigheder, der er hhv. lave, typiske og høje for danske forhold.

5.3 Resultater af scenarieberegninger.

5.3.1 Beregningsmodel 5

Resultaterne fra scenarieberegningerne i model 5 er vist i FIGUR 12. Koncentrationen af hhv. benzen og kulbrinter, >C₁₀-C₁₅, er beregnet i kontrolpunktet 100 m nedstrøms kilden. Kombinationer af grundvandshastighed og nedbrydningsforhold, der resulterer i en koncentration over GVK i kontrolpunktet for hhv. benzen og totalkulbrinter er markeret med gul. Koncentrationer under GVK er markeret med grøn.



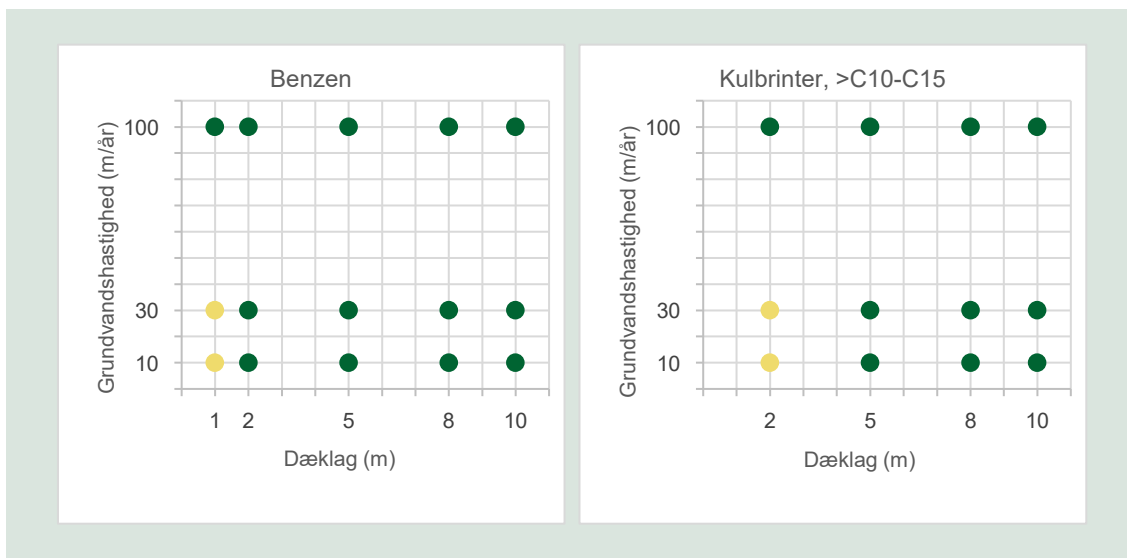
FIGUR 12. Resultat af scenarieberegninger i model 5 hhv. med og uden anaerob nedbrydning i det betydende grundvandsmagasin. Koncentrationer (C) over grundvandskvalitetskriteriet (GVK) for hhv. benzen og totalkulbrinter er markeret med gul. Koncentrationer under GVK er markeret med grøn.

Af FIGUR 12 ses, at for benzen vil de anaerobe forhold nedbryde forureningsstoffet tilstrækkeligt under den horisontale transport for grundvandshastigheder på 30 og 10 m/år. For kulbrinter, >C₁₀-C₁₅, nedbrydes forureningsstoffet tilstrækkeligt for en grundvandshastighed på 10 m/år.

Resultaterne viser, at opholdstiden i magasinet har betydning for reduktionen af koncentrationniveauet langs fanen, når anaerob nedbrydning i den horisontale transport indgår i beregningerne. Samtidig indikerer resultaterne, at en forureningskilde med kulbrintekoncentrationer svarende til 90 % fraktileerne for kildestyrkekonzentrationer i Region Sjællands database i de fleste tilfælde må forventes at udgøre en risiko, hvis der ikke findes et dæklag imellem forureningskilden og det betydende magasin. Betydningen af dæklagstykkelsen undersøges yderligere i det følgende.

