

NordFoU: External Influences on Spray Patterns (EPAS)  
**Rapport 19: Effekt af vind- og kørehastighed på saltspild**  
(Praktisk anvendelse af regnearks model 3S)

Af  
Hisamitsu Takai, Ph.D.  
Dept. of Engineering, Engineering Centre Bygholm, Horsens (Indtil 2019)

### Forord

Denne rapport supplerer regnearks model 3S, som simulerer spredning af vejsalt. Det anbefales at læse rapporten sammen med den seneste version "3S V2019".

3S V2019 omfatter i alt 18 sider (ark), som er opdelt 4 afsnit: 1) Read first, 2) Bruger interface, 3) "H-afsnit" til forklaring af parametrene der skal indtastes via afsnittet Bruger interface og 4) "S-afsnit", hvor simuleringsberegningerne udføres.

**Om denne rapport:** I kapitel 1 beskrives der simuleringseksempler, som illustrerer hvordan kørehastighed og vindhastighed påvirker saltspild. Dette viser at en simuleringanalyse, der isolerer en af mange parametre og undersøger virkningerne af variationer i denne parameter, er et værktøj, der kan hjælpe med at få indsigt i, hvordan komplekse processer som saltspredning fungerer.

I kapitel 2 redegøres der for, hvordan simuleringresultaterne blev opnået. I afsnit 2.1 er definitioner og koncepter, som anvendes i simuleringen beskrevet. Simuleringsproceduren er beskrevet i afsnit 2.2 og 2.3.

Rapporten kan læses som et forslag eller en vejledning til praktisk anvendelse af 3S.

### Konklusion

Fortolkningen af resultaterne er underlagt givne simuleringforudsætninger, men den simuleringanalyse, som er beskrevet i denne rapport fører til følgende konklusioner:

1. Kørehastigheden skal holdes ved eller under den hastighed sprederen er indstillet til.
2. Saltspildet stiger eksponentielt med stigende vindhastighed over den vind hastighed sprederen er indstillet til.
3. Afbalancering af Feeder-Disk parametre (se afsnit 2.2.2.) er afgørende for begrænsning af saltspild.
4. Afbalancering af Feeder-Disk-parametre kræver mere nøjagtig justering end det er muligt med den anvendte spreder i dette studie.
5. 3S V2019 er stadig en prototype, men ser ud til at kunne blive et nyttigt værktøj til operatørtræning og arbejdsplanlægning.
6. Dog, proceduren for anvendelse af 3S til praktisk formål er relativt kompliceret. Yderligere udvikling af 3S og mere brugervenlige analyse procedure er ønsket.

### 1. Simuleringseksempel

3S simulerer bevægelsen af saltpartikler spredt af en roterende spredeskive med flere spredvinger. Saltet, der er faldet på/tilført spredeskiven, samler sig på spredvingerne og bevæger sig langs vingerne til vingspidsen. I løbet af denne proces accelereres saltpartiklerne, indtil de bliver kastet ud i luften ved hastigheder og vinkler bestemt af både vingedesignet og sprederens indstillinger. Saltsprederen kaster saltet bagud i forhold til bilen. Men da bilen bevæger sig fremad, vil saltets bevægelse i forhold til vejen ske i en retning og med en hastighed, der opnås ved at kombinere den relative hastighedsvektor, hvormed saltet forlader skiven, og den hastighedsvektor, hvormed bilen kører. Saltpartiklerne hopper, når de rammer vejoverfladen og flyver eller ruller en kort afstand, inden de når deres endelige hvilepunkt. Saltets bevægelse påvirkes også af vinden, men vindretningen, som sprederen og saltet udsættes for, ændres hver gang vejen drejer og vinden ændrer retning. (Beregnete data om saltbevægelse kan læses på siderne S6- og S6B i 3S V2019.)

#### 1.1. Forudsætning for simuleringen

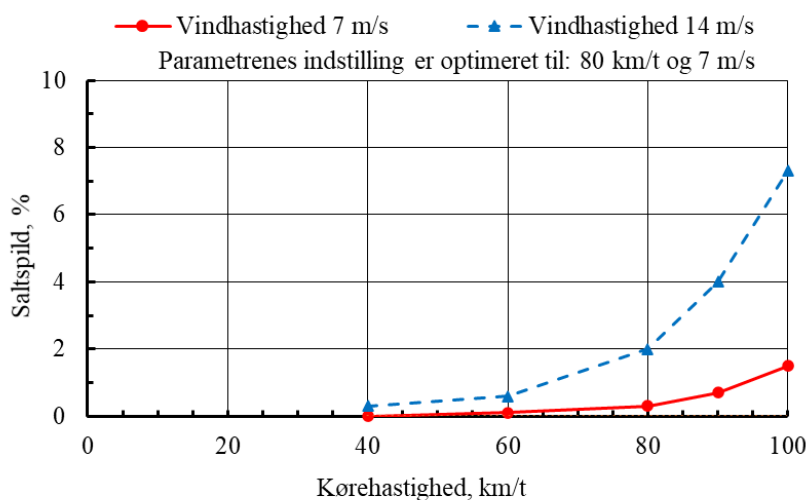
Simuleringen forudsætter at saltsprederen Epoke Sirius Combi (model AST) spreder befugtet grade-F salt på Østjyske motorvej fra afkørsel 56 (Horsens V.) til afkørsel 52 (Skanderborg V.). Kørehastighed og dosering er

henholdsvis 80 km/t og 10 g/m<sup>2</sup>. Middelvindhastighed og -retning er henholdsvis 7 m/s og vest-syd-vest (112.5° i det anvendte koordinatsystem, se afsnit 2.1.1). Vindretningens variation antages at følge en normalfordeling med en standardafvigelse på 45°.

