

Bestemmelse af forureningsflux af PFAS i grundvandet i opsprækket kalk ved anvendelse af forskellige modeller herunder geostatistisk model

Helene Draborg, NIRAS



Projektgruppe :



Jannick Kolbjørn Jensen
Lotte Kjær Nielsen
Nina Tuxen
Arne Rokkjær
Niels Døssing Overheu



BEREDSKABSSTYRELSEN HOVEDSTADEN
Martin Kobbro Madsen



Søren Dyreborg (PL)
Freja Rebecca Johansen
Helene Draborg
Anton Bøllingtoft
Anders G. Christensen
+ mange andre 😊

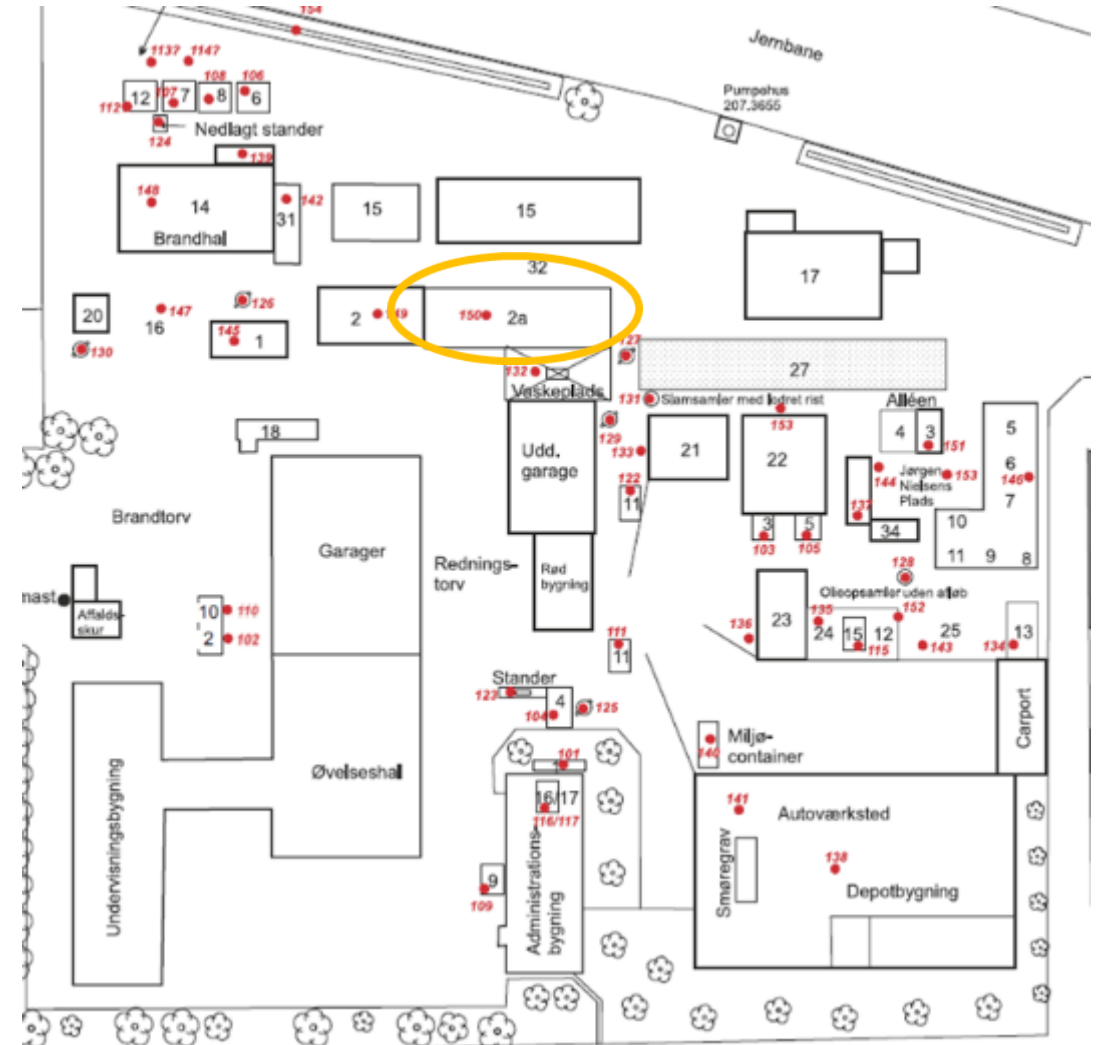


Dagsorden

- Kort introduktion til lokaliteten
- Formål
- Fire metoder til bestemmelse af den horisontale forureningsflux
- Opsummering