5.3.2 Beregningsmodel 1

Koncentrationen af hhv. benzen og kulbrinter, >C₁₀-C₁₅, er beregnet i kontrolpunktet 100 m nedstrøms kilden i beregningsmodel 1. Koncentrationer over/under GVK for hhv. benzen og totalkulbrinter er vist i FIGUR 13 som et resultat af forskellige kombinationer af grundvandshastighed og dæklagstykkelse.



FIGUR 13. Resultater af GrundRisk-beregninger i model 1 (mættede, anaerobe forhold med nedbrydning i umættet zone, og uden nedbrydning i magasinet). Gule prikker angiver at koncentrationen i kontrolpunktet 100 m nedstrøms overskrider Grundvandskvalitetskriteriet (GVK) for hhv. benzen (1 µg/l) og totalkulbrinter (9 µg/l). Grønne prikker angiver at koncentrationen i kontrolpunktet 100 m nedstrøms er under GVK.

For benzen er det tilstrækkeligt med et dæklag på 2 m for at koncentrationen i kontrolpunktet er under GVK uanset grundvandshastighed, mens et dæklag på 1 m er tilstrækkeligt for grundvandshastigheder på 100 m/år.

For kulbrintefractionen >C₁₀-C₁₅ kræves der, ved grundvandshastigheder på 10 og 30 m/år, et dæklag på 5 m for at koncentrationen i kontrolpunktet er under GVK, mens et dæklag på blot 2 m er tilstrækkeligt for grundvandshastigheder på 100 m/år.

Resultaterne i beregningsmodel 1 viser at de højeste koncentrationer i kontrolpunktet ses ved lave grundvandshastigheder, da de lavere grundvandshastigheder giver mindre fortynding af den nedsivende forurening.

Forudsættes kildekonzentrationen af kulbrinter reduceret til 150 µg/l over hele kildens areal på 400 m² (fra 775 µg/l) vil et dæklag på 2 m være tilstrækkeligt til, at koncentrationen i kontrolpunktet bliver lavere end GVK uanset grundvandshastighed. Knap 60 % af alle lokaliteter i Region Sjællands database (uanset areal) har en højeste påvist koncentration på 150 µg/l eller derunder.

Forudsættes kildekonzentrationen af benzen øget til 775 µg/l (fra 470 µg/l) over hele kildens areal på 400 m², så kildekonzentrationen svarer til kildekonzentrationen af kulbrintefractionen, vil et dæklag på 2 m stadig være tilstrækkeligt til at reducere koncentrationen til under GVK i kontrolpunktet.

Det er vigtigt at være opmærksom på, at de faktiske forhold oftest vil være en kombination af de forhold, der indgår i de enkelte scenarieberegninger. Hvis der f.eks. forekommer et anaerobt magasin under et dæklag af moræneler, vil den mest realistiske beskrivelse af virkeligheden være en kombination af resultaterne fra beregningsmodel 1 og model 5.

Kombineres resultaterne for benzen i FIGUR 12 og FIGUR 13 (med anaerob nedbrydning) vil koncentrationen i kontrolpunktet være reduceret til under GVK for alle kombinationer af dæklagstykkelser og grundvandshastigheder.

For kulbrinter, vil en kombination af resultaterne i FIGUR 12 og FIGUR 13 med anaerob nedbrydning, både under den vertikale transport og i det betydende magasin medføre at koncentrationen af kulbrinter, er reduceret til under GVK i kontrolpunktet for alle kombinationer af dæklagstykkelser og grundvandshastigheder, undtagen for 2 m dæklagstykkelse og 30 m/år.

6. Opsummering af resultater fra delanalyser

Nedenfor opsummeres resultaterne fra de fire delelementer i projektet.