## 1.2. Simuleringsresultater

### 1.2.1. Effekt af kørehastighed på saltspild

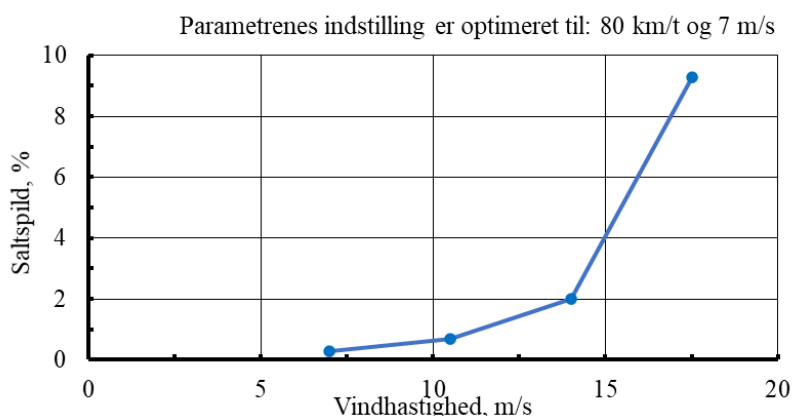
Saltspild ved spredning af befugtet salt på motorvejen fra Horsens V. til Skanderborg V. med forskellige kørehastigheder er simuleret for vindhastigheder på 7 og 14 m/s. Feeder-Disk parameterværdier er holdt fast på FDP-1 (Se afsnit 2.2.2. og afsnit 2.3. Trin 2) for alle kørehastigheder og vindhastigheder. Det vil sige at parametrenes indstilling er optimeret til at give minimalt saltspild ved 80 km/t og 7 m/s. Resultaterne er vist i figur 1. Det ses af figuren at forøgelsen af saltspildet bliver mere markant, når kørehastigheden overskrider den indstillede hastighed på 80 km/t. Denne tendens er mere tydelig ved en vindhastighed på 14 m/s. Forskellen i saltspildet ved 80 og 100 km/t er 1,2 procentpoint når vindhastigheden er på 7 m/s, mens det er 5,3 procentpoint ved 14 m/s.



Figur 1: Effekt af ændring af kørehastighed og vindhastighed på saltspild.

### 1.2.2. Effekt af vindhastighed på saltspild

Saltspildet ved forskellige vindhastigheder er simuleret med en kørehastighed på 80 km/t. Spreader- og parameterindstilling er uændret fra simuleringerne beskrevet i afsnit 1.2.1. Resultaterne er vist i figur 2. Saltspildet stiger eksponentielt med stigende vindhastighed fra 7 m/s, som parametrene er optimeret til.



Figur 2: Effekt af vindhastighedsændring på saltspild ved en kørehastighed på 80 km/t

## 1.3. Diskussion

I situationer, der kræver saltspredning, må det antages, at der opstår vindstød, som er langt kraftigere end middel vindhastigheden. Danmarks Meteorologiske Institut beskriver om vindstød som følgende:

Et vindstød skal afvige 5 m/s eller mere fra middelvindhastigheden og skal vare mindst 3 sekunder men højst et minut. Vindstød er typiske over land på grund af den turbulens, der opstår, når vinden møder forhindringer i landskabet; f.eks. bakker, bygninger og lignende. Derudover opstår vindstød, når luften er ustabil, og kraftigere vinde fra højere luftlag slår ned til overfladen<sup>1</sup>.

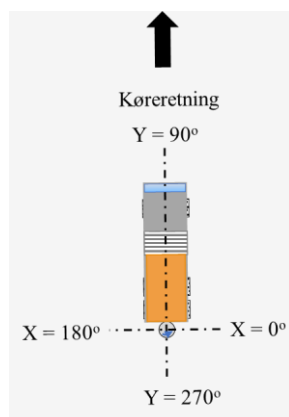
Vindstød er meget komplekse fænomener og er ikke de fænomener, der kan håndteres af 3S i nuværende udgave. Det er dog vigtigt at nævne, at simuleret saltspild, der er vist i figur 1 og 2, kun tager højde for den horisontale vindbevægelse, men ikke den vertikale. Hvis den vertikale (især opadgående) bevægelse dominerer vinden, vil saltspildet være meget højere end værdierne som aflæses i figurene.

## 2. Redegørelse for simuleringsanalyse

### 2.1. Forberedelse til simulering

#### 2.1.1. Geografisk koordinatsystem og spreder-koordinatsystem

Vej- og vindretning angives i det geografiske koordinatsystem, dvs. nord, vest, syd og øst er henholdsvis 0°, 90°, 180° og 270°. Spreder-vindretning (se afsnit 2.1.5) angives i spreder-koordinatsystem defineret som vist i figur 3.



Figur 3: Definition af spreder-koordinatsystem

#### 2.1.2. Salt spreder:

Simuleringen forudsætter at Epoke Sirius Combi model AST er anvendt til opgaven.



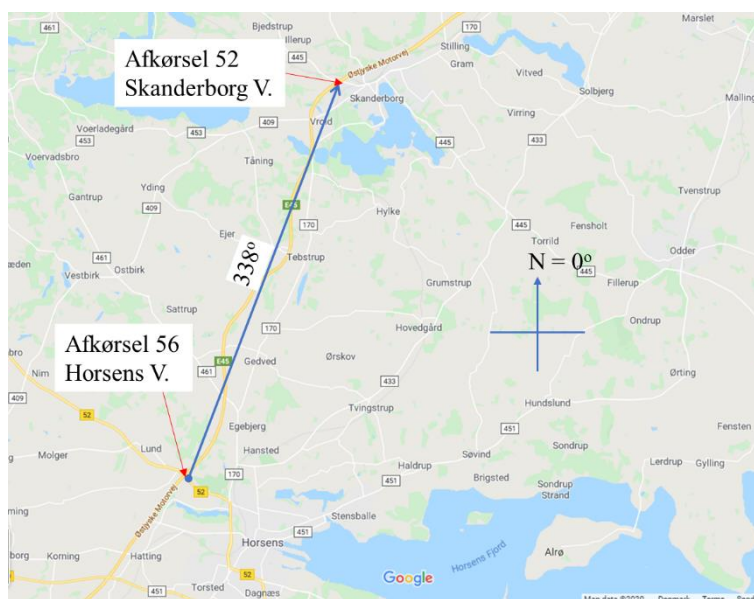
Figur 4: Saltsprederen Epoke Sirius Combi Model AST