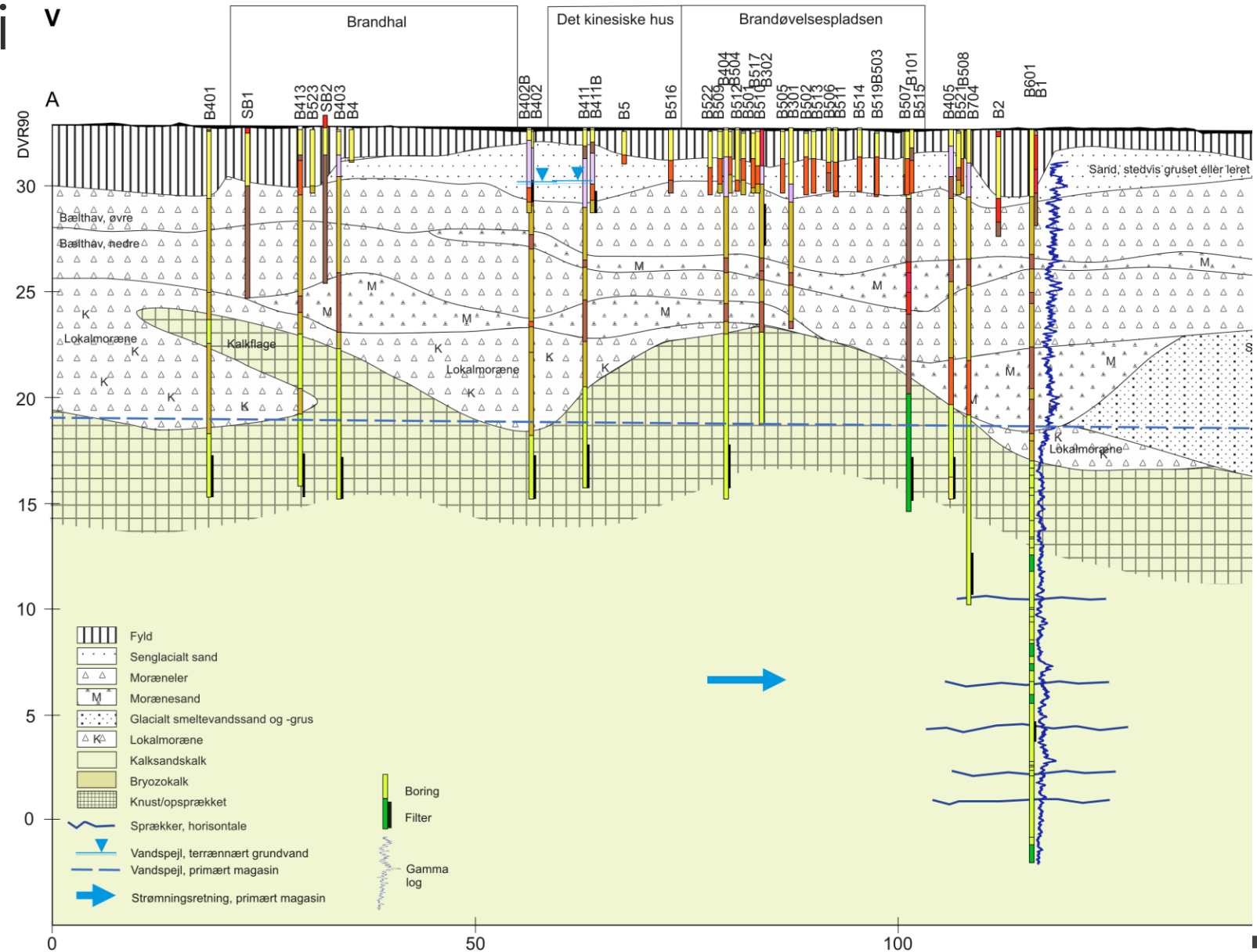
Introduktion til lokaliteten

- Ejendommen har siden 1969 været anvendt til forskellige brand- og redningsøvelser, og er stadig i aktiv drift
- I 2013 kom den første indikation på PFAS
- "Hovedkildeområdet er brandøvelsespladsen"
- I 2023 overtog Region Hovedstaden ansvaret for undersøgelserne
- Risiko objekt
 - OSD og indvindingsopland til flere vandværker



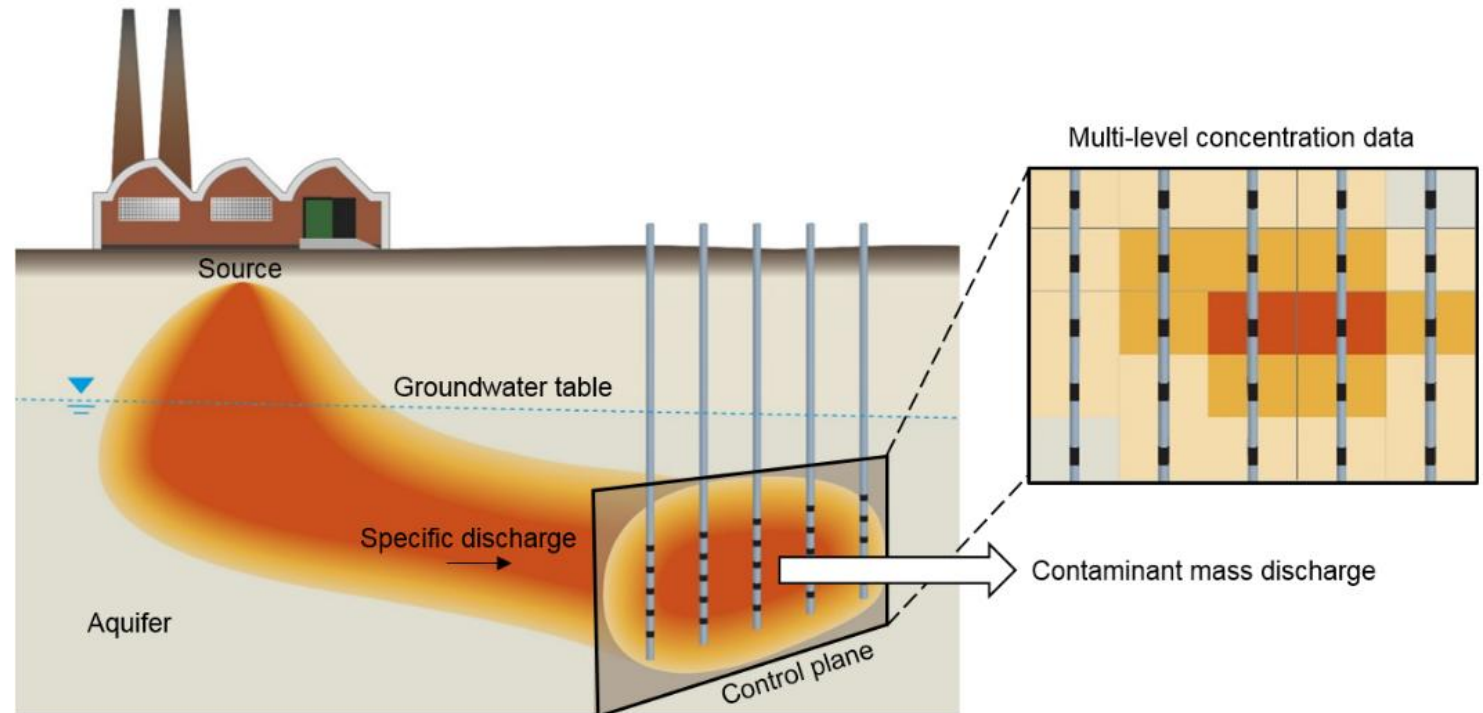
Geologi og hydrogeologi v

- Fyld 2-3 m
- Vekslede lag af sand, moræneler, morænesand
- Herefter nedknust kalk (3-5 m) og fast kalk med sprækker
- Terrænnært grundvand (ca. 3-4 m u.t.)
- Primært grundvand (ca. 14-15 m u.t.)
- Fokus på den nedknuste kalk



Formål

Estimere den horisontale forureningsflux med PFAS i det primære grundvandsmagasin direkte nedstrøms for brandøvelsespladsen



Rønde, V. K. (2019). *Risk assessment of chlorinated ethene plumes impacting streams: contaminant mass discharge, field methods and attenuation*. PhD thesis. Technical University of Denmark.

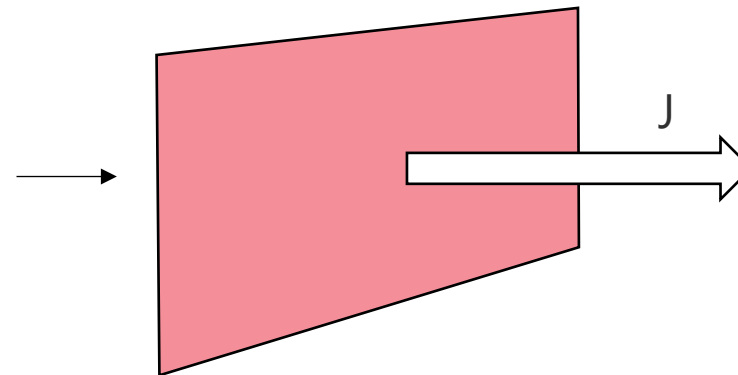
Metode 1

Homogent permeabel jordlag med antagelse af konstant areal, hydraulisk ledningsevne og gradient samt koncentration

Model:

Den horisontale flux i et homogent permeabel jordlag kan bestemmes af:

$$J = A * i * Kh * Cw$$



Parametre og resultat:

Jordlag	Areal (m ²)	I (-)	Kh (m/s)	Koncentration (ng/l)		Flux (mg/år)	
				Sum af 4 PFAS	Sum af 22 PFAS	Sum af 4 PFAS	Sum af 22 PFAS
Nedknust kalk (15,5-20,5 m)	250	0,3 ‰	7,3*10 ⁻⁴	48	3.300	83	5.698

Tværsnit af hele fanen (50 m)

Gennemsnit

Gennemsnit fra to borer nedstrøms hovedkilden

Metode 2

Sprækketransport i nedknust kalk med konstant sprækketykkelse, grundvandshastighed og koncentrationer

Model:

Ved stoftransport i sprækker i fx kalk, kan den horisontale flux estimeres af :

$$J = b * d * n * t * v * Cw$$

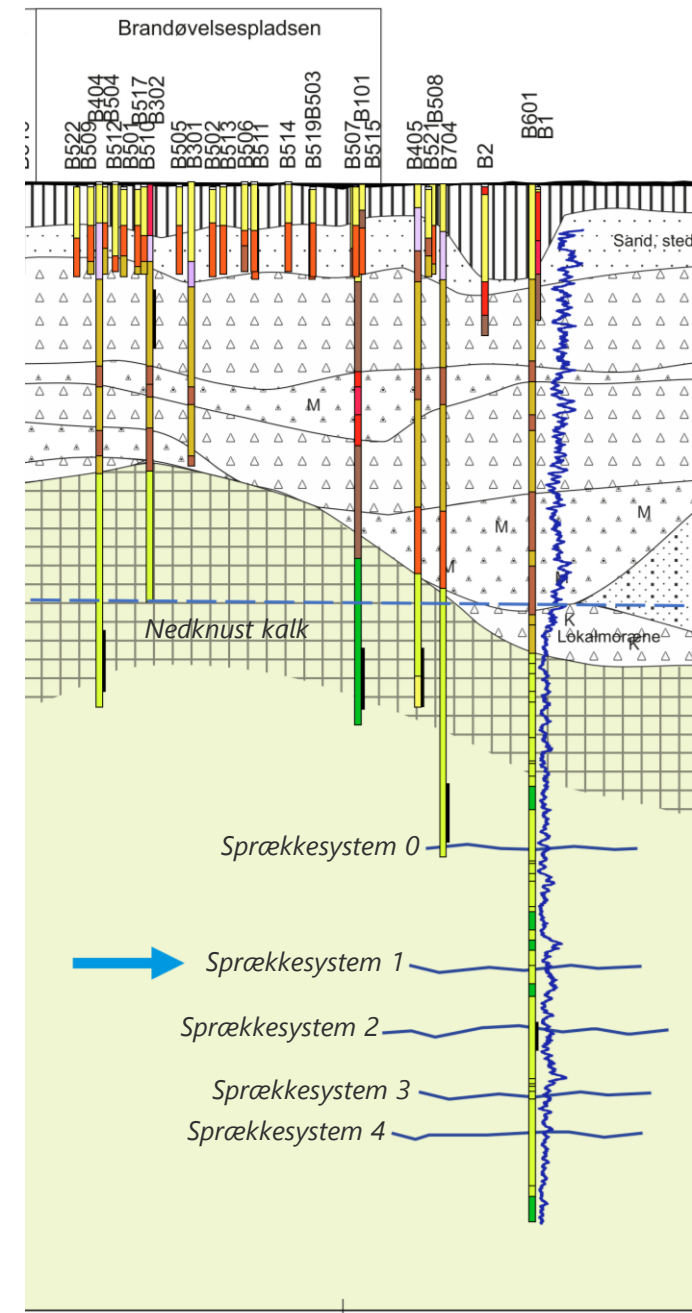
Dybde, hvor forureningen strømmer

Tværsnit af hele fanen (50 m)

Antal sprækker pr. m

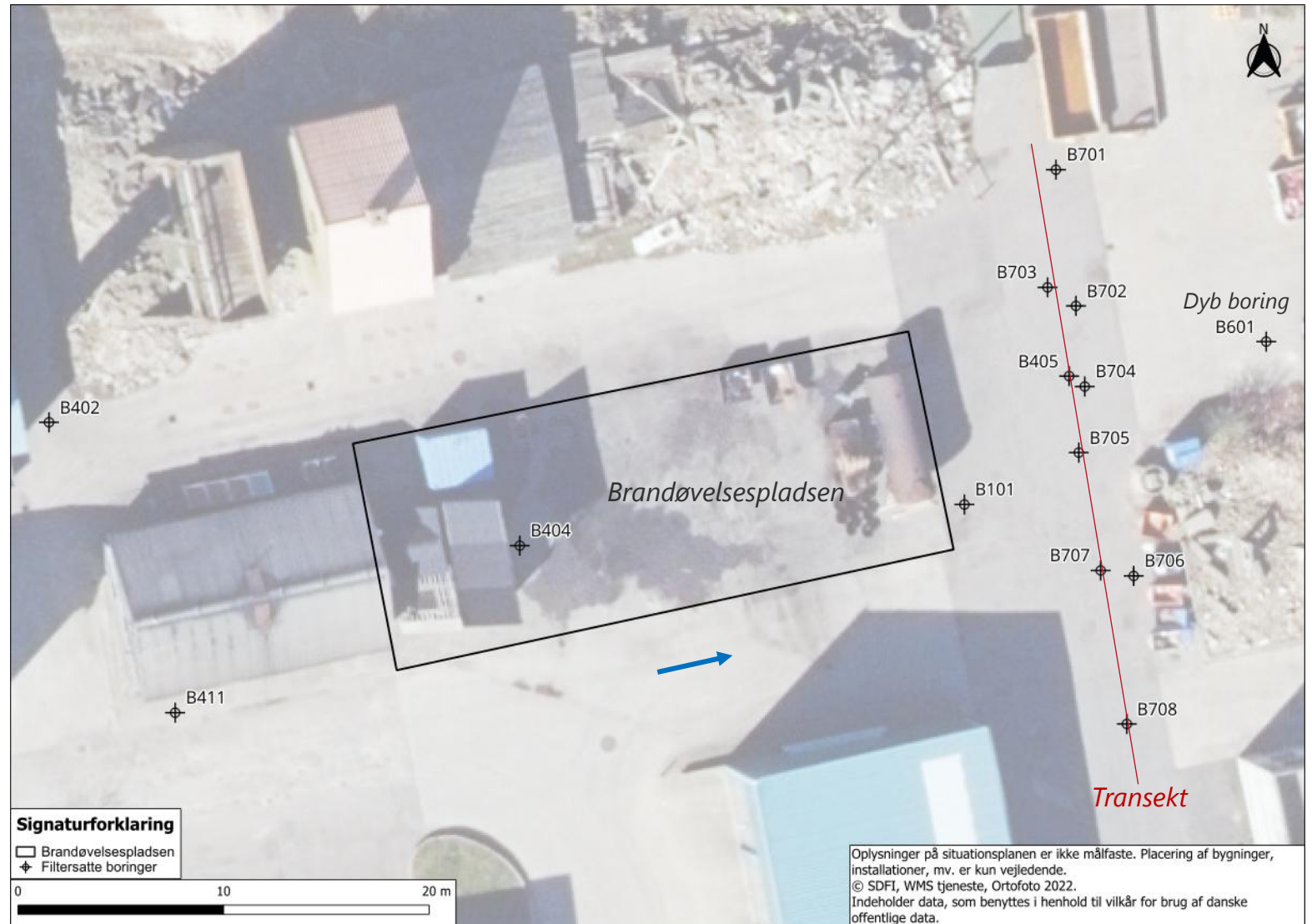
Parametre og resultat:

Sprækkesystem	Tykkelse af sprække (mm)	Grundvands-hastighed (m³/dag)	Koncentration (ng/l)		Flux (mg/år)	
			Sum af 4 PFAS	Sum af 22 PFAS	Sum af 4 PFAS	Sum af 22 PFAS
Nedknust kalk (15,5-20,5 m)	5	2,5	48	3.300	11	753

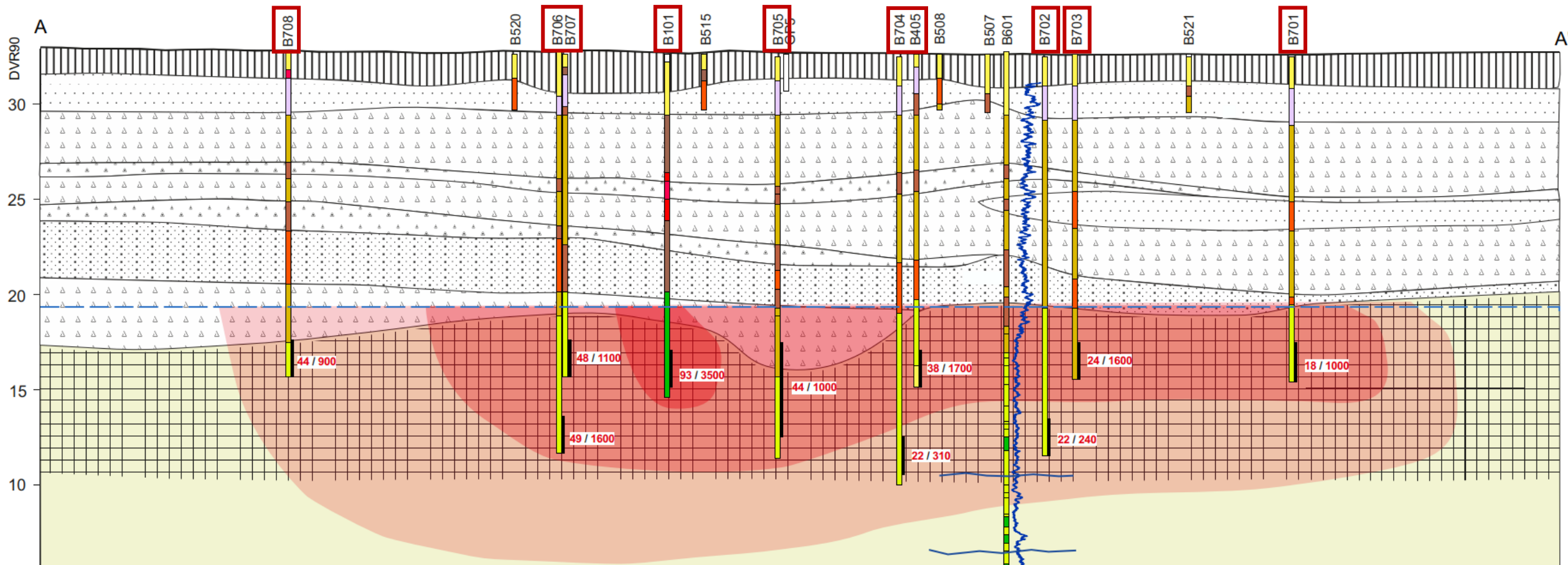


Etablering af fluxtransekt – Efterår 2024

- Bestående af 10 boringer filtersat i den nedknuste kalk
- Prøvetagning af boringerne
- Slugtest i 10 boringer



Etablering af fluxtransekt – Efterår 2024



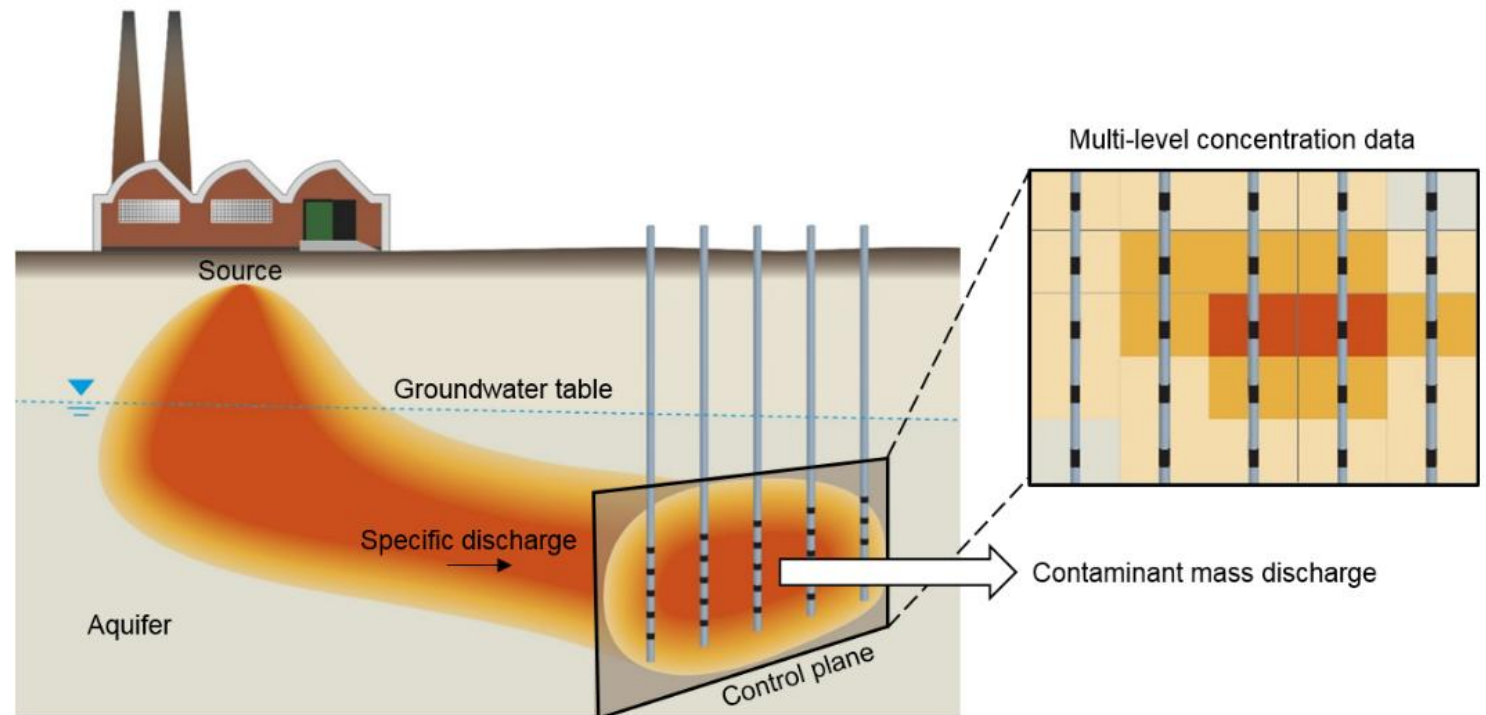
Metode 3

Etablering af fluxtransekt og anvendelsen af fluxtransekt metoden

Model:

Den horisontale flux i et homogent permeabel jordlag i et fluxtransekt kan bestemmes af:

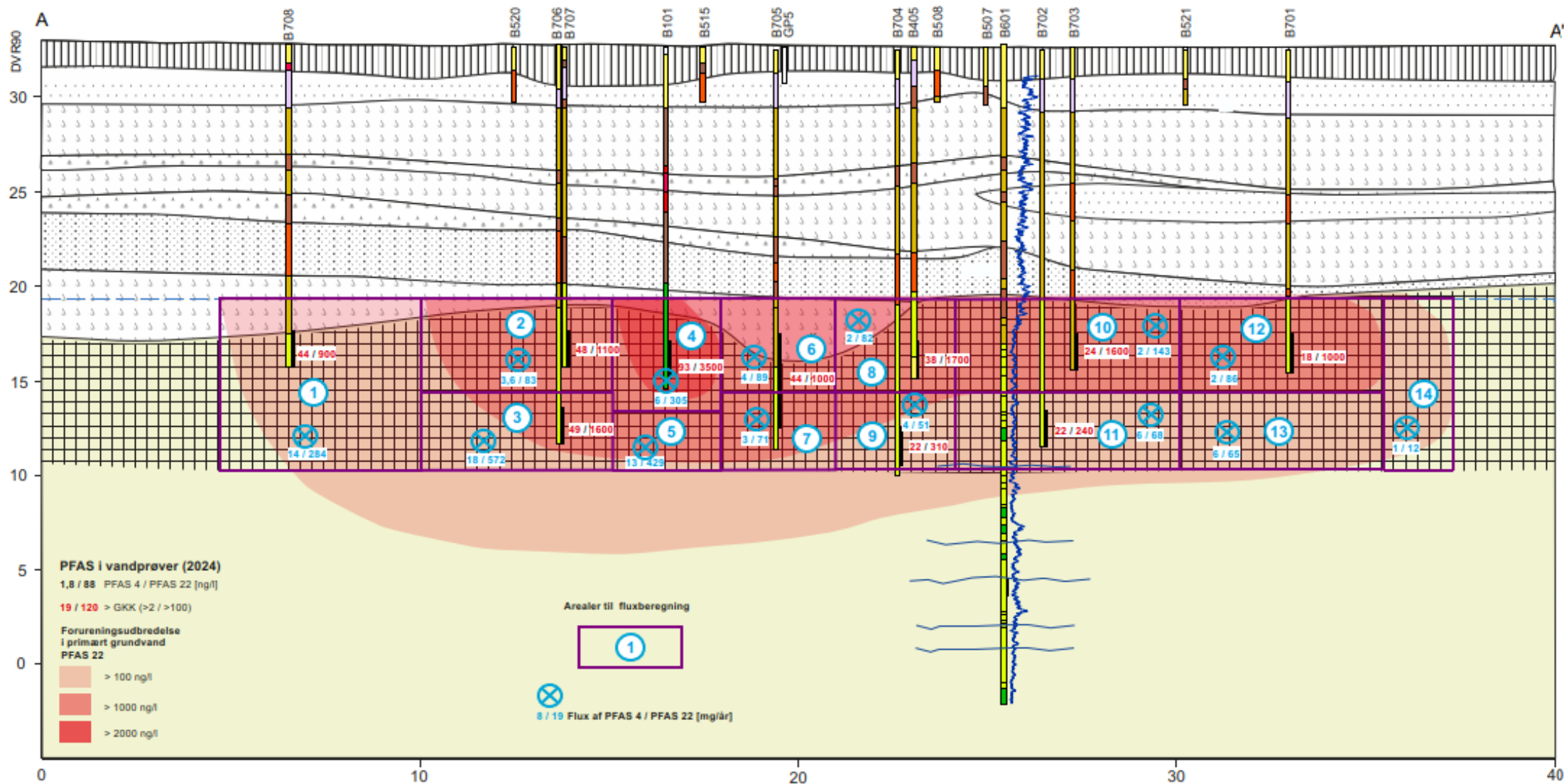
$$J = \sum_{k=1}^n A_k * i_k * K_k * Cw_k$$



Rønde, V. K. (2019). *Risk assessment of chlorinated ethene plumes impacting streams: contaminant mass discharge, field methods and attenuation*. PhD thesis. Technical University of Denmark.

Metode 3

Etablering af fluxtransekt og anvendelsen af fluxtransekt metoden



Metode 3

Etablering af fluxtransekt og anvendelsen af fluxtransekt metoden

Parametre og resultat:

Celle	Areal (m ²)	I (‰)	Anvendt boring til: slugtest / koncentration	Kh (m/s)	Koncentration (ng/l)		Flux (mg/år)	
					Sum af 4 PFAS	Sum af 22 PFAS	Sum af 4 PFAS	Sum af 22 PFAS
1	50	0,3	B708 / B708	6,7*10 ⁻⁴	44	900	14	284
2	23	0,3	B707 / B707	3,5*10 ⁻⁴	48	1.100	4	83
3	18	0,3	B706 / B706	2,4*10 ⁻³	49	1.600	20	643
4	24	0,3	B707 / B101	3,5*10 ⁻⁴	93	3.500	7	281
5	12	0,3	B706 / B706	2,4*10 ⁻³	49	1.600	13	429
6	15	0,3	B705 / B705	6,3*10 ⁻⁴	44	1.000	4	89
7	12	0,3	B705 / B705	6,3*10 ⁻⁴	44	1.000	3	71
8	15	0,3	B405 / B405	3,4*10 ⁻⁴	38	1.700	2	82
9	12	0,3	B704 / B704	1,4*10 ⁻³	22	310	4	51
10	28	0,3	(B701+B405) / B703	3,4*10 ⁻⁴	24	1.600	2	143
11	22	0,3	B702 / B702	1,3*10 ⁻³	22	240	6	68
12	27	0,3	B701 / B701	3,4*10 ⁻⁴	18	1.000	2	86
13	22	0,3	B702 / B702	1,3*10 ⁻³	22	240	6	65
14	16	0,3	B701 / B702	3,4*10 ⁻⁴	22	240	1	12
Totalt	294						87	2.387