6.1 Resultater fra delanalyser

6.1.1 Dataudtræk fra Jupiter

Der er udtrukket forureningsdata fra Jupiterdatabasen, der indeholder analyseresultater for grundvandsprøver siden 1/1 2008 for kulbrintefraktioneringer i intervallet C₅–C₄₀ samt for benzen. For kulbrinter er der analyseresultater fra 1.063 borer, og for benzen er der analyseresultater fra 3.961 borer.

Der er konstateret enkelte indvindingsboringer med påvist indhold over detektionsgrænsen af både kulbrintefraktioneringer og benzen, men andelen af påvirkede borer er lav (se faktaboks).

Alle overskridelser af GVK for kulbrintefraktioneringerne i Jupiter-udtrækket er enkeltobservationer, både for de højeste påviste koncentrationer i perioden 2008-2025 samt for de seneste analyserede prøver fra hver boring.

Antal borer påvirket af kulbrinter i Jupiter (senest analyserede prøver)

0,8 % af borerne (8 borer) er påvirket med indhold af kulbrintefraktioneringer over GVK for totalkulbrinter (9 µg/l).

Alle overskridelser af GVK for kulbrintefraktioneringerne i perioden 2008-2025 Jupiterudtrækket er enkeltobservationer.

0,05 % af borerne (2 borer) er påvirket med indhold af benzen over GVK (1 µg/l).

I boringskontrollen for 2019-2023 (Thorling et al. 2024) blev der påvist indhold over detektionsgrænsen i vandforsyningsindtag for kulbrintefraktioneringerne C₆-C₃₅ (1,1 %), C₁₀-C₂₅ (2,4 %) samt benzen (1,0 %). Af disse tre stoffer/kulbrintefraktioneringer var der ingen fund af kulbrintefraktioneringerne over kravværdien og kun fund af benzen over kravværdien i tre indtag (0,1 %).

Til sammenligning blev der i samme periode fundet klorerede opløsningsmidler over detektionsgrænsen i ca. 10 % af de undersøgte vandforsyningsindtag, hvoraf 1,4 % havde overskridelser af kvalitetskravet. Det svarer til en fundandel, der er en faktor 10 højere end for kulbrinter og benzen.

Der er altså konstateret ganske få betydende fund af kulbrinter i vandforsyningerne.

6.1.2 Litteraturstudium

Litteraturgennemgangen viser, at grundvandsforureningsfaner fra de danske villaolietanke generelt har meget begrænset udbredelse. Faner med totalkulbrinter er kortere end 28 m for 90 % af fanerne, med en maksimal fanelængde på 48 m. For benzen gælder at alle faner er kortere end 20 m.

For kulbrintefaner fra spild fra danske villaolietanke var alle undersøgte faner inden for en periode på 2-3 år stabiliseret. Da regionernes indsats primært retter sig mod ældre forureninger, er det forventeligt, at kulbrinteforureningerne enten har stabile eller svindende faner.

Overfladevandsprojektet, delprojekt 2, rapporterer middelfanelængder og worst-case fanelængder fra olie- og benzinspild baseret på en spørgeskemaundersøgelse blandt erfarne rådgivere inden for jord- og grundvandsforurening. De rapporterede middelfanelængder var 30 m og 37 m for hhv. oliestoffer og benzen, mens de største fanelængder var 150 m og 250 m for hhv. oliestoffer og benzen. Disse fanelængder repræsenterer antageligt de større sager i branchen, da sager med højt vidensniveau og tilknyttede afværgeindsatser har indgået i referencen.

I internationale studier sammenfattes information om fanelængder primært fra benzinspild fra Underground Storage Tanks⁶. De fundne medianfanelængder for disse store spild er højst 55 m på tværs af alle studier, mens ca. 90 % af alle faner i de udenlandske studier er 130 m eller kortere.