#### 2.1.3. Vejens forhold

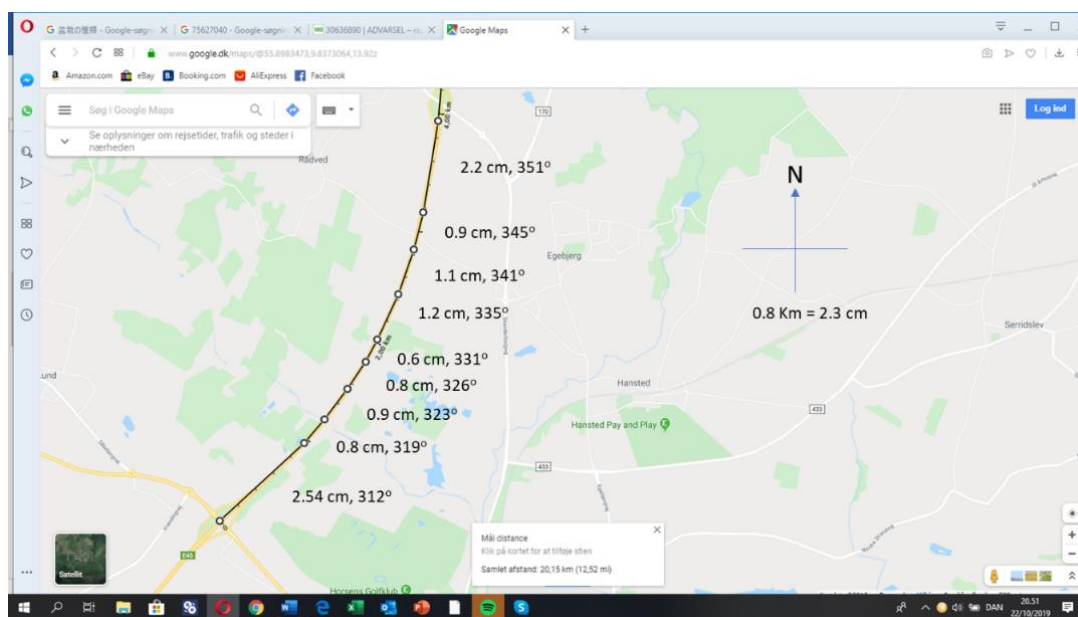
Motorvejen består af 2 kørespor á 3,5 m, kørebaneanter på begge sider, nødspor på højre side og rabatter på begge sider. De saltpartikler, som falder udenfor de 2 kørespor betragtes som spild.

Vejstrækningen fra Horsens V. til Skanderborg V. blev analyseret ved at måle kort hentet fra Google Maps, Figur 5 og 6. Veglængder og -retninger blev målt ved brug af Power Point (Drawing tools → Format Shape →

Size). Vejens total længde er 21,15 km. Den omfatter 56 vejsving af betydning, som varierer fra  $301^\circ$  til  $368^\circ$ . Den gennemsnitlige vejretning (køretretning) er  $338^\circ$  (ca. nord-nord-øst).



Figur 5: Kort hentet fra Google Maps blev brugt til at analysere vejforløbet.



Figur 6: Kortet viser en vejstrækning nær Horsens V. mod Skanderborg V. Strækningen blev opdelt i retlinede linjestykker, hvis længder og retninger blev opmålt.

#### 2.1.4. Vindforhold:

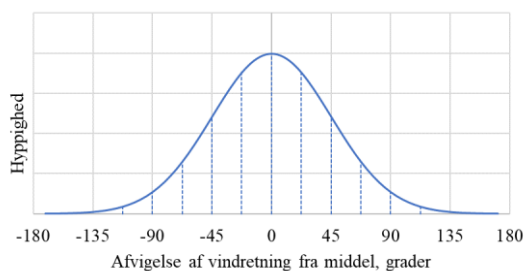
Simuleringerne antager at middelvindhastighed og -retning er på 7 m/s henholdsvis  $112.5^\circ$  (VSV). Disse antages at være hyppigst i januar og februar ifølge statistik over observationer på vejstationerne Ødum (nr. 222311) og Båstrup (nr. 23155)<sup>2</sup>.

Vindretning skifter hele tiden omkring middel vindretningen. Denne vindretningsvariation antages i simuleringerne at være normalfordelt med en standardafvigelse på  $45^\circ$ . Dette betyder at fordeling af vindretnings hyppighed følger normalfordelingskurve, figur 7.

For hver simuleringsserie i nærværende undersøgelse blev saltspildet simuleret fra middelvindretning minus  $90^\circ$  til plus  $90^\circ$  med et interval af  $\frac{1}{2}$  standardafvigelse, dvs.  $22.5^\circ$ . Hvert datasæt omfatter 9 forskellige

vindretninger, og der blev behov for at oprette vindretningsnumre, som vist i tabel 1, for at undgå forvirring i dataorganisationen.

Tabel 2 viser sandsynlighed for at vindretning vil være inden for interval af ½ standardafvigelse. Hver simuleringsserie omfatter middel vindretning  $\pm 90^\circ$  (=2 gange standardafvigelse), hvilket betyder, at 95,4% af vindretningsværdier er inkluderet i denne simuleringssanalyse.



Figur 7: Fordeling af vindretnings hyppighed antages at følge normal fordelingskurve.

Tabel 1: Vindretnings nummer (Nummer 5 er middel vindretning)

j = Vindretnings nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vindretning	-90°	-67.5°	-45°	-22.5	0°	22.5°	45°	67.5°	90°

Tabel 2: Frekvens af vindretnings interval og interval nummer

Vindretnings interval Antal STD*	P = Sandsynlighed** %	k = Interval nummer
-2 ~ -1.5	4.4	1
-1.5 ~ -1	9.2	2
-1 ~ -0.5	15.0	3
-0.5 ~ 0	19.1	4
0 ~ 0.5	19.1	5
0.5 ~ 1	15.0	6
1 ~ 1.5	9.2	7
1.5 ~ 2	4.4	8
Sum	95.4	

\*: STD = Standardafvigelse

\*\* : Sandsynlighed for, at vindretningen vil være inden for intervallet

### 2.1.5. Spreader-vindretning

Vindretning, som sprederen udsættes for kaldes spreader-vindretning. Den skifter hver gang vejen drejer og/eller vindretningen skifter. Derfor, skal sprederen også indstilles til skiftende køreretninger (= vejretninger). Det samlede saltspild er summen af saltspild ved hvert vejstykke, som har forskellige længder og retninger.