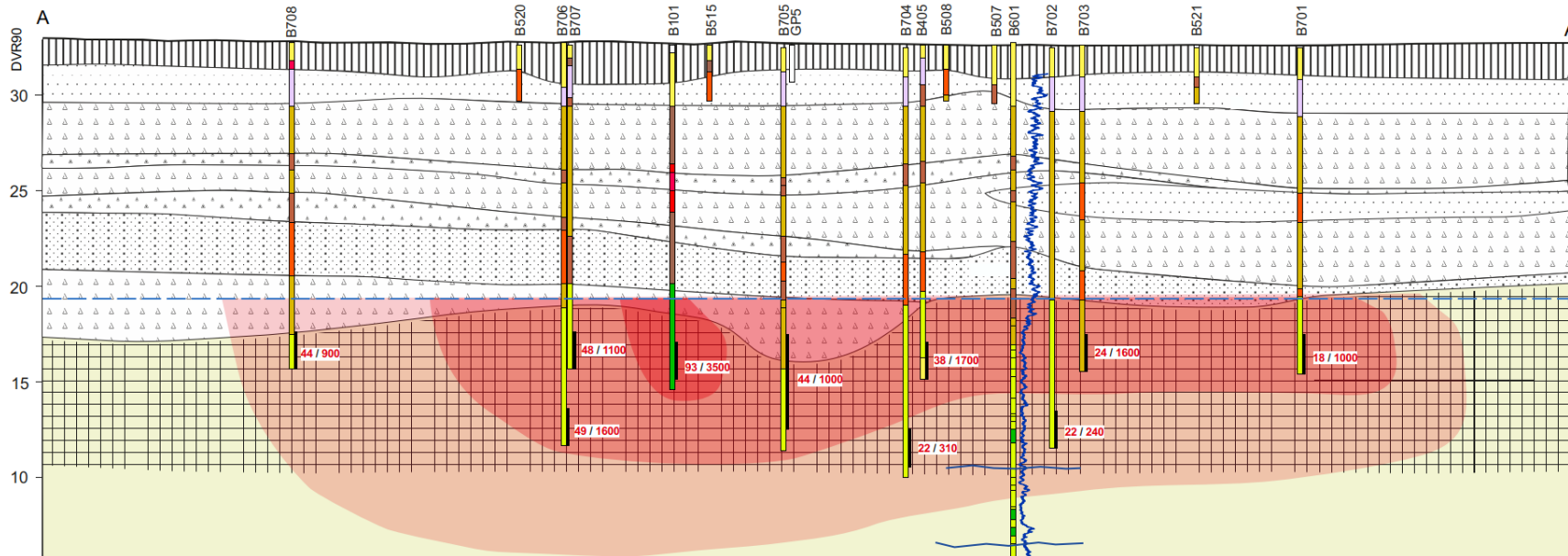
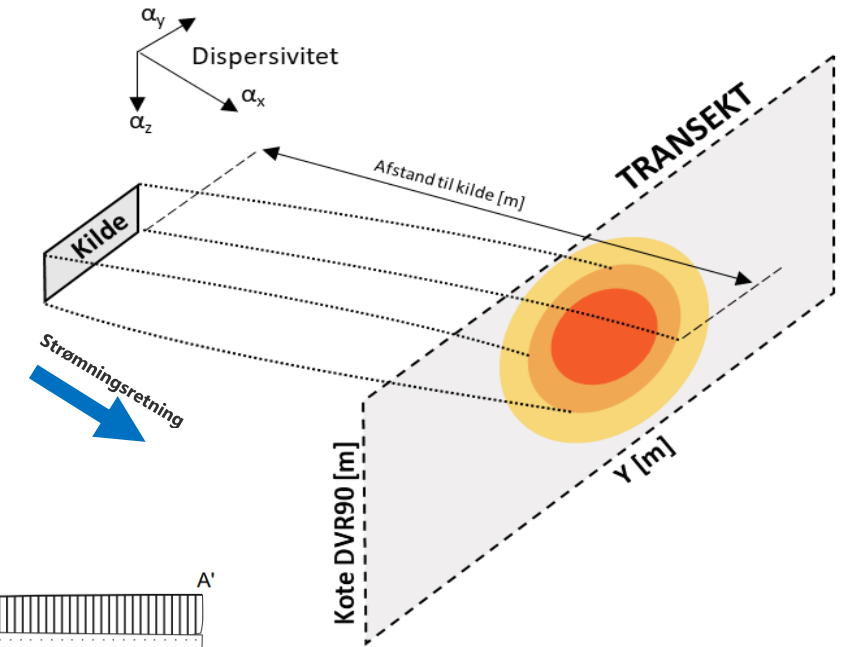
Metode 4

Anvendelse af geostatistisk model på fluxtransekt

Model:

Udvidet og modificeret version af geostatistisk model beskrevet i Bøllingtoft A., 2025*

Håndtering af den rumlige variation i både hydraulisk konduktivitet og koncentration.