Fanelængder påvirkes af spildets størrelse (produkt volumen/masse), højeste påviste koncentrationer (i vand) i kildeområdet samt tilstedeværelsen af fri fase, hvorimod hydrogeologiske forhold har begrænset indflydelse.

Fanelængder

90 % af foreningsfanerne i de udenlandske studier (benzinspild) er 130 m eller kortere.

Fanelængder påvirkes af spildets størrelse (produkt volumen/masse), højeste påviste koncentrationer (i vand) i kildeområdet samt tilstedeværelsen af fri fase.

Hydrogeologiske forhold har begrænset indflydelse på fanelængden.

Da alle undersøgte faner fra spild fra danske villaolietanke var stabiliseret inden for 2-3 år, kan vi forvente at kulbrintefanerne indenfor regionernes ansvarsområde er stabile eller svindende.

Desuden øger tilstedeværelsen af fri fase koncentrationerne i fanen, hvilket reducerer nedbrydningsraten i fanen.

Studier, der sammenligner fanelængder for diesel-/fyringsolie og benzen viser, at fanerne er af tilsvarende længde.

For størstedelen af de faner, hvor redox-forholdene undersøges indikerer niveauerne af elektronacceptorer og nedbrydningsprodukter hhv. i og opstrøms fanen, mikrobiel nedbrydning af oliestoffer i fanen. Elektronacceptorer er de stoffer (fx ilt, nitrat, jern(III) og sulfat), som mikroorganismer bruger til at omsætte kulbrinter under forskellige redox-forhold.

6.1.3 Udtræk fra Region Sjællands database

Region Sjællands database indeholder 802 V2-kortlagte lokaliteter, hvor der i 5.003 analyserede vandprøver er påvist indhold af kulbrinter.

⁶ Underground Storage Tanks (USTs) er begravede brændstoftanke på mindst 4.160 liter, der typisk har været anvendt til kommercielle formål.

Mediankoncentrationen for den aggregerede kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ i vandprøver, ligger på ca. 42 µg/l, og 90 % af prøverne indeholder koncentrationer under 775 µg/l. For benzen ligger mediankoncentrationen på 7,3 µg/l, for prøver med indhold over GVK, mens 90 % af prøverne, med indhold over GVK, indeholder koncentrationer af benzen under 470 µg/l.

Af de 802 lokaliteter har 48 % (n=218) en højeste påvist koncentration af kulbrintefraktionen C₁₀-C₄₀ på maksimalt 90 µg/l, mens godt 6 % (n=28) har koncentrationer, der overstiger 9.000 µg/l. For benzen har ca. 75 % af lokaliteterne (n=62) en højeste påvist koncentration på maksimalt 100 µg/l, mens 11 % (n=9) har koncentrationer, der overstiger 1.000 µg/l.

Beregningerne af koncentrationer i grundvandet som funktion af afstanden fra kildeområdet viser, at koncentrationsniveauet falder med afstanden til punktet med den højest påviste koncentration defineret som kildeområdet. Der er beregnet en "pseudo-fanelængde" for alle lokaliteter med et V2-kortlagt areal ≤ 2.500 m². For kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ er 90 % af fanerne ca. 100 m eller kortere og for benzen er 90 % ca. 50 m eller kortere, målt fra kildeområdet. Disse fanelængder er i samme størrelsesorden som de fanelængder, der rapporteres i litteraturen fra danske undersøgelser.

Region Sjællands sagskompleks

90 % af **vandprøverne** indeholder koncentrationer af kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ under 775 µg/l.

90 % af **vandprøverne** (med indhold over GVK) indeholder koncentrationer af benzen under 470 µg/l.

Ca. 82 % af **lokaliteterne** i sagskomplekser har en højeste påvist koncentration på maksimalt 900 µg/l af kulbrintefraktionen C₁₀-C₄₀.

Ca. 75 % af lokaliteterne har en højeste påvist koncentration på maksimalt 100 µg/l benzen mens 9 lokaliteter (11 %) har koncentrationer, der overstiger 1.000 µg/l.

