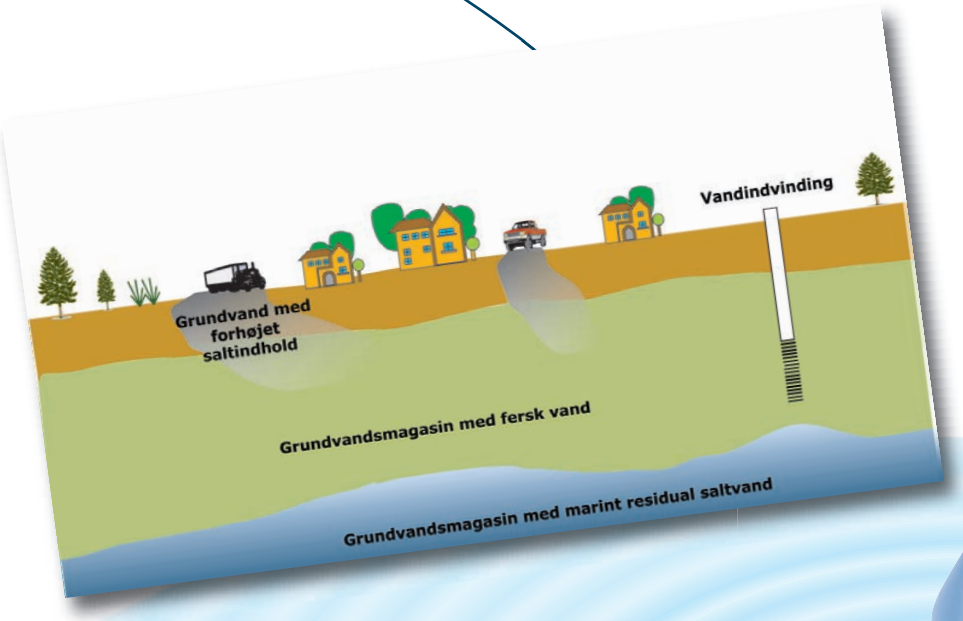
Vurdering af danske grundvandsmagasiners sårbarhed overfor vejsalt

Søren Munch Kristiansen,
Flemming Damgaard Christensen og
Birgitte Hansen



DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER FOR DANMARK OG GRØNLAND
MINISTERIET FOR KLIMA OG ENERGI

GEUS

Vurdering af danske grundvandsmagasiners sårbarhed overfor vejsalt

Søren Munch Kristiansen,
Flemming Damgaard Christensen og Birgitte Hansen

Vurdering af danske grundvandsmagasiners sårbarhed overfor vejsalt

Særudgivelse

Omslag: Henrik Klinge
Repro: GEUS
Oplag: 100

2009
Trykt: ISBN 978-87-7871-264-6
www: ISBN 978-87-7871-265-3

Rapporten kan hentes på nettet: www.geus.dk
Pris (indbundet): 200 kr

© De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS
Øster Voldgade 10
DK-1350 København K
Telefon; 38 14 20 00
E-post: geus@geus.dk

Udarbejdet i samarbejde med By- og Landsskabsstyrelsen, Miljøministeriet

Indholdsfortegnelse

Forord **7**

1. Sammenfatning og perspektivering **8**

2. Indledning **11**

2.1 Vejsalt og grundvandsressourcen ... 11
2.2 Kommissorium ... 12
2.3 Afgrænsning af projektet ... 12

3. Baggrund **14**

3.1 Hvorfor er vejsalt et problem for grundvandsressourcen? ... 14
3.2 Naturlige kilder til salt i grundvand ... 16
3.3 Menneskeskabte kilder til salt i grundvand ... 20
3.4 Tidligere danske undersøgelser af salt grundvand ... 22
3.5 Naturligt forekommende klorid koncentrationer ... 23
3.6 Vejsalt – forbrug og tab til omgivelserne ... 24
3.7 Driftstekniske aspekter i glatførebekæmpelsen ... 26
3.8 Tømidler i glatførebekæmpelsen ... 27

4. Adskillelse af kloridkilder **30**

4.1 Datagrundlaget ... 30
4.2 Kvalitet og behandling af data ... 30
4.3 Det overordnede princip ... 32
4.4 Isotoper til kildeadskillelse ... 33
4.5 Kemiske stoffer og forhold til kildeadskillelse ... 34
4.6 Aldersdatering af grundvandet ... 40
4.7 Resultater ... 40
4.8 Konklusion ... 51

5. Tidslig udvikling og regionale forskelle **54**

5.1 Dybdemæssig fordeling af klorid i grundvandet ... 54
5.2 Aldersvurdering af kloridindholdet i grundvandet ... 55
5.3 Tidslig udvikling i kloridindholdet på landsplan ... 55
5.4 Geografisk fordeling ... 58
5.5 Ionbytning ... 61
5.6 Klorid-bromidforholdet ... 63
5.7 Tidslig udvikling på regional skala i Storkøbenhavn ... 65
5.8 Konklusion ... 67

6. Vestegnens Vandsamarbejde som værkstedsområde **70**

6.1 Risikovurdering med modelsimuleringer ... 78
6.2 Modelresultater og varighedsvurdering ... 85
6.3 Usikkerheder og deres betydning ... 92

6.4 Konklusion 93

7. Referencer 95

8. Appendiks 101

Forord

Denne rapport er udarbejdet af Geologisk Institut, Aarhus Universitet, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) og Rambøll i forbindelse med projektet ”Danske grundvandsmagasiners følsomhed overfor vejsalt”. Projektet er igangsat af Styregruppen for den Nationale Grundvandskortlægning, og er finansieret med midler fra puljen for grundvandskortlægning fra Miljøcenter Århus, Ribe, Odense, Roskilde og Nykøbing Falster under By- og Landskabsstyrelsen, Miljøministeriet. Projektet er gennemført i perioden fra august 2008 til oktober 2009.

Det overordnede formål med projektet er at vurdere, om vejsalt fra glatførebekæmpelsen truer grundvandsressourcernes kvalitet i Danmark. Projektet er opdelt i tre dele. Den første del har som hovedformål at systematisere og analysere eksisterende data og viden om saltholdigt grundvand, med henblik på at kunne adskille kilderne til salt i dansk grundvand. Projektets anden del belyser eventuelle tidslige udviklinger samt dybdemæssige og regionale forskelle i kloridkoncentrationen i grundvandet. Projektets sidste del fokuserer på modellering af kloridindholdet i grundvandet i et værkstedsområde i Vestegnens kommuner ved København.

Projektgruppen har bestået af:

Søren Munch Kristiansen (projektleder, Geologisk Institut, Aarhus Universitet),
Flemming Damgaard Christensen (Rambøll) og
Birgitte Hansen (GEUS).

Til projektet har Miljøcentrenes kompetencenetværk for kemi under By- og Landskabsstyrelsen fungeret som faglig følgegruppe med korrekturlæsning m.v.

Derudover har følgende bidraget til projektet (i alfabetisk rækkefølge):

Benny Bak (Akzo Nobel)
Bente Fyrstenberg Nedergaard (GEUS)
Bo Sommer (Vejdirektoratet)
Brian Sørensen (GEUS)
Jeanne Kjær (GEUS)
Jens Asger Andersen (Miljøcenter Roskilde)
Ruth S. Nielsen (Geologisk Institut, Aarhus Universitet)
Sven G. Sommer (Syddansk Universitet)

Aarhus, den 4. december 2009.

1. Sammenfatning og perspektivering

Denne rapport er udarbejdet af Geologisk Institut, Aarhus Universitet, De National Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) og Rambøll i forbindelse med projektet "Danske grundvandsmagasiners følsomhed overfor vejsalt". Projektet er finansieret af 5 miljøcentre under By- og Landskabsstyrelsen. Projektet er gennemført i perioden fra august 2008 til oktober 2009.

Det overordnede formål med projektet er at vurdere, om vejsalt fra glatførebekæmpelsen truer grundvandsressourcernes kvalitet regionalt og lokalt i Danmark. Vurderingen af danske grundvandsmagasiners sårbarhed overfor vejsalt omhandler primært en analyse af kloridindholdet i grundvandet i Danmark.

På veje og fortove anvendes der store mængder vejsalt (natriumklorid) til glatførebekæmpelse. I Danmark startede glatførebekæmpelsen for alvor i 1960-erne, og der bruges nu gennemsnitligt ca. 300.000 tons vejsalt pr. år. En del af vejsaltet transporteres væk via kloakker og vandløb. Det er også velkendt, at vejsaltning kan påvirke vandmiljøet og vegetation langs veje negativt, men vejsaltningens langsigtede betydning for kvaliteten af grundvandsressourcen er hidtil ikke belyst i Danmark.

I udlandet er der de seneste år registreret mange tilfælde af saltforurening af brønde og indvindingsboringer nær hovedveje og større byområder, som skyldes diffus kloridforurening fra veje. Forhøjet saltindhold i grundvand er også vidt udbredt i Danmark, og er hidtil altovervejende tolket som indtrængning af saltholdigt grundvand fra kyster og den dybere undergrund. Vejsaltning er dog også tidligere foreslået som kilden til forhøjet kloridindhold i grundvandet flere steder i landet.

På denne baggrund blev det besluttet at initialisere nærværende projekt og vurdere, hvorvidt klorid fra glatførebekæmpelsen udgør et kvalitetsproblem for grundvandet i Danmark. Projektet indeholder følgende 3 dele:

1. Udredning af egnede indikatorer til at adskille årsager til forhøjede kloridindhold i grundvand vha. eksisterende grundvandskemiske data i JUPITER databasen.
2. Analyse af de tidslige udviklinger i kloridindholdet i det danske grundvand i de seneste 110 år vha. eksisterende data i JUPITER databasen.
3. Udvikling af et computerbaseret risikovurderingsværktøj til at vurdere risikoen for grundvandsforurening fra vejsaltning samt mulige tiltags virkning på grundvandskvaliteten på oplandsskala.

Udredningen af mulighederne for at adskille kloridkilder ved kemiske indikatorer viser, at især udviklingen i klorid-bromidforholdet i grundvand er en god indikator på årsagen til forhøjet kloridindhold. Det anbefales derfor, at analysere for bromid i forbindelse med etablering af nye undersøgelsesboringer i den nationale grundvandskortlægning, og at medtage parameteren i det nationale grundvandsovervågningsprogram.

En række andre stoffer, isotoper og forhold mellem grundstoffer i grundvandet kan også være brugbare indikatorer. Herunder er grundvandets ionbytning (forholdet mellem natrium og klorid) en god indikator på ændret kloridpåvirkning af grundvandet. Ionbytningen viser f.eks., at det øvre grundvand fra 0-80 m u.t., sandsynligvis påvirkes af forøget kloridtilførsel, da de ofte har omvendt ionbyttet grundvand. Analysen viser ikke, hvorvidt den forøgede kloridpåvirkning fra jordoverfladen skyldes atmosfæriske salte, vejsaltning, depoter af vejsalt, lossepladser, landbrugsgødning, utætte kloakker og septiktanke.

Gennemgangen af kloridindholdets udvikling i dansk grundvand de seneste 100 år indikerer, at der ikke er stigende tendenser på nationalt plan. Denne udvikling skyldes sandsynligvis flere forhold som f.eks. ændringer i vandforsyningsstrukturen i samme periode.

Gennemgang af ca. 1.200 boringer med bromidanalyser fra hele landet indikerer, at omkring 75 af disse kan være påvirket af vejsaltning (klorid-bromidforhold >550 og omvendt ionbytning), men at kun ca. 30 af disse har >125 mg klorid pr. liter. Analysen bygger dog på et sparsomt datagrundlag, med en dårlig datadækning på landsplan og i tiden. Et øget antal bromidanalyser vil kunne give et stærkere værktøj til vurdering af vejsaltningens aktuelle påvirkning af grundvandsressourcen.

Risikovurderingsværktøjet, som er udviklet i dette projekt, består af en kildestyrkemodel og en allerede eksisterende grundvandsmodel, som er opstillet i MIKE SHE. Kildestyrkemodellen danner input til MIKE SHE ved fordeling af vejsaltforbruget på vejnettet i værkstedsområdet ved Vestegnen på Sjælland. Kildestyrkemodellen er bygget på indsamlede informationer om det historiske vejsaltsforbrug.

Vejsalt tabes til det omkringliggende miljø ad flere transportveje. Tabet af vejsalt til grundvandet vurderes i litteraturen at ligge mellem 15 til 50 % af vejsaltsforbruget. Det vurderes på denne baggrund, at der, i det meget urbaniserede værkstedsområde ved Vestegnen, vil være et tab af vejsalt til grundvandet af størrelsesorden 10-20 % af det samlede forbrug. Denne vigtige forudsætning for projektets konklusioner er behæftet med en vis usikkerhed, men er et rimeligt skøn baseret på eksisterende viden.

Simple overslagsberegninger for værkstedsområdet i Vestegnen viser, at en tabsprocent på 10 til 20 % vil resultere i en stigning af kloridindholdet i grundvandet på 30-60 mg/l over baggrundsniveauet. En tabsprocent til grundvandet på 50 % medføre en stigning i kloridkoncentrationen i grundvandet tæt på drikkevandskriteriet på 250 mg/l. Tilsvarende overslagsberegninger for de tættest bebyggede områder i Storkøbenhavn, f.eks. Frederiksberg kommune, indikerer, at tab af 10-20 % af vejsaltsforbruget medfører en stigning i grundvandets kloridindhold på 70-130 mg/l.

Modelsimuleringer af værkstedsområdets grundvand ved en tabsprocent på 15 % viser, at kloridindholdet under de bynære områder generelt vil stige 25-40 mg/l, mens der ved nogle vejbanefletninger af de større veje kan tilføres op til 125 mg klorid pr. liter ekstra til grundvandet.

I værkstedsområdet på Københavns Vestegn ses der tegn på, at kloridkoncentrationen i grundvandet generelt er stigende fra 40-80 mg klorid pr. liter i perioden 1965-1978 til 80-

160 mg/l i perioden 1994-2007. Samtidig har kloridkoncentrationen i 38 % af boringerne i området været stigende, 9 % har været faldende mens 53 % har været uændret. Kloridkilderne er her en kombination af vejsalt fra overfladen, marint residualvand fra den dybere undergrund samt infiltration af havvand ved kysten.

Resultaterne fra dette projekt indikerer, at klorid fra vejsaltningen i dag (ca. 180.000 tons klorid $år^{-1}$) sandsynligvis påvirker grundvandets kvalitet i boringer omkring byer og langs trafikintensive veje i hele landet i mange år frem. Dataanalysen på landsplan viser dog, at der på det eksisterende datamateriale i JUPITER, kun er et meget begrænset antal boringer, hvor vejsalt kan have medført en kloridkoncentration i grundvandet over drikkevandskriteriet. Vejsaltning bidrager altså til en forøgelse af grundvandsressourcernes kloridindhold og områder, hvor grundvandets kvalitet også er påvirket af saltholdigt grundvand fra andre kilder, f.eks. på grund af kraftig oppumpning, kan være i særlig risiko for ikke at overholde drikkevandskriteriet på 250 mg klorid pr. liter.

Det anbefales derfor, at der i den nationale grundvandskortlægning, i forbindelse med kortlægning i urbaniserede områder, inddrages en vurdering af grundvandsressourcens påvirkning fra vejsaltning. Udpegning af eventuelt kritiske vejstrækninger med den største risiko for grundvandsforurening vil være hensigtsmæssigt, i forhold til at beskytte grundvandet mod vejsaltsforurening. Dette arbejde kan foregå ved hjælp af et risikovurderingsværktøj baseret på en grundvandsmodel, hvorved vejstrækninger som har særlig risiko for at forurene vandforsyningsboringer, kan udpeges.

Projektet har identificeret et behov for at forbedre det nuværende vidensniveau omkring belastningen fra vejsalt og estimeringen af tabet til grundvandet, især i østdanske byområder. Denne viden vil f.eks. kunne opnås gennem etablering af et feltforsøg i et byområde, hvor der kontinuert moniteres på kloridindholdet i terrænnært grundvand langs vejene, i afstrømningen til åerne og i kloakvand fra rensningsanlæg. Desuden bør bidraget fra den dybere undergrund af kloridholdigt grundvandet også kvantificeres.

2. Indledning

2.1 Vejsalt og grundvandsressourcen

Grundvandet er Danmarks vigtige drikkevandsressource, og der pågår i disse år et omfattende arbejde med at kortlægge og beskytte denne ressource. Den nationale grundvandskortlægning fokuserer især på nitrat og pesticider i landbrugsområder, samt miljøfremmede stoffer generelt i bynære områder. Der er også fokus på andre mere naturligt forekommende stoffer i grundvandet, som f.eks. arsen og nikkel.

I udlandet er der i de seneste årtier registreret mange tilfælde af saltforurening af brønde og indvindingsboringer placeret nær hovedveje eller saltlagre. WHO anbefaler en grænseværdi på 250 mg klorid pr. liter for klorid i drikkevandet af hensyn til smag. Nyere nordamerikanske undersøgelser viser, at klorid fra glatførebekæmpelsen må betragtes som et kritisk forurenende stof, som forårsager koncentrationer over 250 mg klorid pr. liter i grundvandet i større byområder (Howard & Beck, 1993; Howard & Maier, 2007). Dette blev allerede forudsagt i 1972 ud fra simple masse balancer (Hulling & Hollocher, 1972). I Nordeuropa er det også fundet, at klorid fra vejsaltning udgør en betydelig risiko for grundvandets kvalitet. F.eks. er det fundet i Finland, at grundvandskvaliteten i op mod 43 % af de 2.200 kortlagte grundvandsområder er i risiko pga. vejsaltning (Nystén, 1998). I Sydsverige viser resultater, at grundvandet i både kommunale og private boringer er påvirket af klorid fra vejsaltningen, og at vejsaltning er årsag til en generel lettere forøget kloridkoncentration i grundvandet (Lindström, 2007; Thunqvist, 2004).

Resultaterne fra grundvandsovervågningen har også stedvis vist, at vejsaltning har resulteret i forhøjet og stigende kloridkoncentrationen i grundvandet (Carlson m.fl., 1998; GEUS, 1996; Fyns Amt, 2001; Ribe Amt, 2003). Nye undersøgelser for Frederiksberg Kommune indikerer også, at grundvandet i et område med særlige drikkevandsinteresser kan være alvorligt truet af vejsalt (Hjuler m.fl., 2007). Danske undersøgelser indikerer altså også, at grundvandsressourcens kvalitet lokalt eller regionalt kan være påvirket af vejsalt.