Simuleringsprogrammet kræver information om spreader-vindretning, som angives i grader i spreaderkoordinatsystem (se også afsnit 2.1.1.). Spreader-vindretningen beregnes ud fra køreretning og ”naturlig” vindretning som følgende:

$$a = (\text{vindretning}) - (\text{køreretning}) + 90^\circ$$

Ved ( $a \geq 0^\circ$  og  $a < 360^\circ$ ): Spreader-vindretning = a

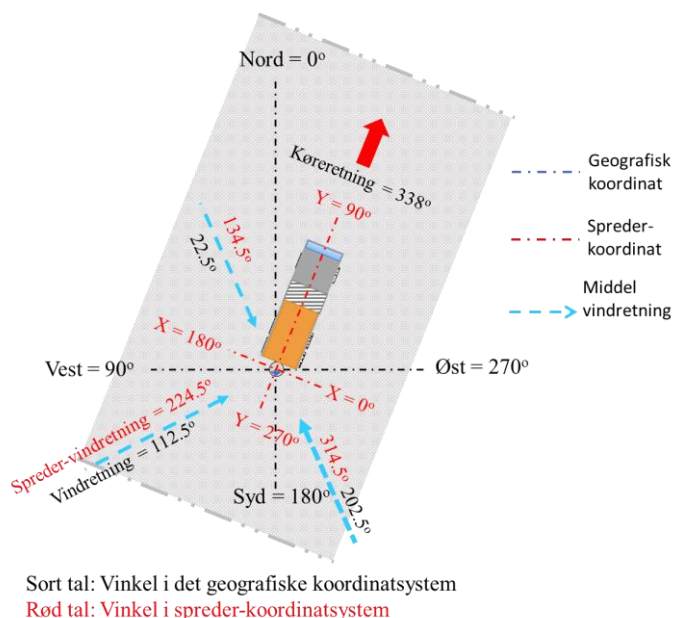
Ved ( $a \geq 360^\circ$ ): Spreader-vindretning = a - 360°

Ved ( $a < 0^\circ$ ): Spreader-vindretning = a + 360°

Figur 8 viser situationen, hvor sprederens køreretning er 338°, dvs. samme som det gennemsnit af vejretningen. Hvis for eksempel middelvindretningen er 112.5°, omregnes den til spreder-vindretning som følger:

$$a = 112.5 - 338 + 90 = -135.5$$

$$\text{Spreder-vindretning} = -135.5 + 360 = 224.5^\circ$$



Figur 8: En situation, hvor vinden blæser fra 112.5° på sprederen, der kører i den gennemsnitlige vejretning på 338°.

## 2.2. Parametre

Parametrenes startværdier anvendt i simuleringen er sat på grundlag af resultater fra og informationer om en fuldskala måling af spredning af befugtet salt udført af saltsprederen Epoke Sirius Combi (model AST). De målte resultater og de relevante tekniske specifikationer af sprederen blev anvendt til at bestemme parameterværdierne. De definerer de tekniske specifikationer og indstillingen af sprederskiven m.m., som har betydning for arbejdets udførelse. De omfatter tre kategorier: 1) Parametre, som definerer operationsforhold, 2) Målbare/beregnelige parametre og 3) Parametre, der skal estimeres. Tabel 3a og 3b viser de startværdier af de parametre, som er indtastet via ”Brugerginterfacet” i 3S V2019 for at starte denne simuleringanalyse.

Tabel 3a: Startværdier af parametre, som er indtastet via ”Brugerg interface”

De parameterværdier vist i rød kan ændres for at simulere saltspild ved andre operationsforhold end fuldskala måling, som ansættelse af starte parameterværdier er baseret på.

Kategori	Parameter	Værdi
1) Parametre, som definerer operationsforhold	Salt type*	5
	Kørehastighed	18 km/t
	Dosering	10 g/m <sup>2</sup>
	Venstre spredbredde	4.5 m
	Højre spredbredde	2.5 m
	Vejbredde (Venstre)	4.4 m
	Vejbredde (Højre)	2.5 m
	Vindhastighed	6.5 m/s
2) Målbare/beregnelige parametre	Spreder-vindretning	180°
	Skivens rotations hastighed	480 rpm
	Skivens diameter	0.49 m



	Spredevingens rotations radius	0.23 m
	Skivens højde over vejen, m	0.45 m
	Antal spredevinge med/uden offset	3 / 3
	Vinge offset, grader	13°
	Bilens bageste bredde	2.5 m
	Afstand mellem skiven og bilen	0.7 m
3) Parametre, som skal estimeres	Tilførsels bredde (TB)	0.1 m
	Salt-Faldpunkt-Radius (FPR)	0.055 m
	Salt-Faldpunkt-Vinkel (FPV)	90°
	Takeoff-profil	Se tabel 3b
	Lodret kastvinkel	-2°
	k-værdi	0.05

\*: Se 3S V2019 side S2 for salt type.

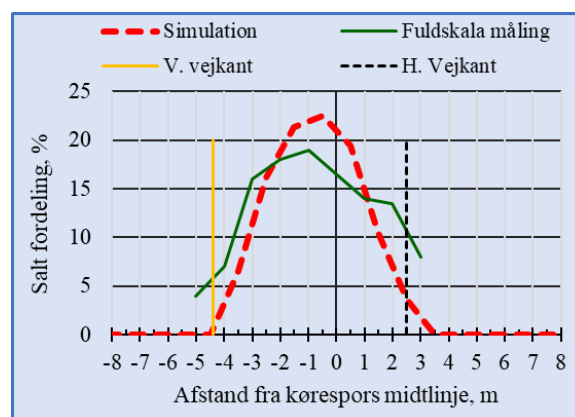
Tabel 3b: Takeoff-profil er indekseret salt mængde fordeling over den del af sprederskivens rotation, hvori salt kastes ud i luften (takeoff). Den største saltmængde sættes til 1.  
(Se også 3S V2019 "Bruger interface" og side "H6")

Sektion	1	2	3	4	5	6	7
Takeoff-profil, Indeks	0.6	0.5	0.8	0.9	1.0	0.6	0.3

### 2.2.1. Estimering af parameterværdiers gyldighed

Gyldigheden af estimerede parameterværdier kan evalueres ved at sammenligne resultat fra fuldskala måling med resultat fra simulering med den samme operationsbetingelse. Parameterværdier vist i tabel 3a og 3b er anvendt for den simulering, hvis resultat er vist i figur 9. Forskellen mellem de to kurver antyder, at der er nogle informationer om forsøgsforhold, som påvirkede fuldskalamálingen, f.eks. information om turbulent luftstrøm, mangler i simuleringen. På anden side indiker ligheden mellem de to kurver, at de vigtigste parametre er indstillet til passende værdier.