Koncentrationer af kulbrinter og benzen i vandprøver falder med afstanden til kildeområdet. Den beregnede "pseudo-fanelængde" er for kulbrintefraktion ≤ 100 m for 90 % af lokaliteterne og for benzen ≤ 50 m.

583 af lokaliteterne i datasættet har tilgængelig information om arealets størrelse. Heraf er 440 lokaliteter (75 %) mindre end ca. 2.500 m², og 306 (ca. 53 %) mindre end 400 m².

Der er desuden identificeret 6 atypiske lokaliteter, hvor koncentrationerne i vandprøver af kulbrintefraktion C₁₀-C₄₀ overskrider 10 gange GVK i prøver taget mere end 100 m fra kildeområdet. Af disse 6 lokaliteter har 5 et kortlagt areal på mere end 2.500 m². Disse 6 sager med koncentrationer over 10 gange GVK er registreret som hhv. gasværk, sukkerfabrik, losseplads, affaldsdepot, kemisk fabrik og et militært operationsområde. De høje koncentrationer indikerer, at visse typer af lokaliteter kræver ekstra opmærksomhed i forbindelse med risikovurdering over for grundvand. Der er ikke fundet lokaliteter, hvor der er påvist benzen-koncentrationer over 10 gange GVK mere end 100 m nedstrøms kildeområdet.

6.1.4 GrundRisk scenarieberegninger

GrundRisk-beregningerne modellerer koncentrationen langs fanen og i det administrative kontrolpunkt 100 m fra den nedstrøms kant af kildeområdet. Kildekoncentrationerne i GrundRisk svarer til 90%-fraktilkoncentrationerne for C₁₀-C₄₀ kulbrintefraktion (775 µg/l) og benzen (470

µg/l) i datasættet fra Region Sjælland. Disse høje koncentrationer anvendes over hele kildeområdet på 400 m².

Der er udført beregninger i beregningsmodel 1, der inkluderer nedbrydning, og derfor er vurderet som den mest repræsentative. Nedbrydning er udelukkende inkluderet i den vertikale transport og ikke i magasinet. GrundRisk-beregningerne anvender de anbefalede, konservative nedbrydningsrater indsamlet af Miljøstyrelsen (Ottosen, et al. 2018).

Kulbrinter

Resultaterne viser, at der for kulbrinter, >C₁₀-C₁₅, kræves et dæklag på 5 m til det betydende magasin for at reducere kildekonzentrationen (775 µg/l) til under GVK uanset grundvandshastighed.

Hvis kildekonzentrationen for kulbrinter reduceres til 150 µg/l over hele kildearealet (400 m²), er et dæklag på 2 m tilstrækkeligt til, at koncentrationen i kontrolpunktet ligger under GVK for alle grundvandshastigheder, også ved 10 m/år (mindst fortynding), selv uden nedbrydning i den horisontale transport. Knap 60 % af lokaliteterne i Region Sjællands datasæt har højeste påviste koncentrationer af totalkulbrinter (C₁₀-C₄₀) på maksimalt 150 µg/l.

Benzen

For benzen kræves et mættet, anaerobt dæklag på 2 m over det betydende magasin for at reducere kildekonzentrationen på 470 µg/l til under GVK i kontrolpunktet 100 m nedstrøms, uanset grundvandshastighed og uden nedbrydning i den horisontale transport. For en øget kildekonzentration på 775 µg/l er et dæklag på 2 m over det betydende magasin ligeledes tilstrækkeligt.

Når anaerob nedbrydning af benzen i den horisontale transport inkluderes, er et dæklag på 1,0 m tilstrækkeligt for alle undersøgte grundvandshastigheder til at reducere en kildekonzentration på 470 µg/l til under GVK i kontrolpunktet.