I Vandforsyningsloven er det et krav, at indsatsplaner for grundvandsbeskyttelsen skal udarbejdes på baggrund af en nærmere kortlægning af bl.a. forureningstrusler (§ 13 i LBK nr. 1026 af 20/10/2008). I de hidtil udarbejdede indsatsplaner er der typisk ikke taget højde for eventuelle trusler fra klorid fra vejsaltning, og der er dermed ikke indarbejdet vejsaltning som en indsats. Desuden er klorid anført i Grundvandsdirektivet af 12. december 2006, som et bilag II stof (Direktiv 2006/118/EF). Dette betyder, at Danmark er forpligtet til at kende baggrundskoncentrationen for klorid i grundvandet, for at kunne vurdere direkte eller indirekte forurening som følge af menneskelig aktivitet. Dette skal ses i lyset af, at Det Europæiske Miljøagentur anser indtrængning af saltvand som en stor og forøget trussel imod Europas drikkevandsressourcer (EEA, 2009).

2.2 Kommissorium

På baggrund af ovennævnte udenlandske og danske erfaringer blev det besluttet, at dette projekt skulle vurdere, hvorvidt klorid fra glatførebekæmpelsen udgør, eller vil komme til at udgøre, et fremtidigt kvalitetsproblem for grundvandet i Danmark. Projektet skal belyse, om vejsalt fra glatførebekæmpelsen i sin nuværende form udgør en risiko for grundvandets kvalitet lokalt nær trafikintensive veje og bebyggede områder, samt om vejsaltning er et generelt miljøproblem for grundvandsressourcen i hele landet.

Vurderingen er opdelt i tre delprojekter, hvor hver del bygger videre på de foregående:

1. Indledende litteraturgennemgang og metodeudvikling for at kunne adskille årsager til forhøjede kloridindhold i det danske grundvand, hvilket også ville kunne anvendes ved årsagsudredning af kloridforureninger, som ikke skyldes vejsalt.
2. Analyse af de tidslige udviklinger i kloridindholdet i det danske grundvand i de seneste ca. 110 år.
3. Udvikle et risikovurderingsværktøj, som på oplandsskala kan anvendes til at vurdere risikoen fra vejsaltning på grundvandskvaliteten.

2.3 Afgrænsning af projektet

Der er valgt primært at fokusere på klorid som en indikator på den nuværende påvirkning fra glatførebekæmpelsen på befæstede arealer. Baggrunden er, at vejsaltning i meget høj grad foregår med vejsalt (klorid og natrium), og mængden af udbragt vejsalt de seneste 15 år svarer til, at mellem ca. 100.000 og 275.000 tons klorid er udspredt pr. år. Yderligere er klorid geokemisk og hydrogeologisk set et konservativt stof i grundvandet. Dvs. at det ikke omdannes til andre stoffer, og at det kun i begrænset omfang tilbageholdes i porehulrummene og ikke adsorberer til de sedimenter, som grundvandet strømmer igennem. Natrium på den anden side indgår i ionbytningsprocesser med grundvandssedimentet, og vil derfor forsinkes i forhold til klorid. Dette forhold er vist i figur 2.1, hvor klorids og natriums forskellige opførsler ved nedsivning ses (Kutilak & Nielsen, 1994). Fra udenlandske undersøgelser vides det også, at klorid er det stof fra vejsaltning, som først vil kunne medføre en overskridelse af grænseværdien for drikkevand (Howard & Maier, 2007).

Det vides, at arealer langs veje kan fungere som transportvej til det overfladenære grundvand for en lang række miljøfremmede og uønskede stoffer som f.eks. tungmetaller og organisk mikroforureninger, som muligvis kan være relateret til vejsaltningen (Jensen m.fl., 2000; Kjølholt m.fl., 1997; Blomqvist m.fl., 2001). Andre stoffer end klorid er dog ikke medtaget i nærværende udredning.

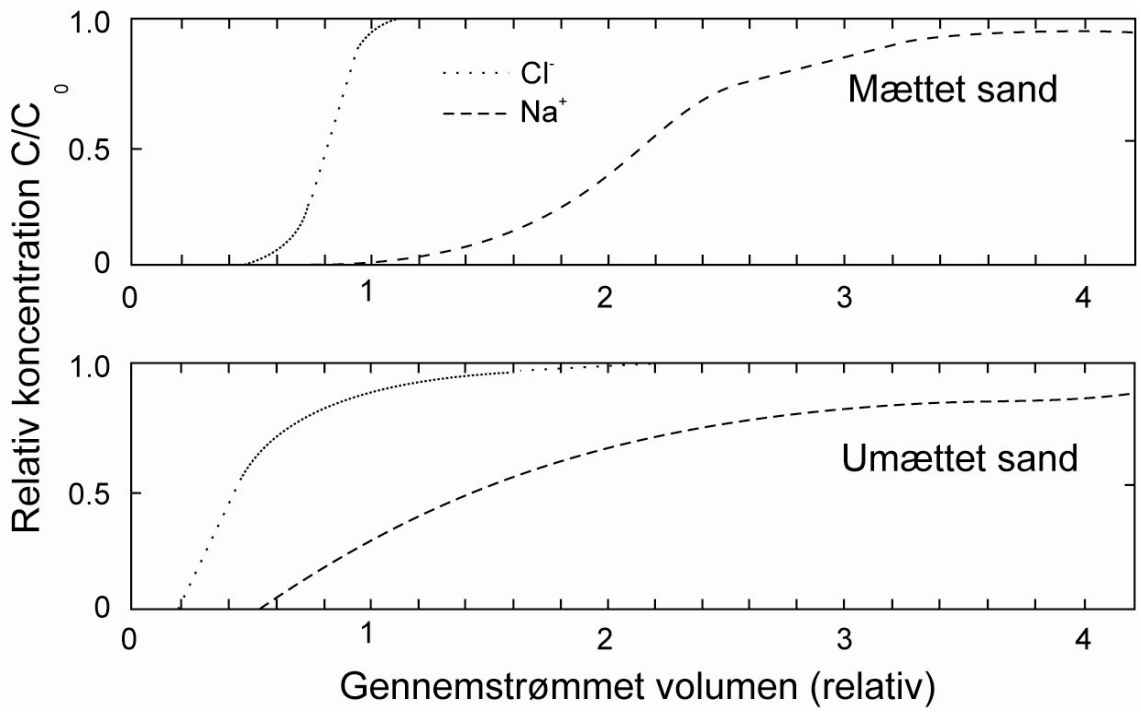
Projektet bygger på en analyse af eksisterende data fra den fællesoffentlige database JUPITER om grundvandets indhold af klorid, som rutinemæssigt har indgået i analyser af grundvandets hovedbestanddele gennem mere end 110 år.

Fokus i projektet er på selve vejsaltningen, som kan opfattes som en diffus linje- eller fladeforurening. Udvaskning af klorid fra depoter af vejsalt bliver kun behandlet i meget begræn-

set omfang. Disse er i dag omfattet af lovkrav om bl.a. fast underlag og opsamling af regnvand, med det formål netop at forhindre grundvandsforurening.

Der er taget kontakt til Vintertjenster i Stat og Kommuner med henblik på at beskrive nuværende og tidligere tiders forbrug af vejsalt. Driftstekniske aspekter af vejsaltningen, såsom anvendelse af f.eks. tømidler og evt. udvaskning til grundvandet, ligger uden for dette projekts rammer. Med hensyn til økonomisk værdisætning af vejsaltningens påvirkning af grundvand henvises der til Miljøstyrelsen (2002), hvor emnet er behandlet.

Dette projekt fokuserer kun på vejsaltningens betydning for grundvandskvaliteten. Andre negative effekter af vejsaltningen på f.eks. den terrestriske økologi (vejtræer, rabatvegetation, jordbund og flora og fauna i vandløb og søer) ligger dermed også udenfor dette projekts rammer (se f.eks.: Williams m.fl., 1999).



Figur 2.1: Teoretisk fremstilling af udviklingen i den relative koncentration af hhv. natrium og klorid i umættet og mættet jord som følge af en konstant saltpåvirkning (koncentration på C_0) med f.eks. vejsalt fra overfladen. Klorid opfører sig konservativt, mens natriums gennembrud forsinkes af adsorption og ionbytning med magnesium-calcium på jordpartiklerne. Delvist efter Kutilak & Nielsen, 1994.

3. Baggrund

3.1 Hvorfor er vejsalt et problem for grundvandsressourcen?

3.1.1 Historie og grænseværdier

Internationalt har det siden 1960-erne været erkendt, at salt fra glatførebekæmpelsen på veje kan påvirke grundvandets kvalitet, således at det ikke opfylder grænseværdierne for drikkevand (Huling & Hollocher, 1972). I lande som Canada, Norge og Sverige har der længe været fokus på klorid fra vejsaltning som et væsentligt problem for miljøtilstanden i ferske vande og for vandforsyninger baseret på grundvand (f.eks. Bækken & Hauge, 2006). Problemet er, at noget af det salte smeltevand nedsiver som en fane af forurenet vand langs vejen og kun langsomt fortyndes med det omgivende grundvand. Dette kan derfor give anledning til en øget koncentration af klorid i grundvandet nedstrøms.

Udenlandske og danske erfaringer med større grundvandsforureninger ledte i 1980-erne til, at vejsaltdepoter i Danmark fik fast bund og skulle ligge under fast tag, så direkte afstrømning blev forhindret. Saltdepoter har siden 1980-erne været underlagt lovgivning, som skal forhindre, at saltet udvaskes til grund- og overfladevand.

Selve anvendelsen af vejsaltet er ikke reguleret vha. dansk lovgivning, da det hidtil har været antaget, at negative påvirkninger på miljøet er lokale og begrænset til jordbunden, vejtræer og beplantning langs vejene. Da vejsaltning er en stor og uforudsigelig post på Statens og Kommunernes budgetter, pågår der dog en omfattende udvikling og forskning for at begrænse brugen mest muligt.

På landsplan er der flere eksempler på boringer, hvor diffus påvirkning fra veje mistænkes for at være årsagen til forhøjede kloridkoncentrationer i grundvand. Her kan nævnes overvågningsboringer i indsatsområdet Vendsyssel, Aalborg (Jens Østergaard, Aalborg Kommune, pers. komm.), Varde (Ribe Amt, 2003), Fyn (Fyns Amt, 2001), og Storkøbenhavn (Hinsby m.fl., 2003). F.eks. beskrev Fyns Amt (Fyns Amt, 2001), at der ”på en række vandværker og i et GRUMO overvågningsområde var et langsomt men konstant stigende kloridindhold i grundvandet”, hvor vejsalt blev foreslået som årsag.

I 1999 blev det vurderet, at der var stor risiko for, at et større forbrug af vejsalt på især ubefæstede arealer ville medføre en uhensigtsmæssig stor risiko for grundvandsforurening med klorid og natrium, hvis vejsalt blev anvendt til ukrudtbekæmpelse (GEUS notat, 1999). Vejsalt er derfor ikke et godkendt ukrudtbekæmpelsesmiddel.

Grænseværdien for kloridindholdet i drikkevandet er af dansk lovgivning fastsat til 250 mg/l for klorid, mens grænseværdien for natrium er på 175 mg/l. Disse grænseværdier er fastlagt ud fra smagsmæssige og til dels korrosive egenskaber, da indtaget af salt gennem

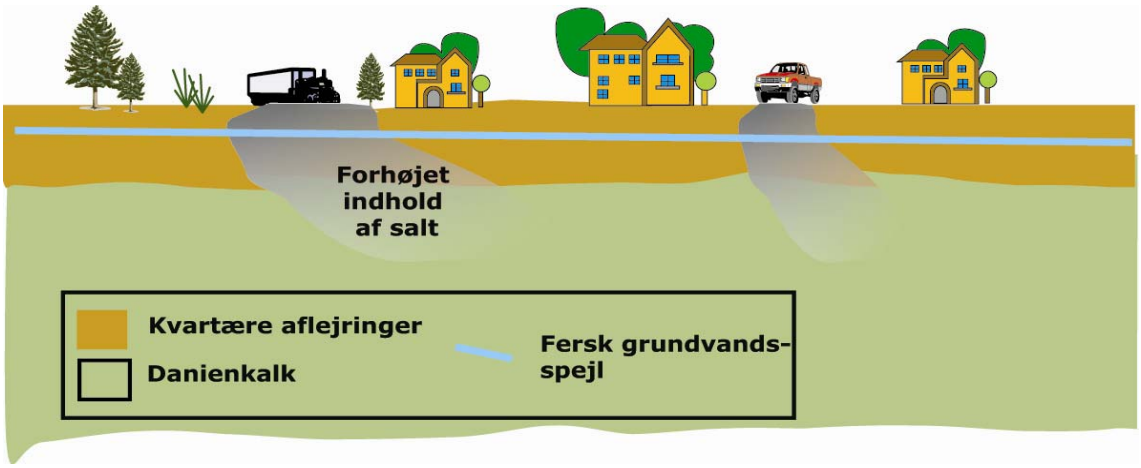
maden oftest langt overstiger indtaget gennem drikkevand. Der er således ingen sundhedsmæssige problemer forbundet med at indtage drikkevand med et kloridindhold på grænseværdien (WHO, 2004; BEK 1449 af 11/12/2007).

Der findes ingen kriterier eller biotoksikologisk baserede grænseværdier for kloridindhold i danske søer og grundvand. I Sverige har Naturvårdsverket (1999) opstillet nogle bedømmelser, hvor >100 mg klorid pr. liter anses som et højt indhold med risiko for korrosion og >300 mg klorid pr. liter anses som et meget højt indhold.

3.1.2 Diffus grundvandsforurening fra vejsaltning

Natriumklorid er et ikke-nedbrydeligt stof som i miljøet ikke omdannes kemisk, men kan fortyndes eller opkoncentreres. I grundvandsmagasinet sker der en fortynding via dispersion og diffusion i forhold til de højere koncentrationer fra linje- og punktforureningskilderne (se figur 3.1). Områder med høj nettonedbør og stor grundvandsdannelse er derfor mindre udsatte for negativ påvirkning af grundvand end områder med lav nettonedbør og lille grundvandsdannelse.

De udenlandske erfaringer viser også, at en høj grad af urbanisering med mange og tæt liggende trafikintensive veje forøger risikoen for negative påvirkninger af det omkringliggende miljø (Howard & Maier, 2007). Det må derfor forventes, at Østdanmark og især Storkøbenhavn har størst risiko for kloridforurening fra overfladen pga. især den lavere nettonedbør og højere grad af urbanisering relativt til Vestdanmark.



Figur 3.1: Grundvand med forhøjet kloridindhold dannes som en forureningsfane langs veje og fortyndes nedstrøms af grundvand med lavere kloridindhold.

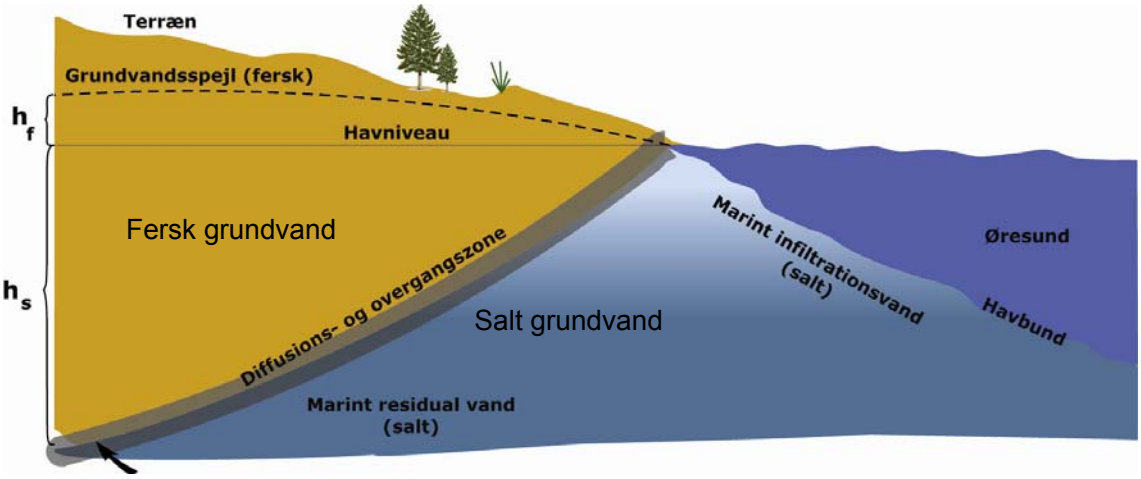
Koncentrationer af klorid i vejvand er rapporteret til at være så høje som 25.000 mg/l (Kjølholt m.fl., 1997), og >1.000 mg klorid pr. liter i afstrømmende vejvand om vinteren anses ikke for unormalt. Vejvand vil løbe direkte af fra vejen til kloak eller grundvand, afhængig af vejens indretning. En del af saltet, som tilføres en vej, vil kunne transporteres væk fra vejen ved sprøjt og som aerosoler over større distancer (POLMIT, 2002).

I Vardeområdet er vejsalts forurening af grundvandet undersøgt nærmere (Carlsson m.fl., 1998). Undersøgelsen viste, at indholdet af klorid i grundvandet under to ikke-kloakerede amtsveje kunne blive >1.500 mg/l, dvs. 6 gange grænseværdien for drikkevand, mens indholdet af natrium i den mest forurenede del af fanerne var på gennemsnit på 280 mg/l, dvs. mindre end det dobbelte af grænseværdien. Der blev ikke fundet overskridelse af drikkevandskvalitetskriterier for andre stoffer. Forureningsfanen blev hurtigt fortyndet nedstrøms, og mindre end 100 m fra vejene var klorid- og natriumindholdene under drikkevandskriteriet på 250 mg/l.

I Frederiksberg kommune er der gennemført en række undersøgelser for at udrede, hvorvidt de forhøjede kloridkoncentrationer skyldes vejsalt eller indtrængende marint residualvand. Her fandt Hjuler m.fl. (2007), at der var en risiko for at den nuværende vejsaltning i kommunen kan medføre gennemsnitskoncentrationer i grundvandet omkring eller over drikkevandskriteriet. Vestegnens Vandsamarbejde (2009) fandt yderligere for Københavns vestegn, at kilden til klorid i kalkmagasinet skyldes både marint residualvand og vejsaltning (inkl. vejsaltdepoter).

3.2 Naturlige kilder til salt i grundvand

Alt grundvand i Danmark er fra naturens side lagdelt og består af fersk grundvand ovenpå salt grundvand med en mellemliggende overgangszone med diffusionslag (se figur 3.2 og 3.4). Dybden til det salte grundvand varierer fra få meter langs vore kyster til 2-300 meter centralt under Jylland. For at udrede, hvorvidt vejsaltning udgør en trussel for en given grundvandsressource, er det derfor essentielt at kende bidraget fra alle kilderne til grundvandets saltindhold. Hver for sig bidrager kilderne til grundvandets gennemsnitskoncentration, og derfor kan de også tilsammen forårsage problemer, hvis der er tilstrækkelig mange saltkilder, hvor der ikke samtidig sker en forøget grundvandsdannelse.