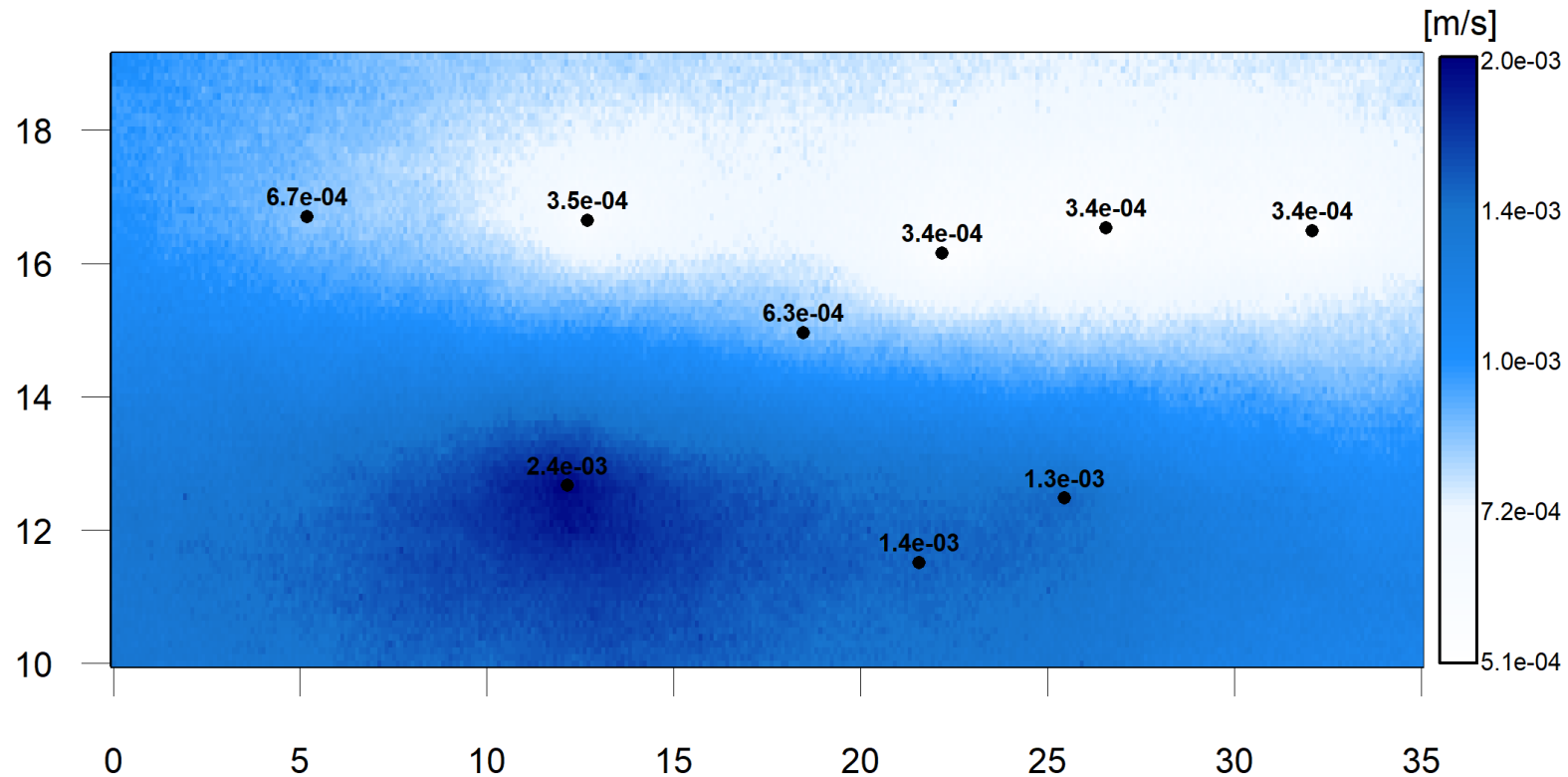


*som er offentligt tilgængeligt via DTU's Modelværktøjer (<https://www.sara.env.dtu.dk>).

Metode 4

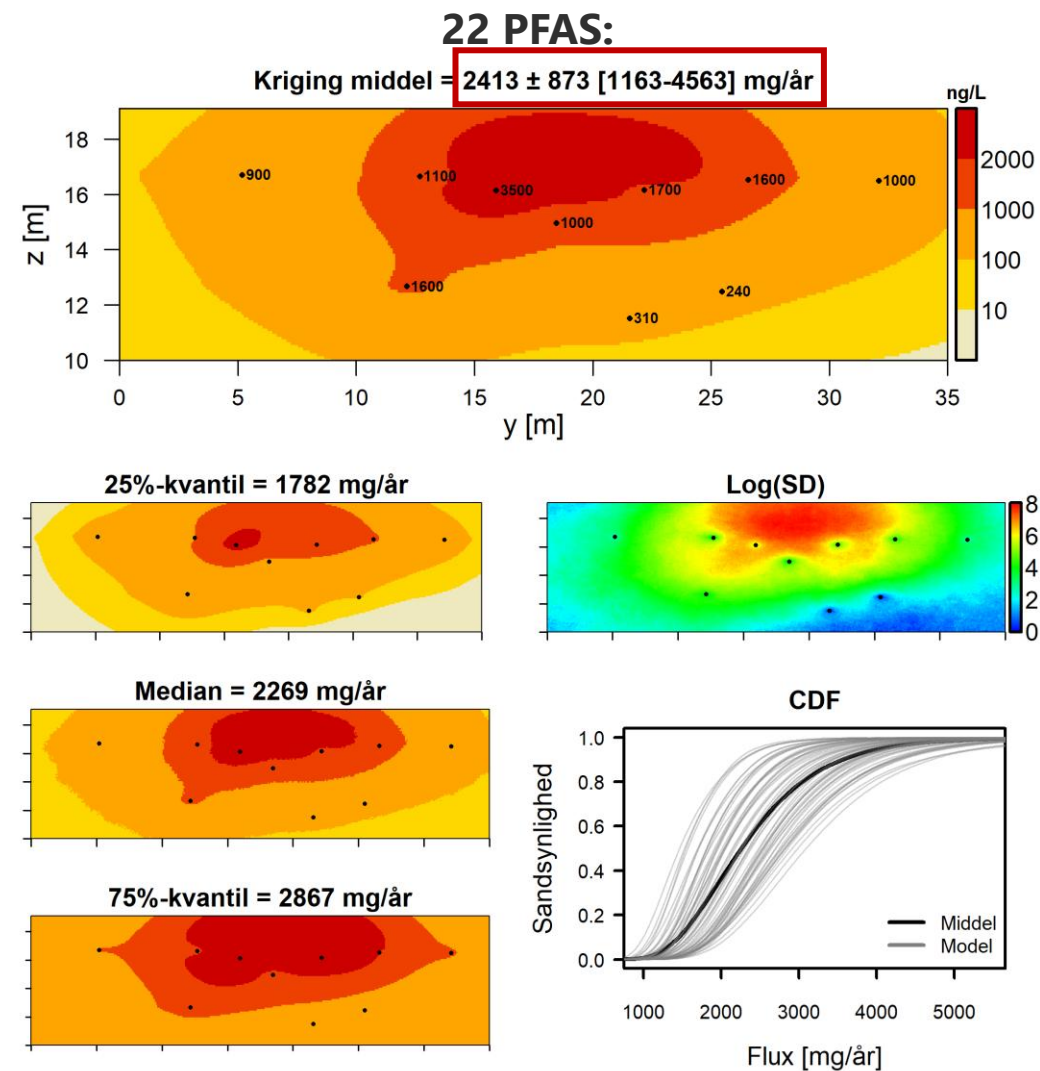
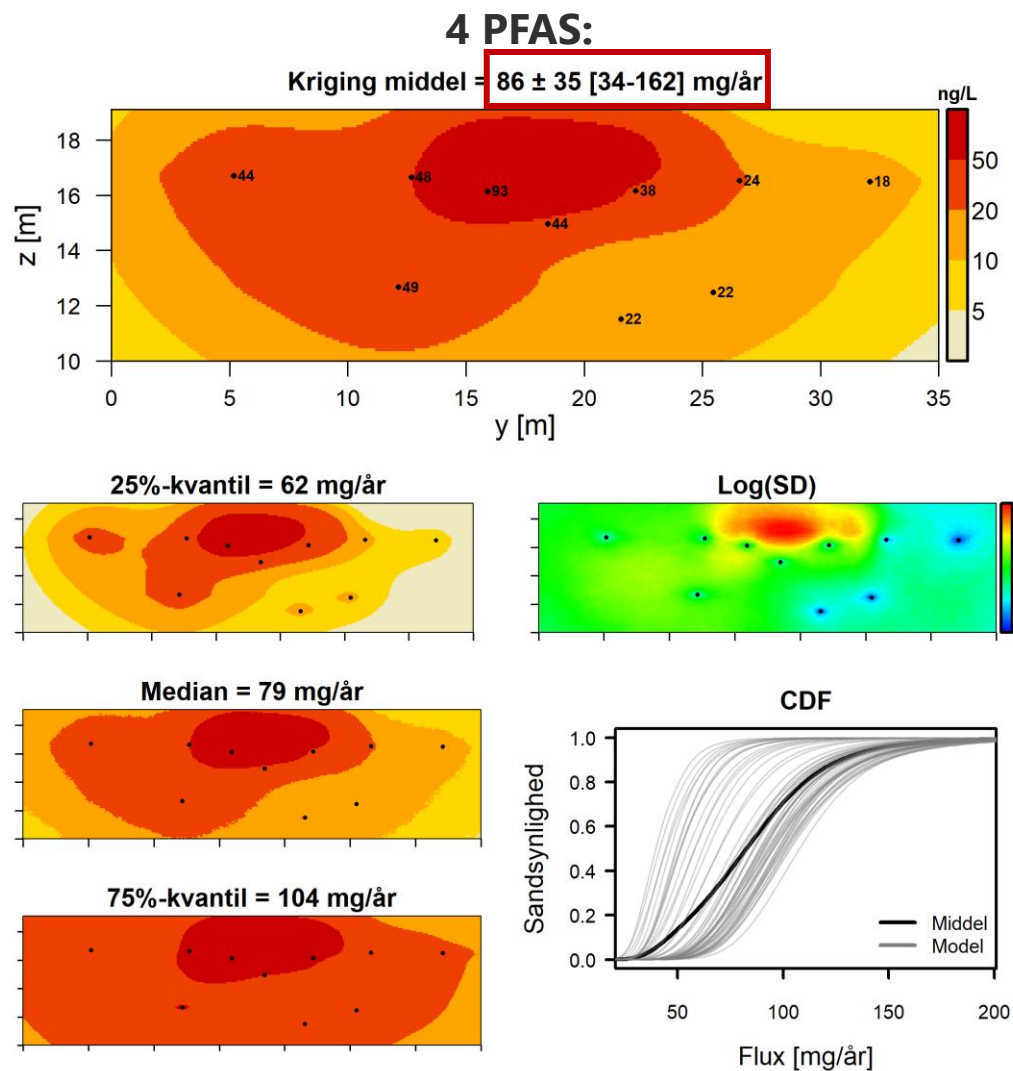
Anvendelse af geostatistisk model på fluxtransekt