Resultater GrundRisk

Inputparametrene i GrundRisk-modellen er valgt med henblik på at simulere et konservativt worst-case scenarie for en kulbrinteforurening:

Kildens areal er sat til 20 x 20 kvm. Mere end halvdelen af de V2-kortlagte arealer i Region Sjællands datasæt er 400 m² eller mindre (70 % af de mindre lokaliteter under 2.500 m² er 400 m² eller mindre).

Kildekoncentration er sat til 90 % fraktilkoncentrationen for Region Sjællands datasæt: 775 µg/l for C₁₀-C₄₀ kulbrintefraktion (modelstof: Kulbrinter, >C₁₀-C₁₅) og 470 µg/l (samt 775 µg/l) for benzen. Disse høje koncentrationer anvendes over hele kildearealet på 20 x 20 m (400 m²).

Nedbrydning er inkluderet som nedbrydning under anaerobe forhold i den vertikale transport og ingen nedbrydning i magasinet.

Tilstrækkelig dæklagstykkelse over det betydende magasin for at reducere en kildekonzentration på 775 µg/l kulbrinter eller benzen til under GVK (hvv. 9 µg/l og 1 µg/l) i kontrolpunktet 100 m nedstrøms:

Kulbrinter: 5 m

Benzen: 2 m

7. Anbefalinger til håndtering af kulbrintesager

Den samlede anbefaling for revurdering af grundvandsrisikoen for mellemstore og små kulbrinteureninger, der afventer regionernes indsats, er udarbejdet på baggrund af konklusionerne fra de enkelte delanalyser (se afsnit 6).

Det er kun ganske i få og enkeltstående tilfælde, at der er påvist kulbrinteindhold eller benzen over kravværdien i vandforsyninger.

Både litteraturstudiet, analysen af data fra Region Sjælland og GrundRisk-beregningerne underbygger, at kulbrintefaner generelt er korte.

Disse resultater understøtter, at risikoen over for grundvandsressourcen fra kulbrinteureninger må anses for at være meget begrænset, og at der er grundlag for at revurdere den offentlige indsats.

På baggrund af især konklusionerne fra delanalyserne af Region Sjællands data (afsnit 4) og efterfølgende scenarieberegninger i GrundRisk (afsnit 5) anbefales det, at den offentlige indsats over for grundvand på lokaliteter kan afsluttes, hvis følgende kriterier (faktaboks) er opfyldt.

Anbefalede kriterier for at afslutte den offentlige indsats over for grundvand på V2-kortlagte lokaliteter med kulbrinteurening

Koncentrationsniveau: Den højeste målte kulbrintekonzentration på lokaliteten skal være under 775 µg/l for både benzen og sum af kulbrintefraktioner.

Areal: Det V2-kortlagte areal for lokaliteten skal være mindre end 400 m².

Dækklag: Dækklaget mellem kilden og det betydende magasin skal være mindst 5 m.

Kriterierne er udarbejdet med henblik på at sikre, at kulbrinteureninger fra lokaliteter, der opfylder dem, ikke forventes at give anledning til lange ureningsfaner. Det er vigtigt at understrege, at det udelukkende er den offentlige indsats over for grundvand kan afsluttes, og at V2-kortlægningen af arealerne bibeholdes.

Hvis **ikke** lokaliteten opfylder ovenstående kriterier, bør der foretages en risikovurdering baseret på eksisterende data. Her anbefales det at anvende GrundRisk-beregninger under konservative antagelser, hvor nedbrydning under den vertikale stoftransport under anaerobe forhold inkluderes. Desuden bør risikovurderingen tage udgangspunkt i en konceptuel forståelse af ureningen på lokaliteten, hvor viden om stoffernes fysisk-kemiske egenskaber, hydrogeologiske forhold og andre lokalitetsspecifikke forhold indgår.

Der bør desuden udvises særlig opmærksomhed, hvis følgende forhold gør sig gældende:

- Fri fase er påvist på lokaliteten.
- Indvindingsboringer er placeret mindre end 150 m fra lokaliteten.