Figur 3.2: Skitse som viser ligevægten mellem fersk grundvand over havniveau (h_f) og den dybde, hvortil der kan cirkulere fersk grundvand under havniveau (h_s). Desuden illustration af marint infiltrationsvand og residualvand samt overgangszone med diffusion.

3.2.1 Inddeling af salt grundvand

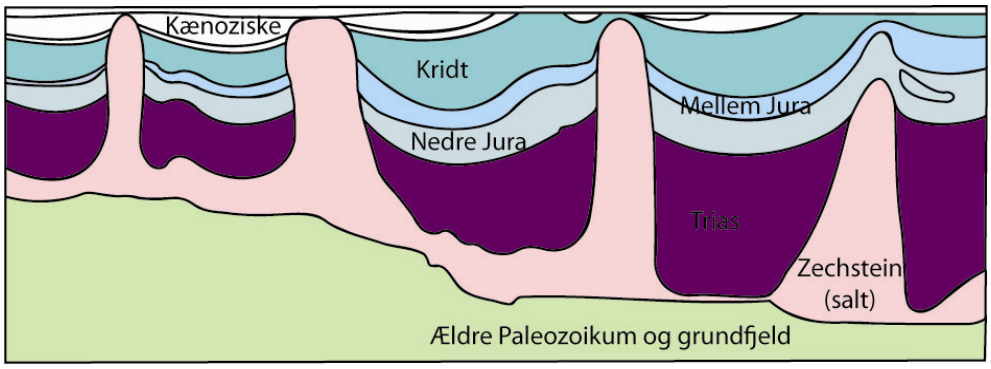
Da klorid i grundvandet kan stamme fra andre kilder end vejsalt, er det afgørende at kende de forskellige mulige kilder, for at kunne lave en kildeopsporing. Der skelnes i Danmark traditionelt imellem *fersk grundvand*, *salt grundvand* og *salt, mineralsk grundvand* (Ørum og Christensen, 1936). Grænsen mellem fersk og salt grundvand sættes typisk ved 250 mg klorid pr. liter. Det salte grundvand kan underinddeles i de grundvandsforekomster, hvis saltindhold er mindre end eller lig med havvands, og de som har et højere indhold.

Fersk grundvand er opstået som følge af Danmarks nedbørsoverskud. Klorid i grundvand stammer således først og fremmest fra nedbøren og den atmosfæriske tørdeposition, da der føres store mængder salt (som aerosoler) ind fra havet i forbindelse med især storme. Nedbøren ved Vestkysten har de højeste gennemsnitlige kloridkoncentrationer, og målte regnvandskoncentrationer svinger mellem 3 og 10 mg klorid pr. liter. Fersk grundvand i Danmark har således et baggrundsniveau af klorid, som varierer fra sted til sted og fra år til år.

Salt grundvand kan underopdeles i ”*marint infiltrationsvand*” og ”*marint residualvand*”. Marint Infiltrationsvand kan findes ved kysterne, hvor havvand direkte kan strømme til, og findes udelukkende få hundrede meter fra recente kyster (f.eks. Olofsson, 1996). ”Marint residualvand” er derimod vidt udbredt i Danmark og findes, hvor landhævning eller -indvinding har medført, at tidligere havbundssedimenter er bragt ind på landjorden. Sådanne marine sedimenter har nemlig saltvand i porehulrummene, som langsomt vil vaskes ud oftest pga. lav-permeable lag, som har forhindret grundvandsstrømninger i at opferske porevandet.

Salt mineralsk grundvand hører den dybere undergrund til, og er karakteriseret ved et saltindhold, som overstiger recent havvands pga. et tidligere varmere klima på dannelsestidspunktet. Højere kloridindhold end havvand i f.eks. kalkaflejringer kan skyldes opadrettet diffusion fra dybere aflejringer som følge af kompaktion af disse (Bonnesen m.fl., 2009).

I praksis vil det dog ofte være svært at afgøre, hvorvidt der er tale om marint residualvand eller mineralsk grundvand ved kloridkoncentrationer under havvand, da store dele af landet har været dækket af hav inden for de seneste få millioner af år. Salt mineralsk grundvand kan dog enkelte steder i landet være en kilde til forhøjede kloridkoncentrationer, også ved overfladen som følge af opsivning langs forkastninger, f.eks. omkring Harte ved Kolding (Dinesen, 1961). Salt mineralsk grundvand og dets interaktion med overliggende ferske grundvand er kun i mindre grad undersøgt (se dog Bonnesen, 2009; Klitten m.fl., 2006 samt Tesmer m.fl., 2007).



Figur 3.3: Skitsen viser et tværsnit igennem Jylland's undergrund med 3-4 km høje salthorststrukturer (efter Vejbæk, 2006))

I figur 3.3 ses et tværsnit igennem Jylland med markante 3-4 km høje salthorststrukturer, som betyder, at grundvand dybere end 200-300 m er mineralsk saltvand pga. opløsning og diffusion af salt aflejret i Perm for 250 millioner år siden.

3.2.2 Dynamikken mellem salt og fersk grundvand

Det er forskellen i vægtfylde mellem ferskvand (ca. 1,00 g/cm^3) og saltvand som teoretisk afgører, hvor dybt der kan findes fersk grundvand ovenpå salt grundvand ved f.eks. kysten. Saltvandets typiske vægtfylde er ca. 1.025 g/cm^3 i Nordsøen, 1,02 g/cm^3 i Storebælt og 1,01 g/cm^3 i de indre farvande. Forholdet mellem dybden af ferskvand under havniveau og dybden af ferskvand over havniveau i grundvandsmagasinet et givet sted kan udtrykkes ved den såkaldte Ghyben-Herzberg formlen under hydrostatiske forhold:

$h_s = h_f / d_s - d_f$

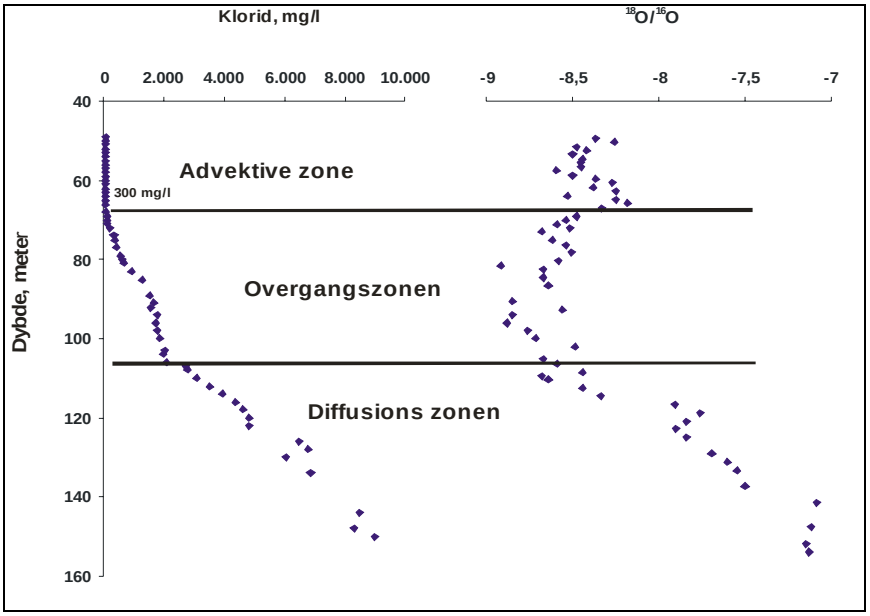
hvor h_s er dybden af ferskvand under havniveau, h_f er dybden af ferskvand over havniveau, d_s er densiteten af det salte havvand, og d_f er densiteten af ferskvand. Se også figur 3.2.

Ved at anvende ovenstående formel, vil man således se, at formlen for Nordsøens vand i kontakt med fersk grundvand kan simplificeres til at $h_s/h_{f,\ \text{Nordsøen}} = 40$, mens den for salt vand fra de indre farvande vil være: $h_s/h_{f\ \text{indre farvand}} = 100$.

Dette viser i teorien, at ferskvand i hydrostatisk ligevægtsforhold med marint infiltrationsvand fra de indre farvande kan skabe et større volumen af fersk grundvand under havniveau end ferskvand i ligevægtskontakt med marint infiltrationsvand fra Nordsøen. Erfaringen er dog, at forløbet er langt mere komplekst end disse simple formler forudsiger. Især diffusion samt ler- og mergellag i undergrunden har vist sig vigtige ved at forhindre indtrængning af salt grundvand, mens forkastninger og kraftig oppumpning/-strømning af fersk grundvand omvendt fremmer optrængningen.

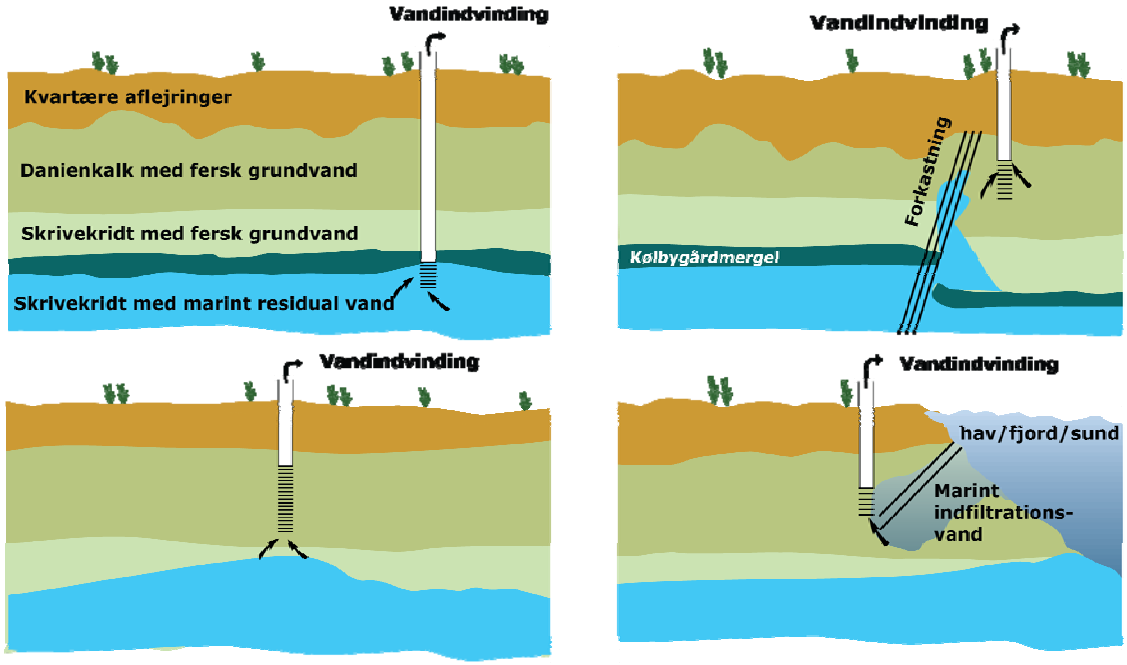
Grænsen mellem ferskvand og underliggende salt grundvand forekommer som en mange meter tyk overgangszone, og ikke som en skarp grænse, hvor fersk porevand afløses af stærkt saltholdigt porevand (se figur 3,2 og 3,4). Dette består af en såkaldt diffusionszone og en overgangszone, og kaldes samlet for saltvandsgrænsen. Beliggenheden i under-

grunden af denne grænse styres oftest ikke af det i dag eksisterende ferskvandstryk, dvs. den er ikke kontrolleret af en hydrostatisk ligevægt mellem fersk- og saltvand, men derimod af de oftest heterogene geologiske forhold med f.eks. lav-permeable lag. Grænsen er aldrig skarp, men en gradvis stigende kloridkoncentration med dybden. Denne gradient må formodes at være betinget delvis af fortynding med nedtrængende ferskvand, og delvis af opad rettet diffusion af opløste salte som klorid m.v.



Figur 3.4: Opdelingen af grundvandszoner på grænsen mellem fersk og saltvand, hvor også porevandets indhold af klorid og stabile iltisotoper ($^{18}O/^{16}O$) er vist, Eksempel fra Skrivekridt ved Karlslunde (DGU Nr. 207.3850.). Fra Larsen m.fl., 2006.

Saltvandsgrænsen er udviklet som en jævn overgang over flere hundrede meters dybde, hvilket er et resultat af en passiv, opadrettet diffusion af residualt salt porevand fra lav-permeable zoner/blokke, og ved advektion hvor der kontinuert sker en opferskning med nedtrængende fersk grundvand (se figur 3.4).



Figur 3.5: Illustration fra Østsjælland (modificeret fra Vestegnens Vandsamarbejde 2009a) som viser salt grundvands indtrængning til en indvindingsboring kan ske som følge af, at filteret er sat i lag med marint residualvand, ved at marint residualvand trænger ind langs forkastninger som gennembryder ellers impermeable lag), som advektion/diffusion fra underliggende saltholdige lag, eller ved indstrømning af marint infiltrationsvand fra havet.

I figur 3.5 er det skematiseret, hvordan indvinding af grundvand kan medføre, at salt grundvand enten trænger op fra den dybere undergrund (marint residualvand) eller, i kystnære områder, at salt grundvand trænger ind fra havet (marint infiltrationsvand). Dette skyldes, at beliggenheden af saltvandsgrænsen påvirkes umiddelbart omkring indvindingsboringen, pga. at det "trækkes med" af den øgede strømning af ferskvand eller det lokalt lavere piezometer tryk her (Jørgensen m.fl., 2008). Denne opdomning af overgangszonen kendes også under åer hvor en kraftig opad rettet strømning af fersk grundvand medfører, at det underliggende salte grundvand så at sige rives med opad af strømmen (Mielby & Sandersen, 2005).

Langs vore kyster forventes der ikke en skarp adskillelse mellem marint infiltrationsvand og marint residualvand, da både indtrængende havvand og hævede marine sedimenter kan være til stede her. Yderligere vides det, at marint infiltrationsvand sjældent findes mere end få 100 meter fra kysten (Olofsson, 1999), og at indtrængningshastigheden her er relativ langsom (f.eks. Jørgensen, 2008). Marint residualvand, som trænger op nedefra, forventes derfor at være langt den mest udbredte årsag til forhøjet kloridindhold i fersk grundvand.

3.3 Menneskeskabte kilder til salt i grundvand

Der kan være flere kilder til klorid i grundvandet. Som før omtalt stammer en del af de opløste salte, inkl. klorid i grundvand, fra nedbøren og den atmosfæriske tørdeposition. I tabel 3.1 er opsummeret de mulige og væsentligste menneskeskabte kilder til forøget kloridind-

hold i grundvand, mens figur 3.6 viser principperne for, hvordan klorid ender i grundvandet. Det ses, at vejsaltning ikke nødvendigvis giver anledning til de højeste koncentrationer.

Vejsaltningens bidrag til grundvandet sker som linie- og fladekilder (Kjeldsen & Christensen, 1996) og kan lokalt have markant forhøjede koncentrationer (Kjølholt m.fl., 1997, samt kapitel 3.1), mens der fra deponier kan udsive meget forhøjede koncentrationer til grundvandet (Ostendorf m.fl., 2006). Utætte kloakker og septiktanke kan også udgøre punktkilder, mens landbrugets bidrag normalt kan anses som en fladebelastning.

Landbrugets brug af kaliumholdig fast kunstgødning og flydende husdyrgødning er begge rige på opløste salte som natrium og klorid. Koncentrationen af klorid kan være op til flere tusind mg/l klorid i flydende husdyrgødning (Panno m.fl., 2006a). Udvaskningen af klorid fra gødede marker er dog yderst sjældent over 60 mg/l i gennemsnit over et år (upublicerede data fra VAP marker: Jeanne Kjær, pers. komm.; Pedersen, 1982), selvom der periodisk kan dannes nyt grundvand med kloridindhold på op til omkring 100 mg/l (Bjerg & Christensen, 1992). Bidrag fra utætte beholdere til flydende husdyrgødning er ikke medtaget, da sådanne kilder forventes at være meget sjældne pga. lovgivningen på området.

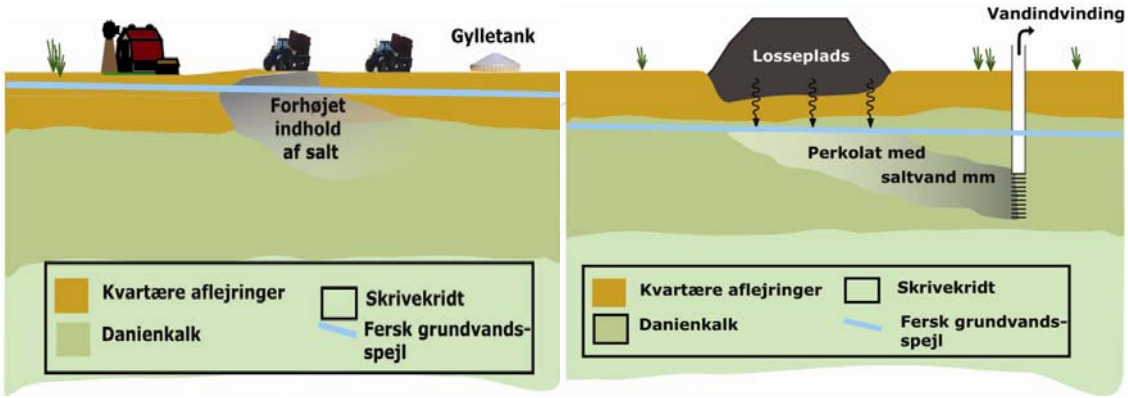
Nedsivning af saltholdigt vand kan også ske fra utætte kloakker i byer og septiktanke i det åbne land, men er sandsynligvis af begrænset betydning under danske forhold (Hjuler m.fl., 2007). Denne kilde til klorid i grundvand vil som oftest også medføre forhøjede koncentrationer af en række miljøfremmedes stoffer samt især kvælstofforbindelser som ammonium. Det forventes derfor, at forhøjede ammonium- og kloridindhold vil følges ad (Panno m.fl., 2006b), men ammonium fjernes/tilføres også ved en række andre processer i jorden.

Tabel: 3.1: Menneskeskabte kilder til forøget kloridindhold og de koncentrationsintervaller, som kilden forventes at kunne forårsage i dansk grundvand.