Simulering kan nu fortages under andre operationsforhold end det var for fuldskalamálingen, f.eks. andre spredervindretninger, vindhastigheder og kørehastigheder, ved at ændre de parametre vist i rød i tabel 3a. De parameterværdier, som holdes fast ved efterfølgende simulering er relateret til spredersens fysiske egenskaber og dermed antages at de er upåvirkede af ændring af operationsforhold. (Se også 3S V2019 "Read first")

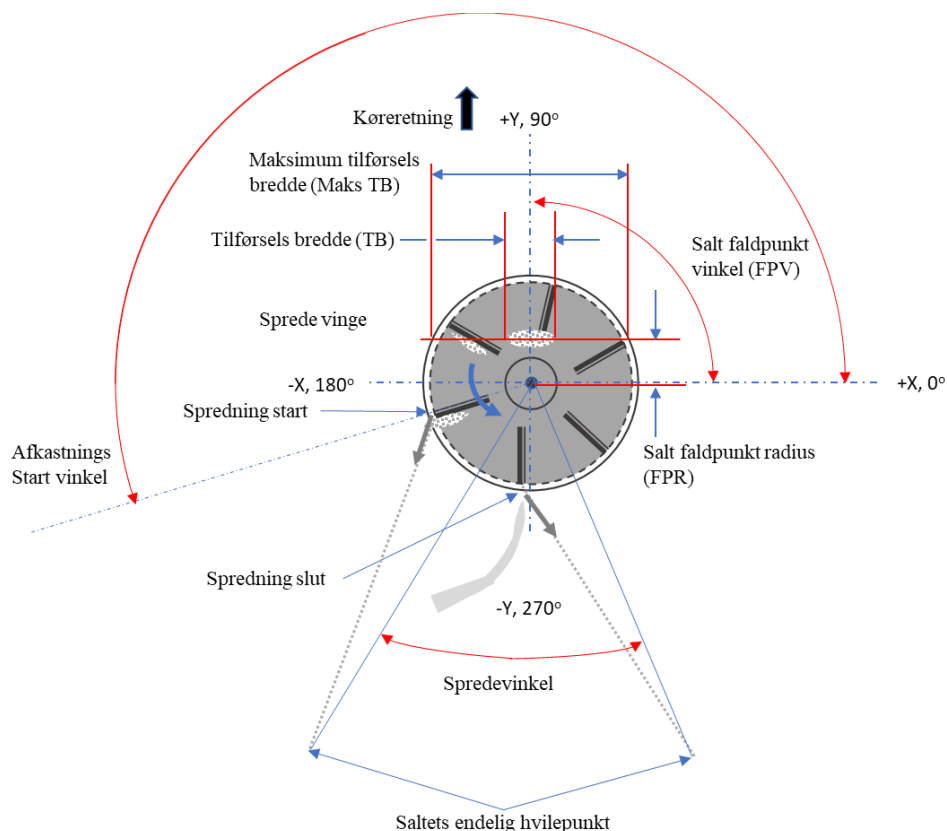


Figur 9: Sammenligning mellem fuldskala målinger og simuleringer for estimering af parameterværdiers gyldighed.

### 2.2.2. Feeder-Disk parametre

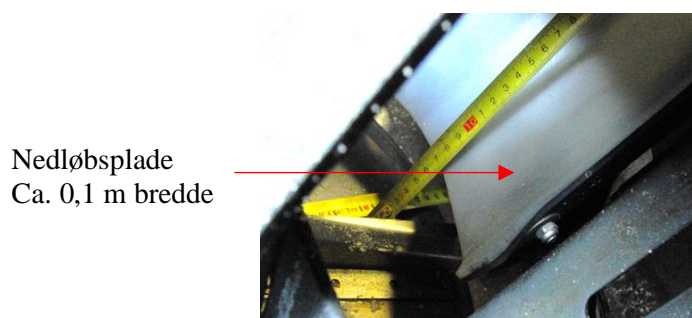
Ved ændrede operationsforhold skal operatøren justere sprederen, så saltet kastes med den rigtige hastighed og i den rigtige retning for at opnå den ønskede saltfordeling og begrænse eventuelt saltspild. Der er 4 parametre, som spiller en vigtig rolle i denne forbindelse. De kaldes i denne rapport "Feeder-Disk parametre". Hovedeffekterne af disse parametre er (ref. Figur 10 og 11):

- 1) Skivens rotationshastighed (RPM): Påvirker start vinkel og -hastighed ved afkast (takeoff), dermed flyveafstand.
- 2) Tilførsels bredde (TB): Påvirker spredevinkel. Om tilførsels bredde påvirkes af dosering og kørehastighed er afhængig af hvordan tilførsels aggregat er opbygget.
- 3) Salt-Faldpunkt-Radius (FPR): Påvirker spredevinkel og start vinkel for afkast.
- 4) Salt-Faldpunkt-Vinkel (FPV): Påvirker start vinkel for afkast.



Figur 10: Skitse til forklaring af Feeder-Disk parametre.

Parameteren "Tilførsels bredde (TB)" holdes fast på 0,1 m da det ikke ser ud til at nedløbsplade (Figur 11) have mulighed for at justere salttilførsels bredde.