Der bør også udvises særlig opmærksomhed ved revurdering af grundvandsrisiko fra kulbrinteureninger på lokalitetstyper, der erfaringsmæssigt har givet anledning til længere forureningsfaner herunder: lokaliteter med V2-kortlagte arealer større end 2.500 m², tankstationer, gasværker, sukkerfabrikker, kemiske fabrikker, lossepladser/deponier, militære operationsområder og andre lokaliteter, hvor aktiviteterne har omfattet håndtering af store mængder olie og/eller benzin. I disse sager kan en offentlig indsats fortsat være nødvendig.

Potentiale for reduktion af den offentlige indsats i relation til grundvandsrisiko i Region Sjælland

For at illustrere potentialets størrelsesorden er der gennemført en indledende opgørelse af de V2-kortlagte lokaliteter i Region Sjællands database (se afsnit 4), som umiddelbart kan forventes at opfylde de anbefalede kriterier. Blandt de 453 V2-kortlagte lokaliteter med konstaterede kulbrinteindhold over Miljøstyrelsens grundvandskvalitetskriterium i grundvandsprøver opfylder 261 lokaliteter alle tre kriterier for koncentrationsniveau, arealstørrelse og dæklagstykkelse. Det svarer til mere end halvdelen af de afventende sager i Region Sjælland.

Potentialet for at reducere den offentlige indsats vurderes derfor som betydeligt. På baggrund af nærværende projekts konklusioner kan Region Sjælland med fordel igangsætte en systematisk gennemgang af et større antal kulbrintesager med udgangspunkt i de anbefalede kriterier.

8. Referencer

- Bedient, P. B., H. S. Rifai, og C. J. Newell. *Ground water contamination: transport and remediation*. USA, Englewood Cliffs: Prentice-Hall International, 1994.
- CA gov. *California Retail Fuel Outlet Annual Reporting (CEC-A15) Results*. 2025. <https://www.energy.ca.gov/data-reports/energy-almanac/transportation-energy/california-retail-fuel-outlet-annual-reporting>.
- CL:AIRE. *Guidance on Natural Source Zone Depletion*. Reading: CL:AIRE, 2024. ISBN 978-1-905046-44-7. Download: <https://www.claire.co.uk/nszd>
- Connor, John A., Roopa Kamath, Kenneth L. Walker, og Thomas E. Mchugh. »Review of Quantitative Surveys of the Length and Stability of MTBE, TBA, and Benzene Plumes in Groundwater at UST Sites.« 3 2015: 195-206.
- EPA. *Code of Federal Regulations, 40 CFR 280.12*. u.d. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-280/subpart-A/section-280.12> (senest hentet eller vist den 03. 11 2025).
- Garg, Sanjay, Charles J. Newell, Poonam R. Kulkarni, David C. King, David T. Adamson, Maria Irianni Renno, og Tom Sale, »Overview of Natural Source Zone Depletion: Processes, Controlling Factors, and Composition Change.« 9 2017: 62-81.
- Happel, Anne M, Edwin H. Beckenbach, og Rolf U. Halden. *An Evaluation of MTBE Impacts to California Groundwater Resources*. Environmental Protection Department, 1998.
- Kulkarni, P, D King, K Moran, og T Mchugh. »Survey of natural attenuation of petroleum hydrocarbon plumes in groundwater in Europe.« 2018.
- Kulkarni, Poonam R., Thomas E. McHugh, Charles J. Newell, og Sanjay Garg. »Evaluation of Source-Zone Attenuation at LUFT Sites with Mobile LNAPL.« 11 2015: 917-929.
- Larsen, Poul, Per Loll, Claus Larsen, Maria Grøn, Jesper B Nielsen, Laura Heron, Katrine Moes, Anders G. Christensen.. *Erfaringsopsamling på udbredelsen af forureningsfaner i grundvand på villatanksager*. Miljøprojekt Nr. 1309, Miljøstyrelsen, 2009.
- McHugh, Thomas E., Lila M. Beckley, George E. DeVaul, og Matthew A. Lahvis. »Long-Term Assessment of Petroleum Hydrocarbon Attenuation at Petroleum Release Sites in California.« *Groundwater Monitoring and Remediation* 6 2022: 75-85.
- Miljøstyrelsen. *FAQ - Miljøfarlige forurenende stoffer*. April 2025, <https://mst.dk/erhverv/rent-miljoe-og-sikker-forsyning/spildevand/miljoefarlige-forurenende-stoffer-faq>.
- Miljøstyrelsen. *Jordforureningers påvirkning af overfladevand, delprojekt 2*. Miljøprojekt nr. 1565, Miljøstyrelsen, 2014.
- Newell, C.J., og J.A. Connor. »Characteristics of Dissolved Petroleum Hydrocarbon Plumes, Results from Four Studies.« *API Soil and Groundwater Bulletin* 8, 1998.