Kilde	Årsag	Klorid koncentrationsinterval mg/l	Saltets oprindelse	Reference
Depoter af vejsalt	Utilsigtet forurening	1.000-25.000	Vakuumsalt /stensalt	Ostendorf m.fl., 2006
Saltning af veje	Glatførebekæmpelse	10-1.500	Vakuumsalt /stensalt	Se kapitel 3.1
Lossepladser o.l.	Utilsigtet forurening	500-5.000	Vakuumsalt /stensalt	Jørgensen & Kjeldsen, 1995
Husdyrsgødning/gylle	Landbrugspraksis	30-100	Varierende	Bjerg & Christensen, 1992
Husdyrsgødning/gylle	Utætte beholdere	100-10.000	Varierende	Panno m.fl., 2006a
Kunstgødning	Landbrugspraksis	50-75	Varierende	Panno m.fl., 2006a
Utætte kloakker og septiktanke	Fødevarer og blødgøring af brugsvand	?	Vakuumsalt /stensalt	

Fra forurenede punktkilder som lossepladser o.l. er det kendt, at der er kraftigt forøgede indhold af salte i nydannet grundvand, herunder både natrium og klorid. Typiske koncentra-

tioner af klorid i grundvand, som siver ud fra disse steder, er 500-5.000 mg/l (Jørgensen & Kjeldsen, 1995). Lovgivningen på dette område medfører dog, at lossepladser og deponier, hvorfra der nedsiver forurenet grundvand, løbende moniteres og afværgeforanstaltninger iværksættes, hvis forureningen truer drikkevandsinteresserne i området.



Figur 3.6: Klorid kan tilføres grundvandet fra landbrugsdrift samt fra forurenede kilder som deponier, lossepladser o.l.

3.4 Tidligere danske undersøgelser af salt grundvand

I 1930-erne påviste Ødum & Christensen (1936) et betydeligt antal af områder med saltvandsproblemer i grundvandet. I fig. 3.7 vises de egne af Danmark, hvor der vides at være et højt indhold af salt i grundvandet (GEUS, 1996).

Der er lavet en række lokale og regionale undersøgelser (se eksempelvis Klitten m.fl., 2006 og Krüger, 1987) omhandlede klorid i grundvandsmagasiner på Østsjælland, hvor hovedparten af disse undersøgelser ikke vedrører vejsaltsproblematikken, men i højere grad klorid hidrørende fra residual havvand eller havvandsindtrængning i kystnære magasiner.

Et af de større regionale projekter er ”Saltvandsgrænsen i kalkmagasiner i Nordøstsjælland”, som blev gennemført i et sammenarbejde mellem DTU og GEUS i perioden 2002-2005 og finansieret af Roskilde, København og Frederiksborg Amter samt Københavns Energi (Klitten m.fl., 2006). Det er i projektet konkluderet, at kloridindholdet i Danienkalken generelt er udvasket, og i området vest for København (Vestegnen) og Køge Bugt er den øvre del af Skrivekridtet ligeledes udvasket for klorid. Saltvandsgrænsen (defineret ved 300 mg/l) ved Vestegnen findes i forbindelse med mergelhorisonter. I den øvrige del af Nordøstsjælland findes saltvandsgrænsen imidlertid ved overgangen mellem Danienkalk og Skrivekridt, dog med undtagelse af lokale områder med anomale forhold, såsom hævning af saltvandet som følge af oppumpning, forkastningsbetinget optrængning, kystnær beliggenhed eller vejsalt (Klitten & Wittrup, 2006).

Figur 3.7: Omtrentlige områder i Danmark hvor indholdet af saltvand i undergrunden på forhånd vides at udgøre et problem. Årsagen antages at være naturlig alle steder. Efter GEUS (1996).

3.5 Naturligt forekommende klorid koncentrationer

En baggrundkoncentration defineres som ”variationen i koncentrationer af et stof, forårsaget af bidrag fra naturlige geologiske, biologiske eller atmosfæriske kilder” (Hinsby m.fl., 2003). Den nuværende baggrundskoncentration for klorid i nydannet fersk grundvand er ikke på forhånd kendt. Den naturlige baggrundskoncentration, dvs. uden menneskelig aktivitet på marker, veje, m.fl., forventes dog at være lav bortset fra lokalt ved vestvendte kyster og lokalt ved vestvendte skovbryn. I grundvandet findes de højeste gennemsnitskoncentrationer i Østdanmark, og overvågningsdata har antydet, at koncentrationen er stigende i visse dele af Østsjælland (Miljøcenter Roskilde, 2008). Dette forhold er hidtil tolket som et samlet resultat af forøget påvirkning fra dybere lag i form af marint residualvand og mineralsk grundvand fra forkastninger o.l. (f.eks. Klitten m.fl., 2006).

Koncentrationen af natrium og klorid i regnvandet har en årlig middelværdi på <10 mg/l, men varierer betydeligt over året, afhængig af omfanget af især store storme, som bringer klorid ind fra havet. Øgede saltindhold i regnvand kendes f.eks. fra 1990-erne, hvor mere deposition af salt fra havet, som følge af den forøgede stormfrekvens, kraftigt øgede kloridudvaskningen i hele Nordvesteuropa (Fölster m.fl., 2003).

I Sverige findes en samlet opgørelse over de naturlige indhold af klorid i nedbøren og i grundvandet. Her viser det sig, at gennemsnitskoncentrationer i regnvandet varierer mellem 10 i Sydvestsverige til <1 mg/l i Finmarken (Olofson, 1999). Variationen i grundvandet i Sverige er fra ca.10 til 10.000 mg klorid pr. liter som følge af lav kloriddeposition i nord, og isostatisk hævning siden istiden i østlige og centrale dele af landet (Olofsson, 1996)

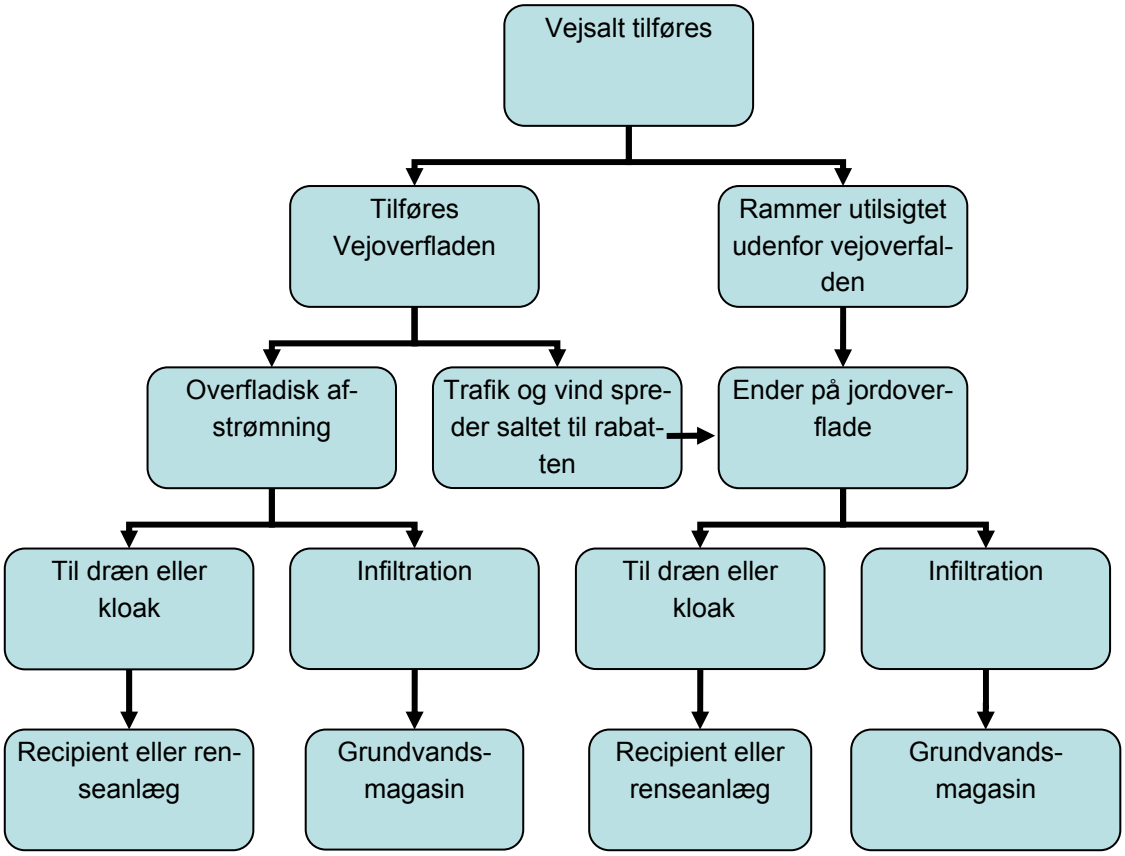
3.6 Vejsalt – forbrug og tab til omgivelserne

På befæstede arealer såsom veje og fortov anvendes der store mængder natriumklorid til afisning og som præventiv saltning. Forbruget af vejsalt i Danmark er af størrelsesordnen 100.000-300.000 tons pr. år (figur 3.9), afhængig af vejret i vinterhalvåret. Der bruges således ca. 1,5 til 3 kg vejsalt pr. m^2 vej pr. år på statsveje, mens der på kommune veje de seneste år er brugt mellem 0,6 og 1,75 kg vejsalt pr. m^2 vej (data fra Vejdirektoratet). Privates brug af salt kendes ikke, men f.eks. antager Hjuler m.fl. (2007), at det er på 10 % af det offentliges forbrug i den tæt befolkede Frederiksberg kommune. En række andre undersøgelser har ikke medtaget dette ukendte forbrug.

De mekanismer som styrer, hvor meget og hvordan tab af tømidler sker fra trafikerede veje er især, hvorvidt vejen er kloakeret, vejens egenskaber, nedbørens mængde og type, trafikintensiteten, udbringningsformen, vindpåvirkning samt trafikkens hastighed. Dette er beskrevet i Blomqvist m.fl. (2001). Der tabes mellem 10 til 50 % til omgivelserne af vejsaltet, hvor der er kloakeret, mens 80 til 100 % procent havner i omgivelserne, hvor der ikke er kloakeret. I udenlandske undersøgelser viser feltstudier og computersimuleringer, at der for byområder tabes mellem 45 til 55 % direkte til jordoverfladen, som dermed er potentiel tilgængelig for infiltration til grundvandet (Howard & Haynes, 1993; Lundmark & Olofsson, 2007). Saltpåvirkningen fra en vej sker helt op til 100 m fra vejen pga. aerosoldannelse og vindtransport (Blomqvist m.fl., 2001). I nærværende projekt er viden om tabsprocenter og -typer kommet fra publicerede danske og udenlandske undersøgelser fra landeveje og byområder (f.eks. Lundmark & Olofsson, 2007; POLMIT, 2002). Se også kapitel 6.

Vejsaltet spredes til det omgivende miljø enten ved overfladisk strømning, sprøjt ud i rabatten eller via vindbårne partikler. Spredningsvejene er illustreret på figur 3.8.

Vejsaltet udbringes enten som tørsaltning, fugtsaltning eller saltlage ved anvendelse af enten valsespreder, tallerkenspreder eller væskespreder, se Vejdirektoratet (1996). Ved fugtsaltning og saltlage reduceres saltforbruget sammenholdt med tørsaltning, og saltet forbliver i højere grad på vejoverfladen.

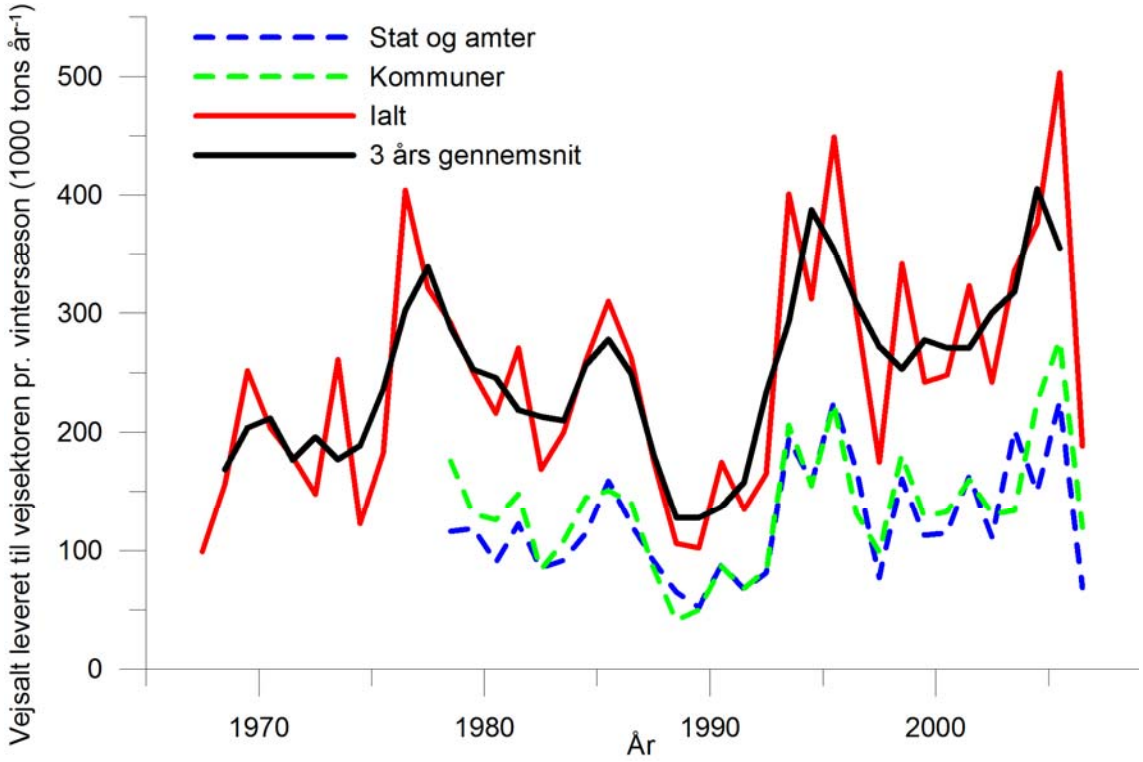


Figur 3.8: Spredningsveje for vejsalt til det omgivende miljø.

Ved udbringningen af vejsalt er der en risiko for, at en del af saltet utilsigtet falder udenfor vejbanen, hvilket især gør sig gældende for tørsaltning med tallerkenspreder, se Vejdirektoratet, 1996. Saltet, der ender på jordoverfladen, vil derefter enten opfanges af dræn/kloak eller fortsætte videre via infiltration til de øvre grundvandsmagasiner, se figur 3.8. For saltet, som falder på vejoverfladen, vil en del af saltet spredes til rabatten på grund af trafikken og vinden, hvilket afhænger af trafikintensitet og – hastighed. Ved hastigheder på 50-60 km/t findes de største saltmængder således inden for 2 m fra vejkanten, mens de største koncentrationer ved hastigheder på 80-100 km/t er 8 til 10 m fra vejkanten. På motorveje er der sporet salt helt ud til 40 m fra vejkanten, og ved disse store afstande bliver saltet ikke opfanget af vejkassedræn, og en større del af saltet må derfor formodes at være tilgængelig for infiltration til grundvandet (se Vejdirektoratet, 1996).

En anden transportvej for saltet sker via overfladeafstrømning, hvor vandet løber af vejen og opsamles i truget, dræn, grøft eller kloak, og herfra ledes til recipient eller rensningsanlæg. Der vil også være mulighed for infiltration til grundvandet fra eksempelvis grøften. Den sidste mulighed for transport af vejsalt fra vejene, som ikke er vist på figur 3.8, er via snerydning og evt. sneopsamling og senere deponering. Dette kan give anledning til infiltration af klorid til grundvandet ved deponeringspladsen.

I figur 3.9 ses den tidslige udvikling i total leverancer af vejsalt til det offentlige siden 1966. Der er en tendens til, at det gennemsnitlige forbrug er stigende, men med store årlige fluktuationer pga. variationer i vintervejret. Bemærk, at vejsaltet ikke nødvendigvis er brugt samme vintersæson, som det er leveret.



Figur 3.9: Totale leverancer af salt (natriumklorid) til stat, amter, og kommuner opgjort for vintersæsoner 1966/67 til 2006/07. Data leveret af Vejdirektoratet.

3.7 Driftstekniske aspekter i glatførebekæmpelsen

Glatførebekæmpelse foregår for at sikre både trafiksikkerheden og fremkommeligheden i vinterhalvåret. Det som overordnet skal vurderes i forbindelse med et stofs kvalitet og anvendelighed som tømiddel, er følgende hovedegenskaber:

- Effektivitet ved smeltning af is og sne
- Aggressivitet overfor konstruktioner og materiel
- Miljømæssige aspekter
- Økonomi (både drifts- og samfundsøkonomiske)
- Drifts- og maskintekniske aspekter

Som eksempel viser erfaringer fra Vejdirektoratet, at anvendelse af GPS og saltlagespredning er de vigtigste faktorer til at mindske forbruget af vejsalt. GPS-styring af sprederne sikrer, at der i dag saltes de korrekte steder, og at det kun sker én gang, mens aktiv brug af DMI's vejrprognoser ifht. præventiv saltning, forventes at kunne give yderligere >10 % reduktion i forbruget (pers. komm., Freddy Knudsen, Vejdirektoratet). Spredning af salt i opløst form (som lage) er den metode, som sikrer størst reduktion, da saltet ikke blæser væk for hurtigt, og man ikke skal udbringe så meget salt pr. m^2 pr. gang.

Det har hidtil været en meget vigtig forudsætning i glatførebekæmpelsen før eventuelt valg af alternative tømidler til natriumklorid, at den nuværende kvalitet af glatførebekæmpelses

ikke forringes. Det har yderligere betydet, at valg af alternative tømidler ikke ses som et rent miljømæssigt anliggende, men også tager hensyn til f.eks. de driftstekniske aspekter.

Figur 3.10: Udbringning af salt på veje foregår enten vha. salt på fast form og i stigende grad som en vandig opløsning af salt (lage) da sidstnævnte metode har en række fordele. Fotos: Vejdirektoratet.

3.8 Tømidler i glatførebekæmpelsen

I det følgende redegøres kort for de stoffer, som i dag kendes til glatførebekæmpelse, og hvis anvendelse er reguleret af en såkaldt vejregel (Vejregelrådet, 2006). Det drejer sig om kemiske stoffer, som kan grupperes som uorganiske salte, organiske salte af syrer og andre organiske forbindelser. Disse kaldes samlet for tømidler. En kort introduktion gives her for at belyse hvordan forskellige midler kan påvirke kloridudvaskningen til grundvandet.