Figur 11: Nedløbsplade af Epoke Sirius Combi



### 2.3.Fremgangsmåde for simulering af saltspild

Tabel 4 viser plan for undersøgelse af kørehastighedens og vindhastighedens effekt på saltspild. "M" står for statistisk model, der er en polynomiumligning. Den estimerer saltspild (Y) ved varierende spredervindretning (X), se også 2.3. Trin 4. En model til hver kombination af køre- og vindhastighed. Der skal udvikles i alt 12 modeller. Spredervindretning substituerer X i polynomiumligningen for at estimere saltspild for hver vejsving man møder, når man kører fra Horsens V til Skanderborg V. I det følgende beskrives fremgangsmåden til udvikling af statistiske modeller og anvendelse af modellerne til estimering af saltspild.

Tabel 4: Undersøgelingsplan

		Vindhastighed, m/s			
		7	10.5	14	17.5
Kørehastighed, Km/t	40	M1	-	M7	-
	60	M2	-	M8	-
	80	M3	M6	M9	M12
	90	M4	-	M10	-
	100	M5	-	M11	-

#### Trin 1: Etablering af reference spredervindretning

Feeder-Disk parametrene skal afbalanceres i henhold til de spredervindretninger, der forventes at være sandsynlige. Simuleringen antager en middel vindretning på  $112.5^\circ$  med en standardafvigelse (STD) på  $45^\circ$ , ref. 2.1.4. Vejretning varierer fra  $301^\circ$  til  $368^\circ$  ( $= 8^\circ$ ) og gennemsnitlig vejretning er  $338^\circ$ , ref. 2.1.3. Spredervindretning beregnes ud fra kombination af disse. Resultaterne er vist i tabel 5. Spredervindretning varierer fra  $104.5^\circ$  til  $351.5^\circ$ . Sandsynlighed for spredervindretning falder indenfor dette interval er 95.4% (ref. tabel 2). Vi bruger den middel spredervindretning og intervallet (røde tal i tabellen) som reference spredervindretninger til afbalancering af Feeder-Disk parameter.

Tabel 5: Spredervindretninger beregnet ud fra kombinationer af vind- og vejretninger.

Afvigelse fra middel		Vejretning		
Antal STD	Vindretning	$301^\circ$	$338^\circ$	$368^\circ$
-2	$22.5^\circ$	$171.5^\circ$	$134.5^\circ$	$104.5^\circ$
-1	$67.5^\circ$	$216.5^\circ$	$179.5^\circ$	$149.5^\circ$
0	$112.5^\circ$	$261.5^\circ$	$224.5^\circ$	$194.5^\circ$
1	$157.5^\circ$	$306.5^\circ$	$269.6^\circ$	$239.5^\circ$
2	$202.5^\circ$	$351.5^\circ$	$314.5^\circ$	$284.5^\circ$

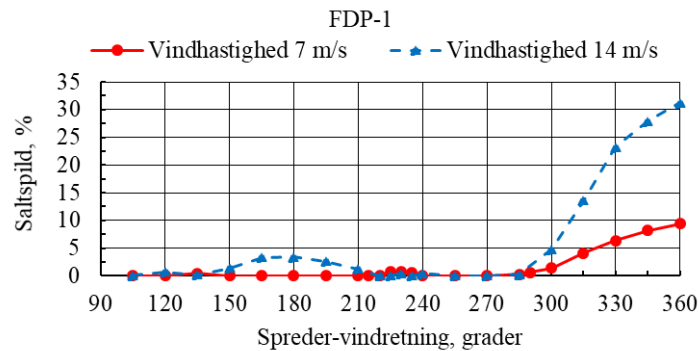
#### Trin 2: Afbalancering af Feeder-Disk parameter

Med en givet køre- og vindhastighed er det muligt at finde forskellige kombinationer af Feeder-Disk parameterverdier, som kan give minimalt saltspild over reference spredervindretninger. Efter nogle prøvesimuleringer med vindhastigheder på 7 og 14 m/s samt en kørehastighed på 80 km/t opnåedes to sæt Feeder-Disk parametre, som vist i tabel 6. De kaldes henholdsvis FDP-1 og FDP-2. Parametrene er afbalanceret til at give kun lille saltspild med en vindhastighed på 7 m/s og spredervindretningsintervallet fra  $104.5^\circ$  til  $351.5^\circ$ . Simuleringsresultater er vist med røde linjer i figur 12 og 13. Figurerne viser også sammenhængen mellem spredervindretning og saltspild for en vindhastighed på 14 m/s med uændret parameterverdier. Det er en klar forskel mellem FDP-1 og -2. Med FDP-2 vil saltspild forøges med forøget vindhastighed i spredervindretningsområde fra ca.  $120^\circ$  til  $240^\circ$ . Største del af området er mest knyttet til vindretningsområdet middel vindretning  $\pm 45^\circ$  ( $\pm 1$  STD), se tabel 5. Området dækker intervalnummer (k) 3, 4, 5 og 6 i tabel 2. Dette betyder at der er større sandsynlighed for forøget saltspild med FDP-2.

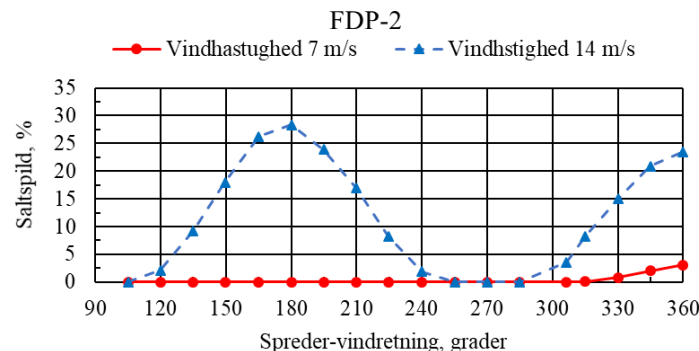
Tabel 6: To sæt Feeder-Diskparametre, FDP-1 og FDP-2.  
Disse blev betragtet som grundlag for yderligere simuleringsanalyse. (Se også figur 10)

Feeder-Disk parametre	FDP-1	FDP-2
Skivens rotations hastighed (RPM)	380 rpm	480 rpm
Bredden af tilført salt på skiven (TB)	0.1 m	0.1 m
Salt faldpunkt målt i radius (FPR)	0.07 m	0.1 m
Salt faldpunkt målt i vinkel (FPV)	90°	125°

Forklaring til dette er at saltspild vil stige i takt med forøgelse af vindhastighed når saltets flyverretning og vindretning er omtrent den samme og vender mere mod vejside end køreretning. FDP-1 vil blive brugt til efterfølgende simuleringsanalyse. Kurven for vindhastighed 7 m/s i fig. 12 svarer til M3 og 14 m/s svarer til M9 i tabel 4.