Den simulerede middelværdi af K i fluxtransektet:



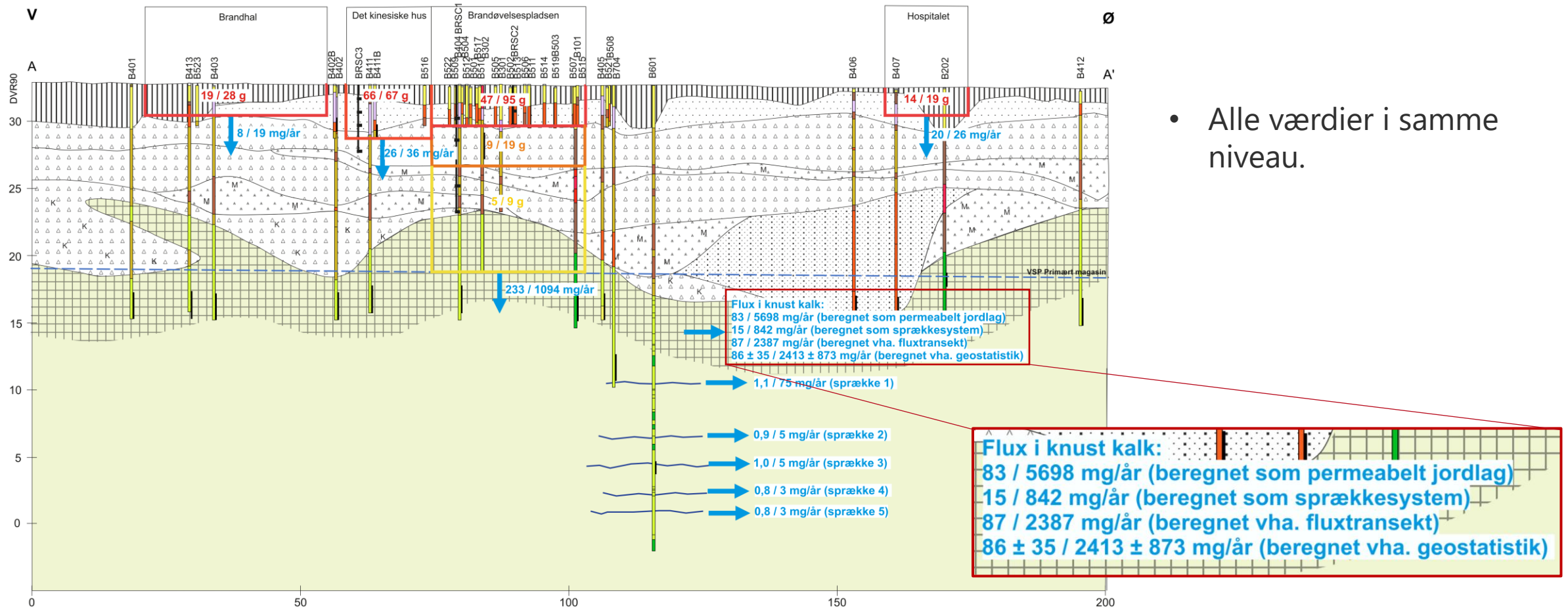
Metode 4

Anvendelse af geostatistisk model på fluxtransekt



Samlet vurdering

Sammenligning af flux i nedknust kalk



- Alle værdier i samme niveau.

Samlet vurdering

Vurdering af metoder

	Fordele	Ulemper
Metode 1 - Permeabel jordlag	• Simpel metode • Anvendes typisk ved indledende undersøgelser	• Stor usikkerhed • Stærkt afhængig af parameterbestemmelse
Metode 2 - Sprækkesystem	• Regner med opsprækket geologi (ikke permeabel)	• Stor usikkerhed • Kræver viden om sprækketykkelse, antal sprækkesystemer pr. m og grundvandshastighed • Stærkt afhængig af parameter bestemmelse
Metode 3 – Fluxtransekt	• Øget viden om forureningsfanen og dermed større sikkerhed i bestemmelsen af fluxen • Anvendes typisk ved videregående / større undersøgelser	• Kræver etablering af fluxtransekt • Økonomisk mere omfangsrigt end metode 1 og 2
Metode 4 – Geostatisk model	• Indsigt i variationen af forureningsfluxen • Inddragelse af usikkerhed ift. hydrauliske konduktivitet og koncentrationer • Indblik i hvor der mangler data • Reproducerbar og nemt at opdatere med ekstra data (.csv fil og automatiseret)	• Kræver etablering af fluxtransekt • Kræver modelleringsekspertise • Økonomisk mere omfangsrigt end metode 1, 2 og 3

Take home message

- Der er overraskende god overensstemmelse mellem anvendelse af de forskellige fluxmodeller
- Der kan med fordel anvendes forskellige fluxmodeller afhængig af datagrundlagets omfang
- Meget god overensstemmelse mellem den klassiske fluxtransektmetode og den geostatistiske metode → De geostatistiske beregninger afspejler det faktiske spredningsbillede.
- Ved brug af avanceret geostatistisk modellering kan der opnås indsigt i variationen af forureningsfluxen samt hvor der evt. kræves mere data for en større sikkerhed i bestemmelsen af fluxen



For yderligere spørgsmål:

Helene Draborg

hdra@niras.dk

+ 45 28 12 11 48