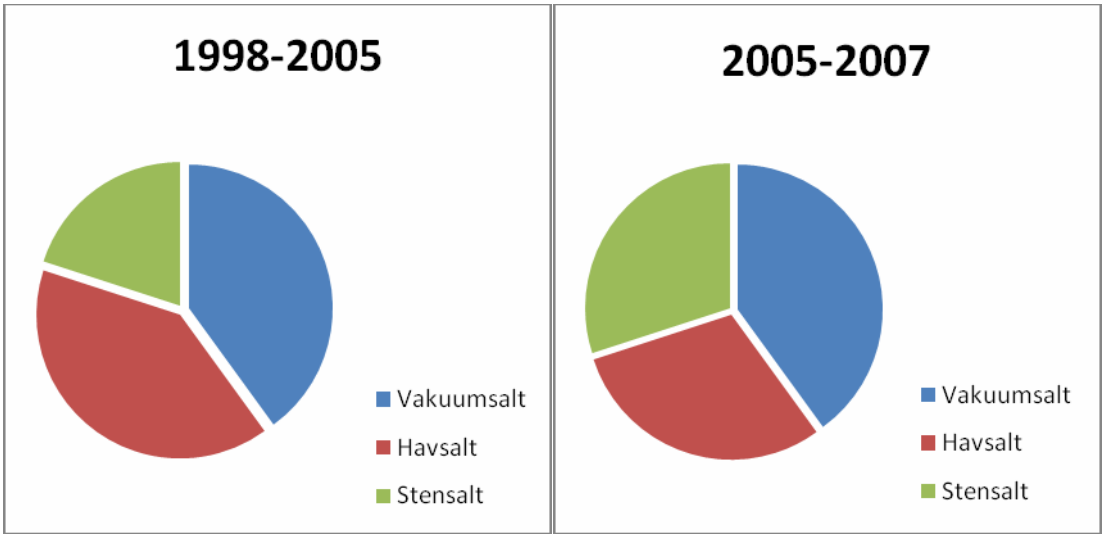
Der er tale om følgende midler og blandinger:

- Salte: natrium- (vejsalt), magnesium- og kaliumklorid
- Organiske forbindelser: kalcium-magnesium-acetat (CMA), andre acetat, formiater, urea, glykol
- Andre tømidler og blandinger: Emulsioner (salt-sirup), friktionsmidler (sand og grus)

Tømidlers basale egenskaber er at sænke vands frysepunkt for at fjerne is og sne. Effektiviteten af et tømiddel afhænger af en række kemiske egenskaber ved stoffet/blandingen som f.eks. fasediagram, smeltekapacitet, reaktionshastighed og vedhæftningsevne som ikke behandles her. Disse aspekter er udførligt beskrevet i Carl Bro (2001, 2003). For alle tømidler bør det bemærkes, at der tilsættes andre kemikalier for at forbedre afisnings- og udbringningsegenskaber som f.eks. klumpedannelse, fjernelse af luftgener, eller reduktion af korrosion. Op til 5 % kan være tilsætningsstoffer, som for hovedpartens vedkommende dog er producentafhængige og derfor ikke egnede til if. med generelle udredninger. Det bør bemærkes, at disse kan være miljømæssigt relevante som fx azotriazoler.

3.8.1 Salte

Salte kan udbringes både i tør fastform, som opfugtet fastform og som egentlige flydende opløsninger. I dag er natriumklorid det altovervejende tømiddel, der anvendes til veje i Danmark. Frysepunktet ligger maksimalt ved -21ºC ved en 23 % vand-salt blanding, men er normalt kun effektiv ned til en temperatur omkring -12ºC. Grunden til den store udbredelse skyldes, at vejsalt er billigt, og at det er let at udbringe. Desuden er der i de senere år forsket og udviklet meget i, hvordan udbringningen kan optimeres, vha. f.eks. bedre udstyr, lager og opfugtning. Ulemper for nærmiljøet som døde vejtræer er velkendt.



Figur 3.11. Oprindelsen af vejsalt anvendt på danske stats- og amtsveje siden 1998. Data er fra vejdirektoratet. Kommunernes og privates forbrug af vejsalt kendes ikke.

Magnesium- og kalium er andre salte, som kan bruges i stedet for natrium, men som kun anvendes i begrænset omfang. Begge har de dog klorid som den negativt ladede ion. De løser i nogen grad problemerne med vejtræerne, da ovennævnte positivt ladede ioner er plantenæringsstoffer, men ikke problemerne med klorid som også er giftigt for træer.

Vakuumsalt udgør ca. 40 % af det vejsalt, som anvendes i Danmark (figur 3.11). Vakuumsalt bruges til alt fra mad, fodertilskud til dyr og vejsaltning. Vakuumsalt stammer fra stensalt som udvindes ved at pumpe varmt vand ned i en salthorst, og derefter oppumpe en salt-vand lage. Dernæst bliver lagen kemisk renset og vandet koges væk i en trykkoger under vakuum. En del af vejsaltningen i dag foregår med inddampet havvand som importeres med skib (20-30 %), da dette bl.a. har en større kornstørrelse og bedre udbringningsegenskaber (Refshøj, 2005). Ligeledes udgør udgravet og nedknust stensalt fra tyske miner 30-40 % af det danske vejsaltsforbrug.

I figur 3.11 ses andelen af de forskellige typer salt i vejsalt estimeret af Vejdirektoratet ud fra indkøbte mængder gældende alene for nuværende statsveje og de tidligere amtsveje. Her skal bemærkes, at de forskellige typer vejsalt forventes at blive brugt over en årrække på alle vejstrækninger, da de har forskellige udspredningsegenskaber. Dette vides dog ikke med sikkerhed, da især nogle kommuner har/havde længere varende kontrakter med én leverandør, som kun leverer et produkt.

3.8.2 Organiske forbindelser, andre tømidler samt blandinger

Organiske syrer udbringes også som tømiddel i form af vandige opløsninger. De er biologisk nedbrydelige og miljøeffekterne betragtes overordnet som svage. Stofferne sælges i mange forskellige koncentrationer og under forskellige handelsnavne.

Forskellige opløsninger af den svage syre, eddikesyre (acetat) anvendes til afisning. Egenskaberne som tømiddel er lidt forskellig i forhold til natriumklorid. Især kalcium-magnesium-acetat (CMA) er fremhævet som et godt alternativ til natriumklorid. En anden gruppe af salte af svage organiske syrer er myresyre (format). Normalt lugter formater mere end salte af eddikesyre. Den biologiske nedbrydning af formater kræver mindre iltforbrug end tilsvarende acetat produkter og anses derfor for mindre miljøbelastende.

Urea er tømidler baseret på organisk bundet kvælstof. Urea anvendes i dag i f.eks. Sydtyskland og i meget begrænset omfang i visse danske lufthavne og togstationer, hvor korrosion er uønsket. Midlet er sandsynligvis ikke et reelt alternativ på større arealer i Danmark, da stoffet indeholder meget kvælstof, som i forvejen kan udgøre et miljøproblem.

Tømidler med glukol er baseret på langkædede kulhydrater og anvendes, hvor der slet ikke må være korrosion. I Danmark er det derfor især i lufthavnene, hvor der anvendes glykol til afisning af fly. Opløsninger af glykol virker klistrede hvilket begrænser deres anvendelse.

Der er de seneste år udført forsøg med blandinger af sirup (flydende sukker) og magnesiumklorid. En sådan blanding på fast-fugtig form sænker frysepunktet markant (til -65˚C). Der er p.t. forsøgt med blandinger med mellem 1 til >10 % sirup. Blandingen har den effekt, at den klistrer en smule, sådan at det hæfter bedre til vejen og med længere holdbarhed. Data tyder også på, at blandingen korroderer mindre end en tilsvarende ren natriumklorid opløsning. Desuden bindes vejstøv o.l., i forbindelse med især præventiv saltning. Hvis blandingen yderligere udlægges i god tid, før det bliver glat, forbedrer det trafiksikkerheden. Magnesium har ikke en negativ effekt for vejtræer som natrium. Miljømæssigt har det altså en lang række andre fordele. Hvor meget det kan reducere mængden af udbragt klorid er dog uklart, og det er sandsynligvis bedst egnet til præventiv saltning.

Grus og sand er de eneste midler i glatførebekæmpelsen, som ikke er kemiske tømidler, og som derfor ikke fjerner sne eller is, men kun forbedrer friktionen. De er tidligere hyppigt anvendt i Danmark, men brugen i glatførebekæmpelse er i dag meget begrænset i byerne, pga. en lang række æstetiske og praktiske problemer.

4. Adskillelse af kloridkilder

Utallige faktorer påvirker kloridkoncentrationer i grundvandet, og det kan være vanskeligt med sikkerhed at påvise en eventuel direkte årsagssammenhæng mellem forhøjet kloridindhold i grundvandet og en enkelt kilde som f.eks. vejsaltning (Olofsson, 1999; Panno m.fl., 2006a; Hjuler m.fl., 2007).

I dette kapitel gennemgås metoder, som kan bruges til en vurdering af kilderne til klorid i grundvandet. På baggrund af den eksisterende viden fra internationale og danske studier, gennemgås der en række tilgange, som sammenligner forhold mellem hovedbestanddele og sporstoffer samt anvender isotopanalyser som en vigtig del af klorids kildeopsporing. I kapitlet foretages der en dataanalyse, hvor de mest velegnede metoder udvælges i forhold til det eksisterende danske datagrundlag.

4.1 Datagrundlaget

Datagrundlaget for kapitel 4 og 5 er datasættet, som bruges til den årlige overvågningsrapport fra GEUS i 2008 under NOVANA. Datasættet er udtrukket fra databasen JUPITER den 7. oktober 2008 og kaldes herefter blot ”JUPITER datasættet”. Det er en fordel at anvende dette datasæt til beskrivelse af det danske grundvands indhold af klorid, da data på forhånd er kvalitetssikret og væsentlige hovedbestanddele allerede er behandlet (Thorling, 2009).

Beskrivelsen af grundvandets kloridindhold bygger således på JUPITER’s data fra alle aktive indtag fra grundvandsovervågningen, landovervågningen, boringskontrollen fra vandforsyningsboringer og fra gruppen ”andre boringer”, som er en restgruppe af bl.a. forskellige typer undersøgelsesboringer. Analyser fra kendte forurenede grunde og overvågning af punktkilder er udeladt.

Datasættet, som anvendes i kapitel 4 og 5, indeholder i alt 138.331 analyser af kloridindholdet i grundvandet. Kloridkoncentrationerne varierer fra mindre end 10 op til 146.000 mg/l, hvor de ældste analyser stammer fra 1890. Overordnet skønnes det, at der er en rimelig datadækning mht. kloridanalyser og øvrige hovedbestanddele, idet der er ca. 1 boring pr. 2 km^2, som dog ikke er jævnt fordelt over landet. Tætheden af analyser med sporstoffer er langt ringere.

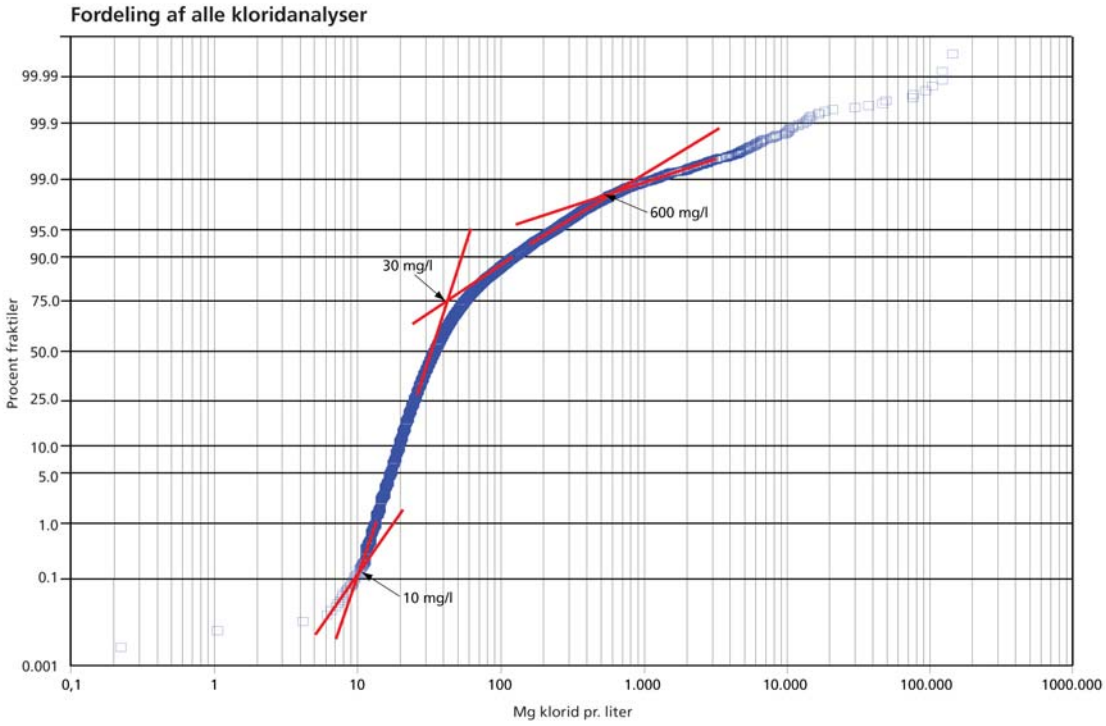
4.2 Kvalitet og behandling af data

I figur 4.1 ses sandsynlighedsfordelingen af det gennemsnitlige kloridindhold i 21.476 analyserede boringer. Figuren er en visualisering af de statistiske fraktiler, og viser den kumulative fordeling af de gennemsnitlige kloridkoncentrationer i grundvandet i Danmark, baseret på analyser fra de sidste 110 år. Dette er meget anvendeligt til at belyse størrelsen af naturlige baggrundsbidrag i grundvand, og derved også visualisere omfanget af andre kilder (populationer) til opløste ioner i grundvand (se f.eks. Panno m.fl., 2006b). Ved vurde-

ring af fordelingen af kloridindholdet i dansk grundvand kan følgende 4 geokemiske populationer identificeres som markeret på figur 4.1:

Population 1: < 10 mg klorid pr. liter
Population 2: 10-30 mg klorid pr. liter
Population 3: 30-600 mg klorid pr. liter
Population 4: >600 mg klorid pr. liter

Der findes dog også en population med lavere koncentrationer end population 1 (<10 mg/l), nemlig de 3 laveste analyseværdier, som frasorteres, da de sandsynligvis repræsenterer analytiske fejlmålinger. Ligeledes er det valgt at slå flere populationer sammen i population 4 (>600 mg/l).



Figur 4.1: Sandsynlighedsfordelingen af det gennemsnitlige kumulative kloridindhold (mg/l) i 21.476 grundvandsboringer analyseret i løbet af de sidste 110 år. Dataudtræk fra JUPITER fra 7. oktober 2008.

Inddelingen af data i geokemiske populationer er vigtig for den videre databehandling. De identificerede populationer er brugt til inddeling i relevante koncentrationsintervaller, som vil blive brugt i den efterfølgende databehandling og -præsentation, idet der er taget hensyn til de geokemiske populationer, grænseværdien på 250 mg/l for drikkevand og praktisk anvendelige opdelinger af intervallet 30-600 mg/l:

- ≤30 mg/l
- 30-75 mg/l
- 75-125 mg/l
- 125-250 mg/l
- 250-600 mg/l
- >600 mg/l

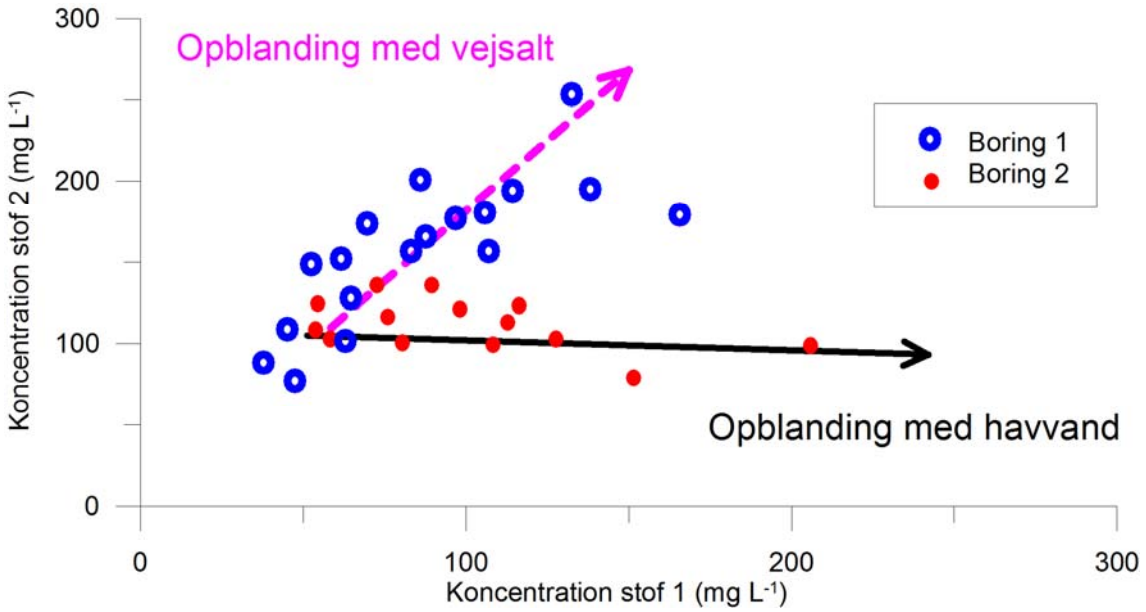
Ved plot imod dybden bruges både dybden til filterbunden og filtertoppen i det følgende, afhængigt af formålet med analyse. Tolkning af data fra lange filtre skal dog gøres med forsigtighed, når enten filterbunden eller filtertoppen anvendes, som et udtryk for filterdybden. Se mere i Hansen m.fl.(2009) om denne problemstilling.

Tabel 4.1: Beskrivende statistik for relevante sporstoffer og klorid fra JUPITER datasættet Dataudtræk fra JUPITER fra 7. oktober 2008.

Stof	Cl mg/l	F mg/l	Br µg/l	I µg/l	Sr µg/l	B µg/l
Antal analyser	21.476	2.994	3.446	789	2.502	2.139
Minimum	<1	<0,001	2	1,0	0,4	2
Maximum	146.000	4.600	11.460	1.220	51.000	2.400
Middelværdi	144	0,23	134	18	919	76
75 % kvartil	55	0,26	130	10	612	155
Median	34	0,18	92	5	310	84
25 % kvartil	25	0,10	66	3	190	20
Standard afvigelse	2.125	0,26	313	71	3.040	140

4.3 Det overordnede princip

Kilderne til klorid i grundvandet vil blive vurderet vha. grafiske præsentationer af forskellige kemiske stoffer eller forholdet mellem forskellige kemiske stoffer i det danske grundvand i forhold til et teoretisk indhold i kilderne (vejsalt, havvand, nedbør).



Figur 4.2: Teoretisk figur som viser baggrunden for den grafiske metode i denne udredning. Her vil en udvikling med stigende stofkoncentrationer, som er forårsaget af hhv. vakuumsalt fra vejsalt (boring 1) og marint residual- eller infiltrationsvand (boring 2), give anledning til forskellige udviklinger. Prøverne fra boringerne kan ses som enten en tidsserie eller en stigende dybde.

Den anvendte metode bygger udelukkende på en grafisk præsentation og vurdering af data, og er dermed ikke en statistisk metode. Metoden er tidligere anvendt af Howard &

Beck, 1993; Olofsson (1999) og Panno m.fl. (2006a; 2006b) under svenske og nordamerikansk forhold. Metoden kræver et betydeligt datasæt både i rum og tid. På den baggrund udvælges en række metoder, som bruges til analyse af det danske JUPITER datasættet.