Figur 12: Effekt af spreader-vindretning og vindhastighed på saltspild simuleret med Feeder-Disk parametre FDP-1. Kørehastighed er 80 km/t.



Figur 13: Effekt af spreader-vindretning og vindhastighed på saltspild simuleret med Feeder-Disk parametre FDP-2. Kørehastighed er 80 km/t.

### Trin 3: Simulering

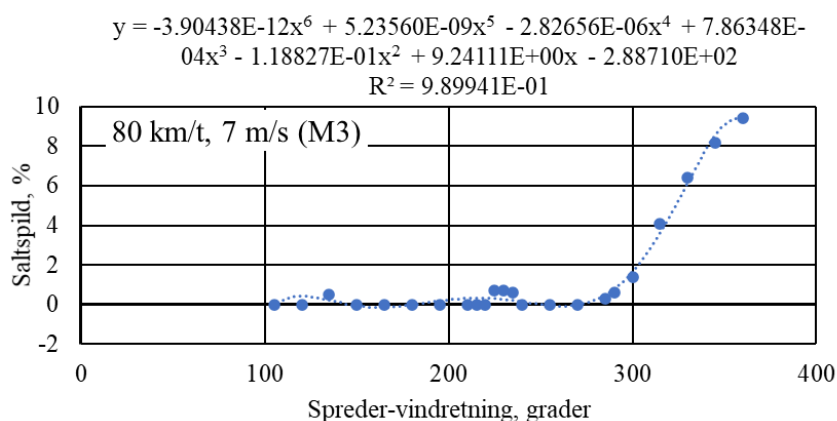
Der simuleres saltspild med forskellige spreader-vindretninger med passende interval, f.eks. hver 15° mellem 105° (eller 104.5°) og 360° (eller 351.5°). Dette gentages for alle kombinationer af køre- og vindhastigheder for M1 til M12 i tabel 4. Andre parametre end køre- og vindhastighed samt spreader-vindretning fastholdes på samme værdier som anvendt ved trin 2. Forudsat at simulering blev udført med et interval på 15° fra 105° til 360°, vil antallet af 3S-kørsler blive 18 for hver model.

### Trin 4: Udvikling af statistisk model

Resultater fra trin 3 plottes i diagrammer med spreader-vindretning (X-akse) vs. saltspild (Y-akse) med henblik på at udvikle statistiske modeller for M'er i tabel 4. Det bliver i alt 12 modeller (M1,,M12). Figur 14 viser et eksempel af sammenhængen mellem spreader-vindretning og saltspild samt en polynomiumligning (statistisk model) udviklet vha. Excel Trendline funktion.

### Trin 5: Beregne spredervindretning for vejsving

Vindretningsnummer tildeles som vist i tabel 6. For hvert vindretningsnummer beregnes spredervindretning for hver vejsving (= køreretning, se 2.1.3). Der er 56 vejsving. Så, hver vindretningsnummer vil omfatte 56 forskellige spredervindretninger.



Figur 14: Eksempel af sammenhængen mellem spredervindretning og saltspild samt polynomiumligning.

Tabel 6: Vindretningsnummer. Nummer 5 er middel vindretning. Nummer 1 og 9 er middel vindretning  $\pm 2 \times$  standardafvigelse. (Se også tabel 1)

Vindretningsnummer, j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vindretning	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°	180°	202.5°
Afvigelse fra middel	-90°	-67.5°	-45°	-22.5°	0°	22.5°	45°	67.5°	90°
Antal STD*	-2	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5	2

\*: STD = Standard afvigelse = 45°

### Trin 6: Beregne saltspild

Saltspildet beregnes for hver vindretningsnummer ved brug af de statistiske modeller (M1,,M12). Hvis resultatet af modelberegningen er negativt, skal saltspild for pågældende vejsving sættes til 0%.

Summen af saltspild for hver vejsving er det samlede saltspild ( $S_j$ ) for hele vejstrækningen (dvs. fra Horsens V til Skanderborg V):

$$S_j = \sum_{i=1}^n \left( \frac{SV_{ij}}{100} \cdot l_i \cdot DS \right) \quad [\text{kg}]$$

Hvor:

$S_j$  = Det samlede saltspild for hele vejstrækningen hvis vinden 100% af tiden blæser fra vindretning  $j$ .

$j$  = Vindretningsnummer (ref. tabel 6)

$SV_{ij}$  = Saltspild ved vejsving  $i$ , når vinden blæser fra vindretning  $j$ . [%]

$i$  = Vejstykke nummer

$n$  = Antal vejsving = 56

$l$  = Længden af vejstykke  $i$  [km]

$DS$  = Dosering pr. km-kørsel =  $(0.01 \text{ kg/m}^2) \times (7 \text{ m vejbredde}) \times 1000 \text{ m} = 70 \text{ kg/km}$

$S_j$ -beregning tager ikke højde for vindretnings sandsynlighed.  $S_j$  forudsætter at vinden kun kommer fra én retning i hele operationsperioden.