- O'Reilly, Kirk, Matthew A. Lahvis, George E. DeVaul, og Andrew M. Deines. »A Comparative Plume Study of DRO, GRO, Benzene, and MTBE: Implications for Risk Management.« *Groundwater Monitoring and Remediation* 6 2021: 58-64.
- Ottosen, Cecilie B., Poul L. Bjerg, Mette M. Broholm, og Gitte L. Søndegaard. *Nedbrydningsrater til brug i GrundRisk Riskovurdering. Litteraturstudie.* Miljøstyrelsen, 2018.
- Region Sjælland. *Guide til inputparametre i GrundRisk.* Region Sjælland, 2025.
- Rosenberg, Louise, Gitte Søndegaard Lemming, Philip J Binning, Jens Aabling, og Poul L. Bjerg. *GrundRisk. Beregningsmodel til risikovurdering af grundvandstruende forureninger.* Miljøstyrelsen, 2016.
- Stisen, S., M. Ondracek, L. Troldborg, R. J. M. Schneider, og M. J. van Til. *National Vandressource Model. Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019.* GEUS undersøgelse rapport 2019/31., Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet., 2019.
- Suthersan, Suthan, Brad Koons, og Matthew Schnobrich. »Contemporary management of sites with petroleum LNAPL presence.« *Groundwater Monitoring and Remediation*, 2015: 23-29.
- Thorling, L. (Ed.), Albers, C. N., Hansen, B., Kidmose, J., Johnsen, A. R., Kazmierczak, J., Mortensen, M. H., Troldborg, L., *Grundvand. Status og udvikling 1989-2023.* Teknisk rapport. GEUS, 2024. <https://doi.org/10.22008/gpub/38928>

Bilag 1. Stancode-liste Jupiterudtræk

TABEL 8. Stancode for forureningskomponenter i Jupiterudtræk.

StanCode	Stof
215	Benzen
1123	C5-C10 kulbrintefraktion
1124	C10-C25 kulbrintefraktion
1125	C25-C35 kulbrintefraktion
1134	C16-C35 kulbrintefraktion
1135	C6-C10 kulbrintefraktion
1136	C6-C35 kulbrintefraktion
1311	C25-C40 kulbrintefraktion
1312	C5-C40 kulbrintefraktion
1342	C10-C20 kulbrintefraktion
1343	C20-C35 kulbrintefraktion
1592	C10-C35 kulbrintefraktion
1593	C5-C35 kulbrintefraktion

Resume

Projektets formål er at udvikle et fagligt velfunderet og praktisk anvendeligt beslutningsgrundlag for en revurdering, der gør det muligt at afgøre, hvilke kulbrinteureninger, der fortsat kræver en offentlig indsats i forhold til grundvand, og hvilke der ikke længere gør.



Miljøstyrelsen
Lerchesgade 35
5000 Odense C

www.mst.dk