I figur 4.2 er vist en teoretisk figur, som viser indholdet af stof 1 og 2 i grundvandet i boring 1 og 2. Forholdet mellem stof 1 og 2 er også kendt i vejsalt og havvand. På figuren er der tegnet en teoretisk stiplet linje for opblanding med vejsalt og en teoretisk linie for opblanding med havvand. Den grafiske præsentation af data i figur 4.2 indikerer at grundvandet i boring 1 er påvirket af vejsalt, mens grundvandet i boring 2 er påvirket af havvand. Datapunkterne for de 2 boringer kan f.eks. repræsentere en tidsserie eller forskellig dybde.

I tabel 4.2 er der vist nogle teoretiske forhold mellem kemiske stoffer, som indgår i hhv. havvand og vakuumsalt. Her ses, at visse sporstoffer har væsentlige forskellige indhold/forhold i hhv. vakuumsalt og i havvand. Dette forhold bruges i det følgende kapitel til visuelt at vise, hvordan forskellige stoffer, og forhold imellem dem, kan anvendes som indikatorer på forskellige kilder til klorid i grundvandet. I tabel 4.2 vises de teoretisk beregnede koncentrationer af en række sporstoffer, som vil forekomme som følge af en påvirkning fra enten oceanisk havvand eller vakuumsalt (upublicerede data fra Dansk Salt A/S). Til sammenligning kan medianindholdene i dansk grundvand ses i tabel 4.1.

Kun ca. 40 % af det i dag udspredte vejsalt er vakuumsalt (se figur 3.11 og kapitel 3.8). Derfor har nedsivende vejsalt ikke den fulde teoretiske koncentration/forhold af det stof, som vises som ”opblanding af vejsalt” eller ”100 % vakuumsalt” i figur 4.2. De øvrige salte som bruges på vejene – stensalt og havsalt – kan ikke adskilles fra regnvand vha. kemiske indikatorer.

Tabel 4.2: Teoretisk beregning af koncentrationer af en række stoffer i havvand og de samme koncentrationer, hvis det antages, at vakuumsalt (som udgør ca. 40 % af vejsaltsforbruget i Danmark) opblandes til den samme kloridkoncentration som havvand. Oceanisk saltvand efter Wright & Colling (1995). Vakuumsalts indhold af stofferne forventes at variere betragteligt.

Koncentration	Cl mg/l	F mg/l	Br µg/l	Sr µg/l	I µg/l	B µg/l
Havvand (salinitet på 35 ‰)	19.500	1,3	67.000	8.000	60	4.400
Vakuumsalt (teoretisk)	19.500	Ukendt	1.904	6	5	<3
Forhold vakuumsalt/saltvand	1:1	1:?	1:35.2	1:1.340	1:11	<1:1.440

4.4 Isotoper til kildeadskillelse

4.4.1 Isotoper

Isotop-baserede metoder kan være brugbare til at påvise årsagen til forøget kloridindhold i grundvandet. Forholdet mellem ilt-isotoperne $^{18}O/^{16}O$ kan bruges til at adskille moderne grundvand fra residual saltvand i f.eks. kalken (f.eks. Bonnesen m.fl. 2009). Udenlandske undersøgelser viser, at $\delta^{18}O$ kan bruges til kildeopsporing af salt mineralsk grundvand rela-

tivt til nyt fersk grundvand (Tesmer m.fl., 2007). Forholdet mellem $^{18}O/^{16}O$ er et godt værktøj til at differentiere mellem recent og residualt grundvand, idet indholdet af den stabile isotop ^{18}O i nedbøren afhænger af bl.a. temperaturen. Forholdet mellem ^{18}O og ^{16}O udtrykt som $\delta^{18}O$ - værdier er i størrelsesorden -8.5 ‰ for nedbøren i Nordvesteuropa (Larsen m.fl., 2006). Imod metoden taler dog, at isotop resultaterne kan være vanskelige at fortolke og er relativt dyre i analyseomkostninger. Se også figur 3.4 hvor ilts isotoper anvendes.

Strontium-isotoperne (^{87}Sr og ^{86}Sr) er tidligere med held blevet brugt til at påvise marint residualvand som årsagen til forøget kloridindhold på en kildeplads ved Århus (Jørgensen m.fl., 1995; Jørgensen m.fl., 1999). Det er også vist ved Skansehage, hvor Jørgensen m.fl. (2008) fandt, at strontium, klorid og $^{87}Sr/^{86}Sr$ tilfredsstillende kunne beregne opblanding mellem (recent) marint infiltrationvand, moderne fersk grundvand og marint residualvand. Imod $^{87}Sr/^{86}Sr$ forholdets anvendelse taler, at analyserne er relativt dyre og ikke udføres kommercielt. I forbindelse med årsagsudredninger for forøget kloridindhold på kildepladser må strontiumisotoperne således forventes at være et særdeles brugbart, om end kompliceret, redskab.

Den radioaktive kloridisotop ^{36}Cl kan bruges til at datere grundvandets alder, da en forøget produktion i atmosfæren fandt sted i forbindelse med atomprøvesprængningerne i 1950-erne og 1960-erne. I teorien kan ^{36}Cl derfor være en anvendelig tracer til at påvise, hvorvidt stigende kloridkoncentrationer skyldes overfladepåvirkning med forøget ^{36}Cl koncentration eller gammelt saltvand, hvor ^{36}Cl ikke er forøget. Under danske forhold fandt Alvardo m.fl. (2005) imidlertid, at der var store problemer med at anvende metoden. Indtil ny forskning viser bedre resultater, anbefales det, at denne isotop ikke anvendes som standard i forbindelse med f.eks. kildepladsudredninger.

Bromids stabile isotoper (^{79}Br og ^{81}Br) kan i teorien også anvendes som indikatorer, men endnu har ingen forsøgt dette i forbindelse med vejsaltning. Dog antyder studier i andre sammenhænge, at dette er en farbar vej (Eggenkamp & Coleman, 2009).

Anvendelsesmuligheder for isotoper til mulig kemisk differentiering af forskellige grundvandstyper diskuteres i bl.a. Olofsson (1999) og Alvardo m.fl. (2005).

4.5 Kemiske stoffer og forhold til kildeadskillelse

4.5.1 Bor

Bor er i sedimenter især knyttet til lermineralerne illitit og smectit. Det findes primært som borsyre - $B(OH)_3^0$ - ved de neutrale til basiske pH-værdier, som er fremherskende i grundvandet. Da bor er et vigtigt plantenæringsstof, tilsættes det også til kunstgødning. Jordvand under landbrugsjord er derfor beriget på bor relativt til naturområder. Indholdet i grundvand er omtrent det samme som i havvand, nemlig omkring 4-5 mg/l (tabel 4.1). Bor tilføres jorden med nedbøren og atmosfærisk tørdeposition, og især kystnære områder modtager højere deposition. Se tabel 4.1 for koncentrationer i dansk grundvand.

Det har ikke været muligt at få kendskab til et eksakt borindhold i vejsalt eller salt fra salthorstene, hvorfra der indvindes, pga. detektionsgrænser på metoden. Dog vides det, at være mindre end 0,1 mg/kg (Dansk Salt A/S, upublicerede data), hvorfor forholdet mellem bor i vejsalt og i havvand er estimeret til at være større end 1:1.440. Der kan derfor forventes, at bor i grundvand kan være en god indikator på kloridkilder.

4.5.2 Bromid

Bromid er et halid som klorid og jodid, og opfører sig derfor konservativt og indgår kun i begrænset grad i kemiske og biologiske reaktioner. Koncentrationen af bromid i oceanisk havvand er omkring 67 mg/l (tabel 4.1), mens den beregnede koncentration i Østersøen er omkring 19 mg/l. Yderligere er både bromid og klorid stabile i forbindelse med inddampningen af havvand, hvorfor deres indbyrdes forhold er relativt konstant selv i dybe naturlige aflejringer (Millero, 2002).

Bromid har tidligere været tilsat som smøremiddel til blyholdigt benzin i form af ethylen dibromid ($C_2H_4Br_2$). Dette er et potentielt problem for brugen af bromid-klorid forholdet, da vejvand tidligere har været beriget med bromid (Vengosh & Pankratov, 1998) og dermed vil få klorid-bromidforhold, som er lavere, end hvis vejsalt var den eneste bromidkilde på vejen. Der er dog ikke fundet litteratur, som har belyst, hvorvidt bromid fra disse kilder påvirker brugen af bromid som indikator på vejsaltspåvirkning. Hvordan det har påvirket bromidindholdet i afstrømmende vejvand i Danmark vides ikke, da undersøgelser af vejvands indhold af klorid og bromid mangles både før og nu.

Bromid indgår i en række pesticider. F.eks. må kartoffel- og kløvermarker nedvisnes med herbicider med aktivstoffet diquat dibromid (Miljøstyrelsen, 2008). Der udspredes herved ca. 13-14 tons bromid årligt i Danmark, hvilket resulterer i forøgede koncentrationer i nydannet grundvand under disse marker i intervallet 0,11 til 0,44 mg bromid pr. liter. Til sammenligning er median koncentrationen i dansk grundvand på 0,092 mg/l, og 75 % fraktilen på 0,130 mg/l (tabel 4.1). Der er altså tale om maksimale koncentrationsstigninger på 2-5 gange.

4.5.3 Bromid-klorid

Forholdet imellem klorid og bromid har været brugt i del studier til at adskille kilder til salt i grundvand (f.eks. Panno m.fl., 2006a; Vengosh & Pankratov, 1998; Freeman; 2007). Klorid-bromid vægt forholdet i havvand er på 289:1 (data fra Wright & Colling, 1995).

Freeman (2007) fandt, at opløsning af halit fra stensalt (næsten rent NaCl) kunne give grundvand med så høje klorid-bromidforhold som 20.000:1. Omvendt kan selve haliten have meget lave klorid-bromidforhold og Freeman (2007) fandt også, at salt i Det Døde Hav har et forhold på kun 41:1. Koncentrationen af bromid i inddampet stensalt er højere end i havvand, hvilket betyder at marint residual vand fra indhave, f.eks. som det danske i Kridttiden, har klorid-bromid-forhold ned til 37-200:1, da fordampning fra fortidens varmere

klima har beriget det tilbageværende havvand på bromid (Whittemore, 1988). Opløsning af halit fra salthorste giver derimod et endnu højere klorid-bromidforhold end havvands, da NaBr er relativt tungere opløseligt end NaCl (Vengosh & Pankratov, 1998). Vakuumsalt har da også et væsentlig højere klorid-bromidforhold (>1.000:1) af denne årsag.

I nydannet grundvand fra dansk landbrugsjord er der i gennemsnit på seks veldokumenterede marker med normal landbrugspraksis fundet et klorid-bromidforhold i intervallet 140:1 til 190:1 (upublicerede data fra VAP marker; C. Kjær, GEUS, pers komm.). Normal dansk landbrugspraksis giver således anledning til klorid-bromidforhold som er sammenlignelige med de forhold, som vil opstå som følge af regnvand og f.eks. indtrængende marint residualvand. Dette passer altså overens med det forhold at landbrugsjord modtager ekstra bromid fra pesticider o.l. (se ovenfor), hvorfor klorid-bromidforholdet er lavere end i havvand.

Vakuumsalt, der bruges på danske veje, har et klorid-bromidforhold på ca. 10.100:1 (upublicerede data fra Dansk Salt A/S). Da vakuumsalt de seneste 10 år har udgjort 40 % af vejsaltet vil dette i gennemsnit give et klorid-bromidforhold på 5.600:1. Danske undersøgelser af klorid-bromidforhold i vejvand er ikke fundet i litteraturgennemgangen, men vand fra udenlandske veje og kloakker har meget varierende klorid-bromidforhold (f.eks. Davis m.fl., 1998). Dette må tilskrives en lang række kilder til både klorid og bromid i det menneskeskabte miljø. Variationen i klorid-bromidforholdet i vejsalt (vejsaltskilderne gennemgås i afsnit 3.8) kan altså være fra <100:1 til 20.000:1.

Da vakuumsalt har udgjort en rimelig konstant andel af vejsaltsforbruget (se figur 3.11) de seneste år, er det derfor valgt at bruge klorid-bromidforholdet i vakuumsalt på 10.100 til grafisk at illustrere en maksimal – omend teoretisk – vejsaltspåvirkning.

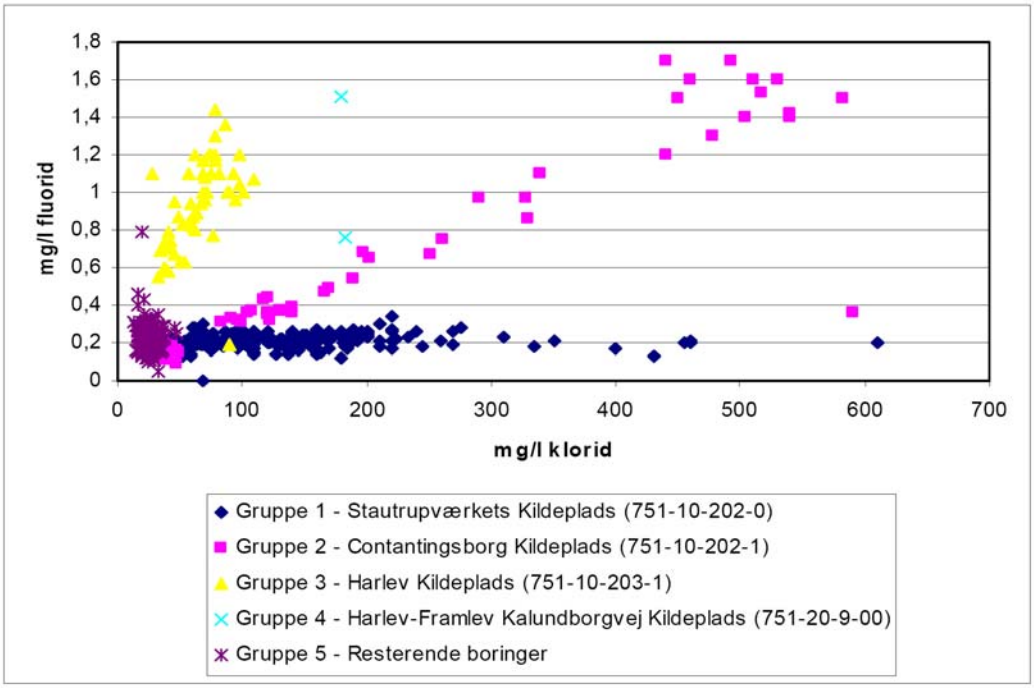
4.5.4 Fluorid

Indholdet af fluorid i grundvandet skyldes en kombination af ældre stagnerende vand og påvirkning fra karbonataflejringer som fluorit og apatit. Tidligere danske undersøgelser har således vist en klar sammenhæng mellem visse horisonter i Skrivekridtet og grundvandets indhold af fluorid (Knudsen, 1997; Larsen m.fl., 2006). Fluoridindholdet i grundvandet er imidlertid stærkt afhængig af det geologiske magasin, herunder især, hvor lang tid vandet har været i kontakt med kalk (Knudsen, 1997).

I forbindelse med grundvandskortlægning i Brabranddalen ved Århus har Århus Amt (2006) anvendt klorid og fluorid til at vurdere kilderne til klorid i grundvandet (se figur 4.3). Undersøgelsen viste bl.a., at grundvandet fra området (gruppe 1) med et lavt fluoridindhold og et højt kloridindhold samt en omvendt ionbytning muligvis kunne være påvirket af diffusion fra det underliggende saltholdige grundvand eller vejsaltning. Fluorid kunne altså her anvendes som en indikator på ældre grundvand i kontakt med prækvartære magasiner.

Ligeledes var fluorid den eneste brugbare indikator til at adskille kilder til salt i grundvand i Canada (Howard & Beck, 1993). Dette skyldes, at de salte grundvandsmagasiner her også

er rigere på calcium end andre magasiner, hvorfor fluorid udfældes som fluorit (CaF_2). I Canada opstår derved en korrelation mellem lave fluoridindhold og høje kloridindhold.



Figur 4.3: Sammenhængen mellem grundvandets indhold af fluorid og klorid i vandforsyningsboringer i Brabranddalen ved Århus. Fra Århus Amt (2006).

4.5.5 Jod

Atmosfærisk deposition af jod er den vigtigste kilde til jod i grundvand, men kilder og processer for jod i dansk jordbund og grundvand er meget dårligt belyst. Tidligere studier har dog fundet, at høje jodkoncentrationer især er forårsaget af marine sedimenter (Pedersen m.fl., 1999). Joden menes her primært at være organisk bundet, ligesom den atmosfæriske deposition sandsynligvis i nogen grad sker som organiske jodforbindelser (Pedersen m.fl., 2002). Howard & Beck (1993) fandt i et Canadisk studie, at jod er specielt brugbar til at differentiere mellem salt grundvand forårsaget af vejsalt og mineralsk saltvand. Dog er der kun ringe forskel på indholdet af jord i havvand og i dansk vejsalt (tabel 4.2).

4.5.6 Litium

Litium findes som sporstof i mineraler og frigives til grundvandet ved forvitring. Litium i grundvand har således været anvendt til at identificere en række kloridkilder og til at adskille grundvandstyper ved at anvende litium-klorid forholdet (se Olofsson, 1999).

4.5.7 Strontium

Strontium har igennem en årrække været anvendt som indikator på saltkilder i geologiske sammenhænge (f.eks. Jørgensen & Holm, 1995; 1999). Dens anvendelse i forbindelse med antropogene kilder er mindre velundersøgt i litteraturen. Når forholdene mellem de forskellige stoffer i vejsalt og havvand sammenlignes (se tabel 4.1), er det påfaldende, at strontium ikke er mere anvendt i litteraturen, da havvand og vakuumsalt har markant forskellige indhold (forhold på 1.340). Dette kan dog skyldes, at strontium i høj grad er knyttet til karbonataflejringer, og derfor er et ikke-konservativt stof. Så de naturlige processer er derfor sandsynligvis mere væsentlige end evt. bidrag fra menneskeskabte kilder.

4.5.8 Cyanid

Til vejsalt må antiklumpningsmiddel i form af kaliumferrocyanid ($K_4Fe(CN)_6$) eller natriumferrocyanid ($Na_4Fe(CN)_6$) tilsættes, hvor henholdsvis kalium eller natrium anvendes som kation og kompleksbundet cyanid som anion. Antiklumpningsmidlerne er i Danmark anvendt siden 1970'erne. Tidligere måtte der maximalt tilsættes 200 mg/kg (regnet som $K_4Fe(CN)_6$), men fra 2006 må maksimalt 150 mg/kg kaliumferrocyanid eller 120 mg/kg natriumferrocyanid tilsættes. Cyanid er letopløseligt i vand, men kan nedbrydes og genudfældes afhængig af pH og redox-forhold. Da cyanid er det eneste miljøfremmede stof i vejsalt, kan det derfor evt. anvendes som en indikator. Dog kan cyanid også komme fra gamle gasværker og galvaniseringsanlæg.