### Trin 8: Sammenkobling med vindretnings sandsynlighed

Samlet saltspild indenfor et vindretningsinterval med tilhørende sandsynlighed ( $S_k$ ), kan estimeres ved at multiplicere gennemsnittet af tilstødende  $S_j$ 'er med den tilhørende sandsynlighed. Summen af disse  $S_k$ 'er er det saltspild estimat af det totale saltspild for hver kombination af køre- og vindhastighed, som er vist i tabel 4:

$$S_k = \frac{S_j + S_{j+1}}{2} \cdot \frac{P_k}{100} \quad [\text{kg}]$$

$$S_t = \sum_{k=1}^{k=8} S_k \quad [\text{kg}]$$

Hvor:

$S_k$  = Estimerede saltspild indenfor vindretningsinterval  $k$  [kg]

$S_t$  = Estimerede saltspild [kg]

$P_k$  = Sandsynlighed for, at vindretning vil være inden for interval  $k$  [%]

$k$  = Interval nummer (ref. tabel 2 og 7)

Tabel 7 viser resultater fra en simuleringsserie med en kørehastighed på 80 km/t og vindhastighed på 7 m/s. Den totale saltmængde, der spredes på motorvejen fra Horsens V til Skanderborg V fås således:

(Dosering i  $\text{kg/m}^2$ )  $\times$  (vejbredde i m)  $\times$  1000  $\times$  (Længden af strækningen i km) =

$$0.01 \times 7 \times 1000 \times 22.15 = 1550.5 \text{ [kg]}$$

$$\text{Estimat af det totale saltspild i \%} = 100 \times 4.82 / 1550.5 = 0.3 \%$$

Tabel 7: Resultater fra en simuleringsserie med en kørehastighed på 80 km/t og vindhastighed på 7 m/s.

$j$ = Vindretnings nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vindretning	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°	180°	202.5°
$S_j$ [kg]	2.29	1.17	1.18	2.44	2.76	1.87	5.12	21.48	55.00
Gns. af $S_j$ og $S_{j+1}$ [kg]	1.73	1.17	1.81	2.60	2.32	3.50	13.30	38.24	
$k$ = Interval nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	
Sandsynlighed*, %	4.4	9.2	15.0	19.1	19.1	15.0	9.2	4.4	
$S_k = \frac{S_j + S_{j+1}}{2} \cdot \frac{P_k}{100}$ [kg]	0.08	0.11	0.27	0.50	0.44	0.52	1.22	1.68	
$S_t = \sum_{k=1}^{k=8} S_k$ [kg]	4.82								

\*: Sandsynlighed for, at vindretningen vil være inden for intervallet. (Se tabel 2)

### Efterskrift og tak

Udvikling af regnearks model 3S er en del af projekt, som blev udført af Vejdirektoratet i samarbejde med de nordiske vejmyndigheder og finansielt støttet af den nordiske forsknings- og udviklingsfond NordFoU. Rapporten er en supplerende dokumentation til NordFoU-projektet EPAS 2, 2017 - 2019, som er en fortsættelse af NordFoU-projektet EPAS "External Influences on Spray Patterns", 2014-2016, og StanSalt: "Standardisation of test method for salt spreader - Airflow experiments", 2011-2013

Forfatteren takker Krister Persson (Teknologisk Institut), Tine Damkjær (Projektleder, Vejdirektoratet), Jan Strøm (Aarhus University, Engineering Centre Bygholm, Horsens) og Torben Brøchner (VIA University College, Horsens), for diskussion og rådgivning ved udvikling af 3S samt Henning Tangen Søgaard (Ingeniørhøjskolen Aarhus Universitet) for værdifuld rådgivning til denne rapport.

### Reference:

1. Danmarks Meteorologiske Institut (2020): Middelvind, vindstød, kuling og storm - hvad mener meteorologen egentlig? <https://www.dmi.dk/nyheder/2017/middelvind-vindstoed-kuling-og-storm-hvad-mener-meteorologen-egentlig/>
2. John Cappelen and Bent Jørgensen (1999): Observed Wind Speed and Direction in Denmark – with Climatological Standard Normals, 1961-90, Technical report 99-13, Danish Meteorological Institute, Ministry of Transport

### Relaterede rapporter:

1. Takai, Hisamitsu, 2012: **Report 8:** Observation of salt particle trajectory from spreader disc to road surface [http://pure.au.dk/portal/da/publications/observation-of-salt-particle-trajectory-from-spreader-disc-to-road-surface\(bec50ee9-866a-44b3-97e8-a9c93326995b\).html](http://pure.au.dk/portal/da/publications/observation-of-salt-particle-trajectory-from-spreader-disc-to-road-surface(bec50ee9-866a-44b3-97e8-a9c93326995b).html)
2. Takai, Hisamitsu, 2012: **Report 10:** Simulation of salt particle trajectory from spreader disc to road surface [http://pure.au.dk/portal/da/publications/simulation-of-salt-particle-trajectory-from-spreader-disc-to-road-surface\(be325da2-a8ab-4cc0-9422-4844026c8c8f\).html](http://pure.au.dk/portal/da/publications/simulation-of-salt-particle-trajectory-from-spreader-disc-to-road-surface(be325da2-a8ab-4cc0-9422-4844026c8c8f).html)
3. Hisamitsu Takai<sup>1)</sup>, Torben Brøchner<sup>2)</sup> & Jan S. Strøm<sup>1)</sup>, 2015. **Report 13:** Experimental determination of key parameters for the Salt Spreading Simulation Software 3-S: [http://pure.au.dk/portal/files/94083095/Report\\_13\\_Parameters\\_for\\_3\\_S\\_06nov2015.pdf](http://pure.au.dk/portal/files/94083095/Report_13_Parameters_for_3_S_06nov2015.pdf)
4. Strøm, J., Takai H., Persson, K., and Brøchner, T. 2016: **Report 17:** Introduction to the Salt Spreading Simulation software 3-S [http://pure.au.dk/portal/da/persons/jan-soeberg-stroem\(7ca49bc0-bd77-4b67-8238-234801315107\)/publications/introduction-to-the-salt-spreading-simulation-software-3s\(fba8b6be-19b6-44c0-ac02-c3ce6c92bb50\).html](http://pure.au.dk/portal/da/persons/jan-soeberg-stroem(7ca49bc0-bd77-4b67-8238-234801315107)/publications/introduction-to-the-salt-spreading-simulation-software-3s(fba8b6be-19b6-44c0-ac02-c3ce6c92bb50).html)
5. H. Takai, H. T. Søggaard, P. M. Vera, T. Damkjær and K. Persson: **2018:** Report 18: Motion of thawer on a spreader disk. [https://pure.au.dk/portal/files/121106025/Report\\_18\\_Motion\\_of\\_thawer\\_on\\_a\\_spreader\\_disk.pdf](https://pure.au.dk/portal/files/121106025/Report_18_Motion_of_thawer_on_a_spreader_disk.pdf)