Hvis det i et teoretisk regneeksempel antages, at transporten af cyanid og klorid er konservativ, samt at der til 1 kg vejsalt er tilsat 150 mg antiklumpningsmiddel, vil der med disse forudsætninger blive et konstant klorid-cyanid forhold i nydannet grundvand med vejsalt.

Tabel 4.2: Teoretisk beregnede koncentrationer i grundvand af cyanid ved forskellige tilsatte koncentrationer af klorid fra vejsalt. Fra Vestegnens Vandsamarbejde (2009a).

Klorid (mg/l)	50	100	300	1000	2000
Cyanid(μg/l)	5,2	10,5	31,4	104,8	209,6

Koncentrationerne af cyanid ved denne simple beregning er alle over detektionsgrænsen (5 µg cyanid/l), så teoretisk kan man finde cyanid i forbindelse med fladeforurening af grundvandet fra vejsalt. I litteraturen er cyanid sammen med forhøjet kloridindhold i grundvand dog kun fundet i umiddelbar nærhed af saltlagre og snedepoter (Kjeldsen & Christensen, 1996). Kun i forbindelse med kraftige kloridkilder, som f.eks. vejsaltdepoter, kan cyanid derfor forventes at kunne bruges som indikator.

Dette er f.eks. tilfældet ved Sydfalster Kommune, hvor et saltdepot var placeret mindre end 10 meter fra en vandværksboring. (DGU nr.: 242.179). Her blev der ved en undersøgelse fundet forhøjede indhold af natrium, klorid og cyanid i det terrænnære grundvand, hvor de højeste koncentrationer af klorid overskrider kvalitetskrav med 16-23 gange, mens cyanid blev fundet i en koncentration, der overskrider kvalitetskravet for drikkevand med 22 gange (se Storstrøms Amt, 2004).

4.5.9 Hårdhed

Hårdheden er defineret som vandets indhold af magnesium og calcium, som stammer fra især kalkmineraler. Ionbytning (se næste afsnit) påvirker vandets hårdhed, idet magnesium og calcium ionbytter med natrium.

Også forholdet mellem koncentrationerne af calcium og magnesium kan anvendes som indikator på kloridpåvirkning fra veje. Baggrunden er, at vakuumsalt (udgør ca. 40 % af vejsaltet) har et gennemsnitligt calcium-magnesiumforhold på 29 (varierer fra 18 til 66, upublicerede data), mens det i oceanisk havvand og Østersøen er ca. 0,32 (Olofsson, 1999). I grundvand i ligevægt med kalk (calcit og aragonit) er det mellem 2.3 og 3.3, mens det er 1.5 til 2.3 i grundvand i ligevægt med dolomit (Hseu, 1963). Der kan derfor i teorien antages, at calcium-magnesium forholdet kan anvendes som indikator på kilder til salt i grundvand.

I Sverige er det imidlertid vist af Olofsson (1999), at calcium-magnesium forholdet ikke generelt kunne bruges til at adskille vejsalt fra andre kloridkilder i grundvandet. Grunden hertil er, at der er for mange andre geologiske og geokemiske processer, som influerer på forholdet calcium-magnesium. Blomqvist m.fl. (2001) finder i Sydsverige, at grundvandet her bliver langt hårdere som følge af vejsaltning, og kan bruges som en indikator på, at der sker en forøget forsaltning på overfladen. Hjuler m.fl. (2007) anvender også ændringer i hårdheden af vandet som en indikator på påvirkning fra vejsaltning.

4.5.10 Ionbytning

Ionbytning er en proces, hvor der sker udveksling af ioner mellem grundvandet og sedimentet, idet ionerne adsorberes eller desorberes fra overfladekomplekser på lermineralerne. Ionbytning finder sted hvis der er uligevægt mellem indholdet af salte i grundvandet og de salte som sidder adsorberet på grundvandssedimentet.

Ionbytningsgraden forstås som forholdet mellem natrium og klorid i milliækvivalenter.

Følgende definitioner anvendes:

Omvendt ionbyttet grundvand: $\frac{[Na]}{[Cl]} < 0.75$

$$Na^{+} + 1/2Ca{-}X_2 \rightarrow Na{-}X + 1/2Ca^{2+}$$

Ionbyttet grundvand: $\frac{[Na]}{[Cl]} > 1.25$

$$1/2Ca^{2+} + Na{-}X_2 \rightarrow 1/2Ca{-}X + Na^{+}$$

Hvor $-X_2$ er symbolet på en udbytningsplads på sedimentet i grundvandsmagasinet.

Havvands natrium-kloridforhold er på 0.86.

Omvendt ionbyttet grundvand finder sted ved stigende natriumkoncentrationer, dvs. når salt vand infiltrer et mere ferskt grundvandssediment. Omvendt ionbyttet grundvand ses ved

saltvandsindtrænging eller diffusion fra det underliggende salte grundvand f.eks. forceret af en kraftig indvinding. Omvendt ionbyttet grundvand kan også opstå ved infiltation af natriumrigt vand fra jordoverfalden, som f.eks. kan skyldes vejsaltning eller andre saltkilder ved jordoverfladen.

Ionbyttet grundvand ses ved faldende kalium/natrium koncentrationer, fx når fersk vand infiltrer et grundvandssediment af marin oprindelse. Det antages at et forhold mellem natrium og klorid på 0,75-1,25 repræsenterer *ikke ionbyttet grundvand* med ligevægt i saltindholdet mellem grundvand og sedimentet, idet der medtages et usikkerhedsinterval på ±0,25 omkring 1.

4.6 Aldersdatering af grundvandet

Datering i relation til kildeopsporing er en oplagt metode til at udrede, hvorvidt stigende kloridkoncentrationer skyldes ungt grundvand (indikerer vejsalt eller anden menneskeskabt kilde) eller marint vand, som må forventes at være ældre. Dog skal det her bemærkes, at blot få promille indblanding af rent havvand medfører uacceptable høje kloridkoncentrationer, men kun meget begrænsede ændringer i aldre som fremkommet med f.eks. CFC-metoden.

Der er i litteraturgennemgangen ikke fundet studier, hvor egentlige dateringsmetoder som f.eks. SF_6 eller kulstof-14 er brugt i forbindelse med udredninger af årsagen til forhøjet kloridindhold i grundvand. Studier i andre forbindelser har dog vist, at f.eks. kulstof-14 metoden kan anvendes til en aldersdatering af grundvand, om end der er stor usikkerhed forbundet hermed. Også tritium (^3H) dateringsmetoden har været anvendt i forbindelse med undersøgelser af årsagen til forhøjet saltindhold i grundvand (Olofsson, 1999), men hidtil ikke i Danmark. Se mere om metoderne i Hinsby m.fl., 2001 samt Panno m.fl., 2006b.

Der kan også anvendes mere indirekte metoder til vurdering af grundvandets alder på baggrund af redoxparametre som nitrat og sulfat. Se f.eks. Hansen m.fl. (2009) hvor dette gennemgås yderligere. I dette projekt er det valgt at anvende CFC dateringer som findes i JUPITER, og som vil blive præsenteret i kapitel 5.

4.7 Resultater

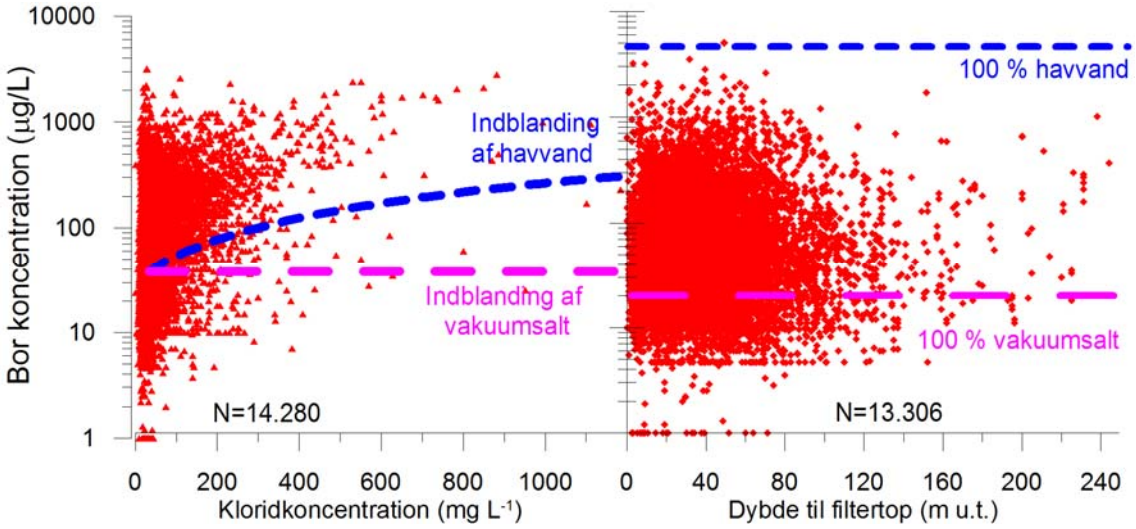
På baggrund af kapitel 4.5 er følgende kemiske stoffer og forhold udvalgt til analyse af kilderne til klorid i det danske grundvand og vil blive gennemgået nedenfor:

- Bor
- Bromid
- Klorid-bromid
- Fluorid
- Jod
- Strontium
- Hårdhed
- Ionbytning

Isotoper er i nærværende udredning ikke forsøgt anvendt til at adskille kilderne til klorid i grundvand, da der desværre ikke findes data med relevante isotoper i JUPITER databasen. Lithiumindhold i grundvand er desværre heller ikke fundet i JUPITER datasættet, det er heller ikke kendt i vejsalt og er derfor ikke medtaget. Kun i forbindelse med kraftige klorid-kilder, som f.eks. vejsaltdepoter, kan cyanid forventes at kunne bruges som indikator, og dette stof er derfor også fravalgt i de efterfølgende analyser.

4.7.1 Bor

Figur 4.4 viser, hvordan koncentrationen af bor ændrer sig med dybden i dansk grundvand.



Figur 4.4: Koncentrationen af bor vist som funktion af hhv. kloridindhold og dybden til filterbunden i alle analyser med samhørende værdier fra JUPITER datasættet. N = antal målinger.

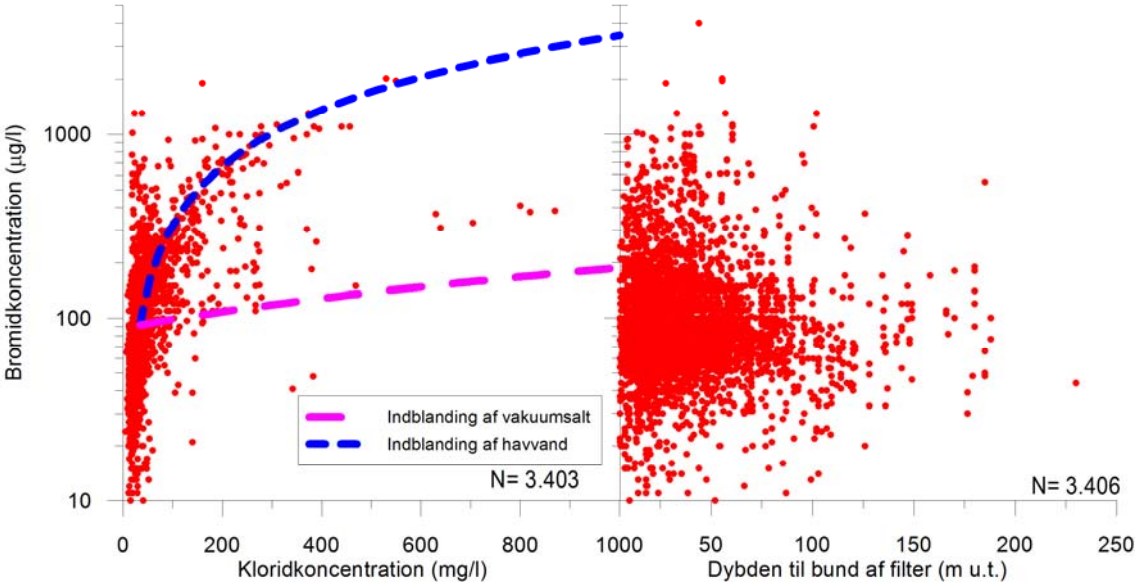
Figur 4.4 viser, at borindholdet naturligt varierer 3 dekader, og ændringer forårsaget af ind-trængende havand/vejsalt overskygges af ionbytning og andre påvirkninger, som f.eks. atmosfæriske deposition, kontakt med marine sedimenter, m.v. Der ses ingen entydige tendenser til, at borkoncentrationen stiger med dybere filtre. Borkoncentrationen har dog en tendens til at stige som funktion af kloridkoncentrationen og en række analyser følger i gro-ve træk det som forventes hvis havvand indblandes. Dette kan skyldes stigende kontakt til marine sedimenter, som har en større andel af bor adsorberet end ikke-marine sedimenter (Blume m.fl., 2002). Hvorvidt bor kan anvendes i forbindelse med en udredning af årsagen til forhøjet kloridindhold på en kildeplads er uvist. Der er også begrænsede internationale erfaringer med bor som indikator (Olofsson, 1999).

4.7.2 Bromid

I figur 4.5 ses, hvordan bromidkoncentrationen i grundvand afhænger af kloridindholdet. Der er her en tendens til, at et stigende kloridindhold er fulgt af et stigende bromidindhold, der svarer til opblanding med havvand (blå linje). Der ses dog også en række analyser,

som omvendt bærer tegn på opblanding med bromidfattigt, men kloridrigt vand. Dette svarer til opblanding med vejsalt (vakuumsalt).

Udviklingen med dybden i figur 4.5 viser, at bromidindholdet ikke entydigt stiger eller falder med dybden. Der er altså ingen indikationer på, at bromid tilføres eller fjernes med geokemiske processer i undergrunden. Antagelsen om at bromid som forventet er et konservativt stof i undergrunden kan altså bekræftes.



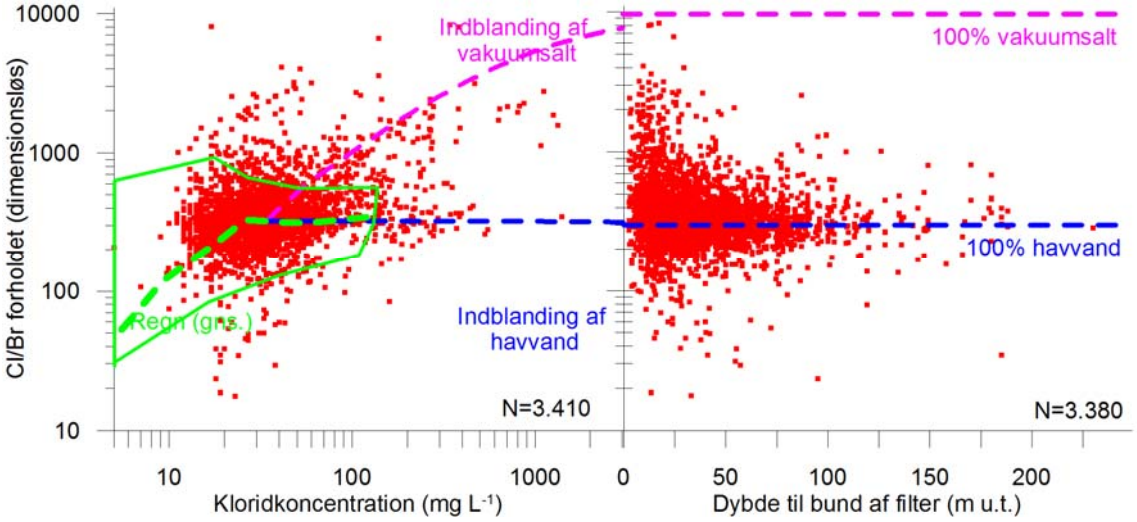
Figur 4.5: Koncentrationen af bromid vist som funktion af hhv. kloridindhold og dybden til filterbunden i alle analyser med samhørende bromid og klorid værdier fra JUPITER datasættet. Begge typer opblandinger er vist med udgangspunkt i medianværdien for bromid og klorid i dansk grundvand. "Indblanding af vakuumsalt" viser den maksimale ændring ved 100 % vakuumsalts indblanding.

4.7.3 Bromid og klorid: Estimering af en indikation på vejsalt

I figur 4.6 er opblandinger med både havvand og vakuumsalt vist med udgangspunkt i medianværdien for dansk grundvand. Linjerne for opblanding viser derfor ikke 1) den variation i klorid-bromidforholdet, som må forventes at findes i hhv. vejsalt og marint residual vand, og 2) de forskellige klorid-bromidforhold grundvandet kan have inden opblanding. Klorid-bromidforholdet i grundvandet varierer betydeligt, men ikke desto mindre indikerer data i figur 4.6, at høje klorid-bromidforhold skyldes en påvirkning fra overfladen, da klorid-bromidforholdet tilnærmer sig havvands med dybden (se også figur 4.13). Klorid-bromidforholdet er altså bedre end bromid imod klorid, til visuelt at klarlægge evt. sammenhænge i et datamateriale.

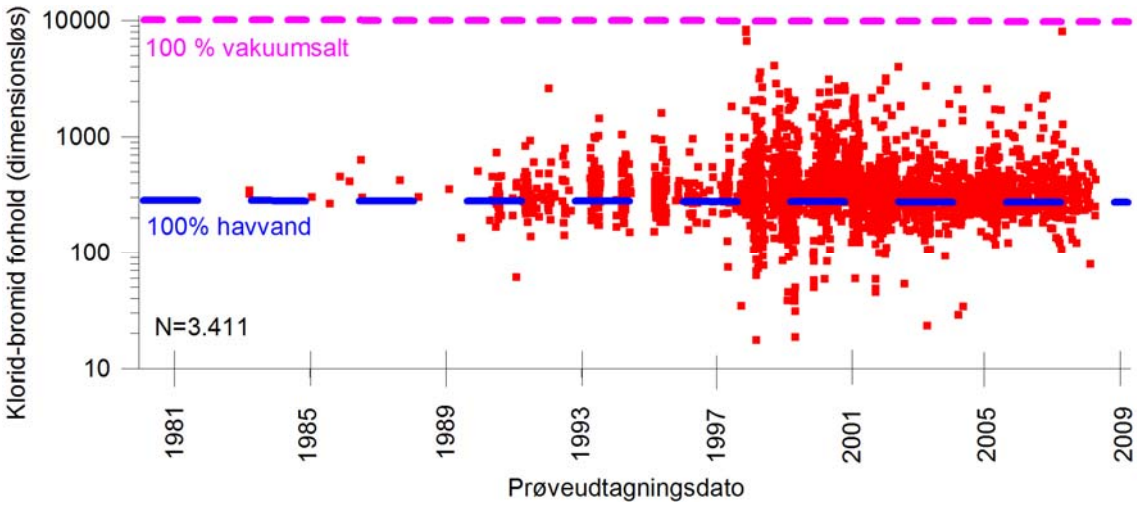
Det er for vakuumsalt-indblandingslinjerne i alle de følgende figurerne antaget, at der er tale om vakuumsalt fra den danske forekomst, der udvindes af Dansk Salt A/S. Hvis der derimod er tale om stensalt fra de tyske salthorste, viser data i Tesmer m.fl. (2007), at forholdet mellem bromid og klorid her i gennemsnit er ca. 2.800 (variation 1.000 til 5.500) og dermed lavere end det danskproducerede vejsalt med et gennemsnitligt forhold på ca. 10.100 (variation 9.400-10.800). Der er dog kun indsat én linje, som er et maksimalt estimat for klorid-bromidforholdet i dansk vejsalt. Hvis der beregnes et gennemsnit på bag-

grund af vejsaltsforbruget i dag (figur 3.11), hvor vakuumsalt udgør 40 % af vejsaltsforbruget, vil vand fra danske veje have et gennemsnitlig klorid-bromidforhold på ca. 5.600.



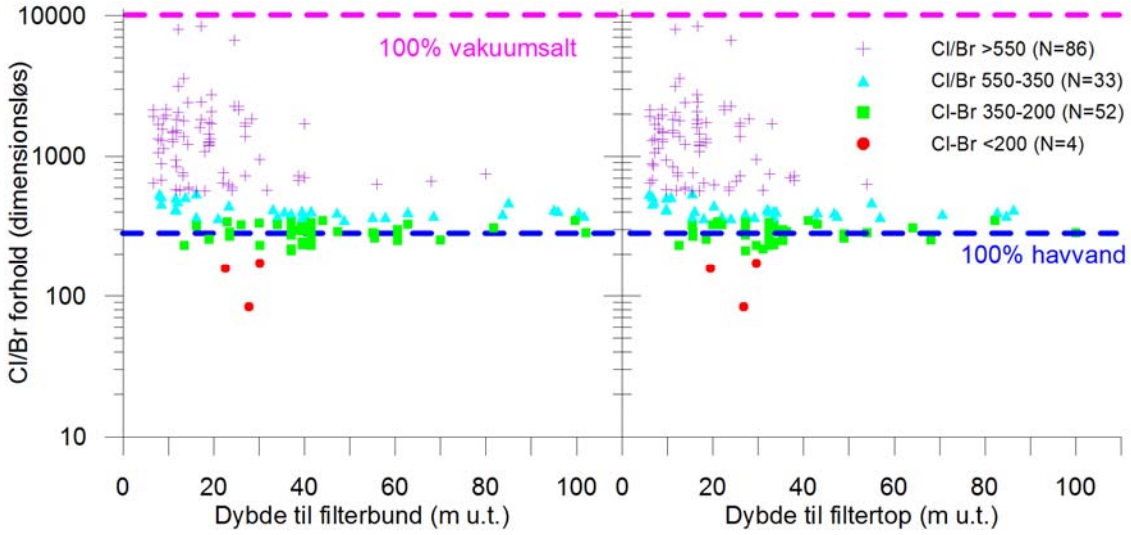
Figur 4.6: Forholdet imellem klorid og bromid (mg/l imod mg/l) vist som funktion af hhv. kloridkoncentrationen og dybde til bunden af filteret for alle samhørende analyser i JUPITER datasættet. Den naturlige variation samt gennemsnit i regnvand på verdensplan er vist (data fra Davis m.fl., 1998) med grønt. Seks analyser udenfor klorid-bromidintervallet vist på x-aksen er udeladt, da de antages at være fejlanalyser.

I figur 4.7 ses klorid-bromidforhold som funktion af prøveudtagningsdatoen. Her ses, at det først for alvor er siden 1990-erne, at der er blevet udført bromidanalyser af dansk grundvand. Dette hænger sandsynligvis sammen med, at bromid indgår i analyseprogrammet for den nationale grundvandsovervågning (GRUMO) siden ca. 1990. I hele perioden, men især siden 1998, er der er tegn på, at grundvand kan være påvirket af vejsalt da vandprøver har klorid-bromidforhold >550 (se forklaring på det valgte forhold nedenfor). Hvorvidt forskelle i analytiske metoder, det ændrede prøvetagningsprogram, eller alene ændringer i grundvandets indhold af bromid i gennem tiden påvirker spredningen vides ikke.



Figur 4.7: Forholdet imellem klorid og bromid (mg/l imod mg/l) som funktion af prøveudtagningsdatoen i alle samhørende analyser i JUPITER datasættet.

I figur 4.8 ses forholdet mellem klorid og bromid vist som funktion af dybden til hhv. filterbund og –top, men kun for analyser som indeholder >125 mg klorid pr. liter. Dette viser, at der er en meget markant tendens til, at analyser med forhøjet kloridindhold og et klorid-bromidforhold, som nærmere sig vakuumsalt, udelukkende findes i indtag, som findes tæt under terræn. Omvendt ses, at et klorid-bromidforhold omkring havvandsniveau findes både dybt og terrænnært. Den valgte inddeling med klorid-bromidforhold >550 som indikator for vejsalts påvirkning er god indikator på påvirkning fra overfladen. De fire analyser, som har klorid-bromidforhold <200, findes også relativt terrænært, og dette kan evt. skyldes forurening med bromid (se foregående afsnit om bromid). Generelt må analyser med klorid-bromidforhold mellem 200 og 550 således antages overvejende ikke at være påvirket af andre saltkilder end stensalt/havvand.

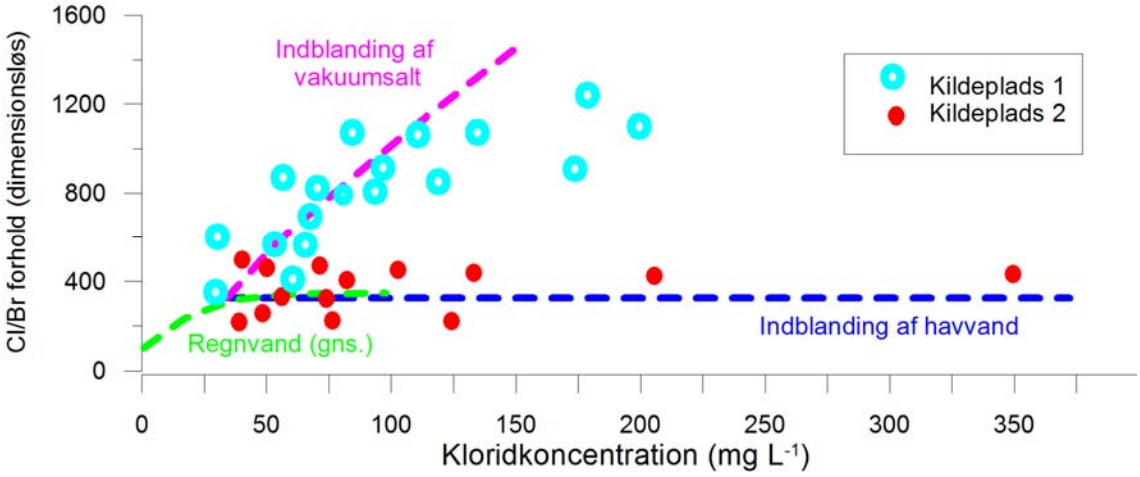


Figur 4.8: Forholdet mellem klorid og bromid (mg/l imod mg/l) vist som funktion af dybden til hhv. filterbund og -top for alle analyser, som har >125 mg/l klorid. Farver er tilføjet for at fremhæve især grupper omkring havvand (Klorid-bromidforhold på 289) samt indblanding af vakuumsalt (Klorid-bromidforhold på ca. 10.100).

For at belyse klorid-bromidforholdets anvendelighed, er alle boringer med >125 mg/l klorid og klorid-bromidforhold på >550 gennemgået for at se, hvor de geografisk ligger, samt undersøgt for tegn på menneskelig forurenende aktivitet (se appendiks A). Forholdet på 550 er valgt efter en manuel gennemgang af alle boringer med bromidanalyser og faldende klorid-bromidforhold, hvor der over forholdet på 550 udelukkende blev fundet boringer med tegn på menneskelig aktivitet. Gennemgangen viser, at alle grundvandsprøver >125 mg/l klorid og klorid-bromidforhold >550 er fra boringer, som findes nær større veje eller under større byer. Der er yderligere en større del af boringerne, som er påvirket af olierester, fenoler og pesticider som tegn på overfladepåvirkning. Samtidig viser Appendiks A tydeligt, at også omvendt ionbytning (natrium-kloridforhold <0,75) er en god indikator på saltpåvirkning (se også afsnit 5.3). Her ses, at ingen af analyserne har ionbytning >1, og at langt hovedparten har et forhold <0,75.

Denne gennemgang understøtter altså, at klorid-bromidforholdet er en robust indikator på påvirkning af grundvandet fra overfladen. Figur 4.9 illustrerer hvordan klorid-bromidforholdet bedst udnyttes.

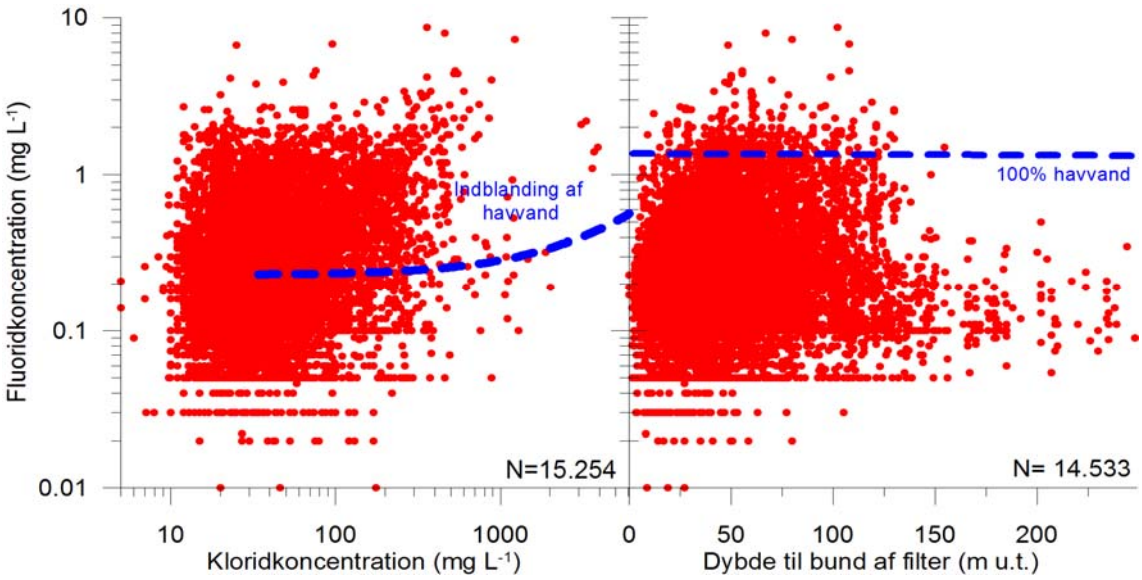
Pilene i figur 4.9 kan enten ses som en udvikling af klorid-bromidforholdet og kloridindholdet med dybden eller med tiden. Bemærk, at observationer af udvikling i tiden er at foretrække, og strømningsvejene for vejvandet bør være kendte. Ved en årsagsudredning på f.eks. en kildeplads bør ionbytning samt klorid-bromidforholdet altid anvendes i sammenhæng med en mere grundig gennemgang af de øvrige vandkemiske parametre.



Figur 4.9: Teoretisk figur som viser udviklingen i klorid-bromidforholdet, der forventes med en stigende kloridkoncentration eller stigende dybde, som er forårsaget af hhv. vejsaltning, hvor vakuumsalt udgør ca. 40 % af vejsaltet (kildeplads 1) og marint residual- eller infiltrationsvand (kildeplads 2). Regnvands gennemsnitlige klorid-bromidforhold er vist på verdensplan (efter Davis m.fl., 1998), da denne ikke er kendt i Danmark.

4.7.4 Fluorid

Figur 4.10 viser, at der ikke er en entydig sammenhæng mellem fluorid og klorid, og der heller ikke er tendenser til, at nogle prøver følger kurven af indblanding af havvand. Der ses kun en vis tendens til, at prøver fra dybder større end ca. 120 m har et lavt fluorid indhold, hvilket tilskrives, at disse filterdybder overvejende findes i Jylland i ikke-kalkmagasiner.



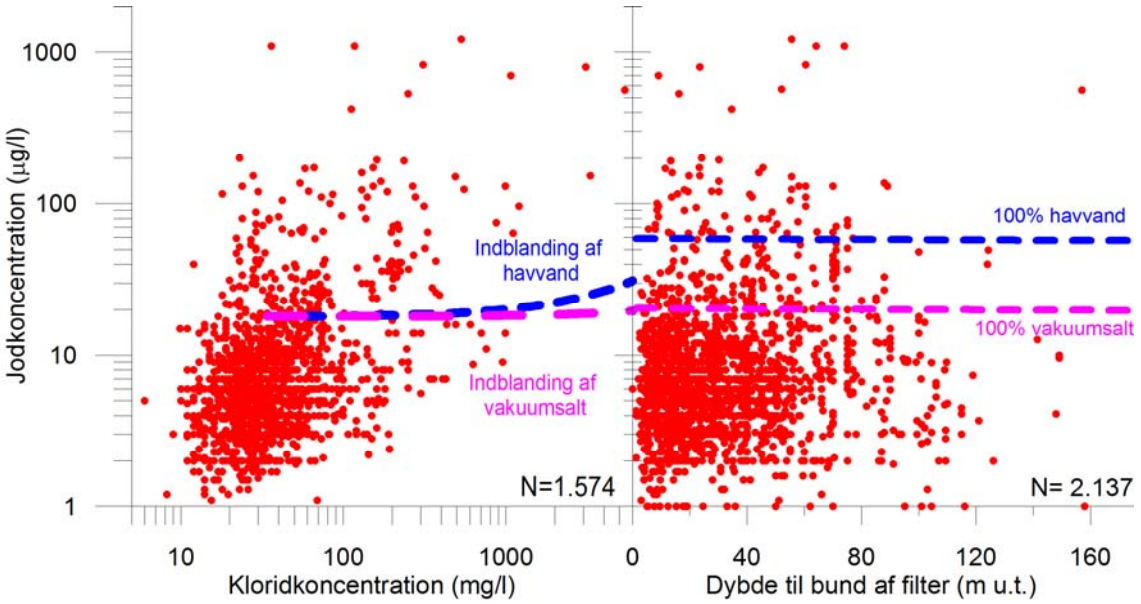
Figur 4.10: Forholdet mellem fluorid og klorid vist som funktion af hhv. kloridkoncentrationen og dybden til filterbunden for alle vandprøver i JUPITER datasættet med samhørende værdier. Seneste analyseresultat er anvendt.

Fluorid kan altså som udgangspunkt ikke anvendes som en entydig indikator på årsager til forhøjede saltindhold i grundvand. Fluorid kan dog bruges til at identificere ældre vand fra kalkmagasiner fra andre grundvandstyper, og har dermed sin berettigelse i forbindelse med f.eks. en kildepladsudredning (se afsnit 4.6).

4.7.5 Jod

I figur 4.11 ses, at der er en vis sammenhæng mellem jodid og klorid, men der ses ingen entydige udviklinger med enten kloridkoncentrationen eller dybden. Pedersen m.fl.'s (1999) konklusion, at jod i grundvand stammer fra marine sedimenter, kan altså ikke umiddelbart bekræftes med nærværende analyse. Det ses yderligere i figur 4.11, at langt hovedparten af analyserne stammer fra boringer, som er <75 m dybe, og at der ikke er entydige sammenhænge mellem jodkoncentrationen og dybden.

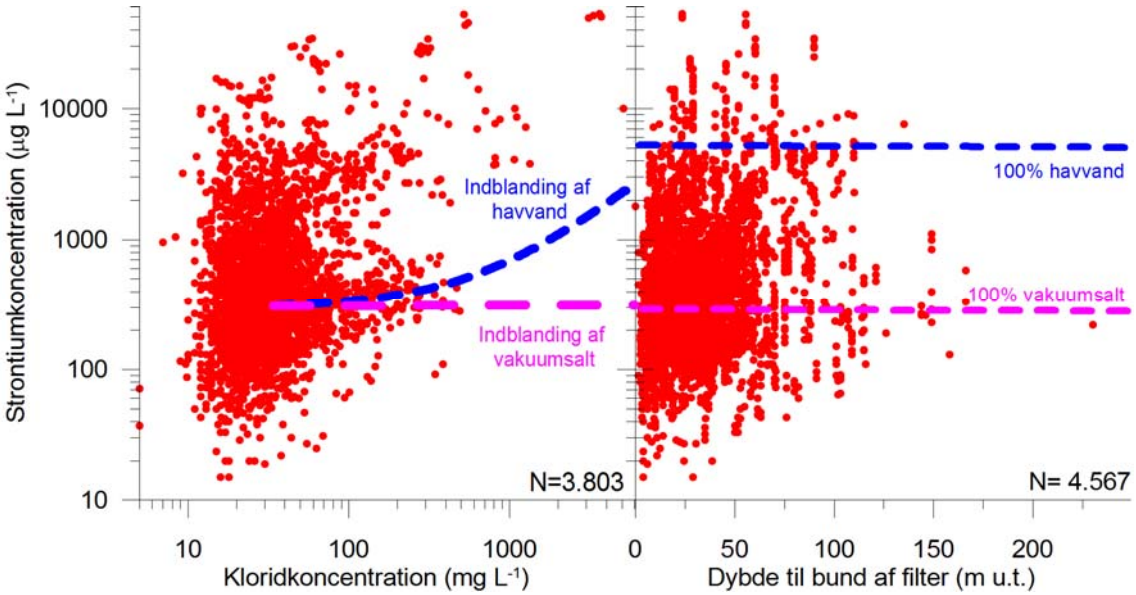
Jod er primært analyseret i forbindelse med grundvandsovervågningsoplandene (GRUMO), og en lang række af analyserne er mere end 10 år gamle. Data kan dermed være af svingende kvalitet pga. den vanskelige analyse for jod i vand ved lave koncentrationer, samt at jod let fordamper ved lave pH værdier. Jod fra JUPITER er således ikke umiddelbart anvendelig if. med en landsdækkende udredning af kilder til klorid i grundvandet.



Figur 4.11: Koncentrationen af jod vist som funktion af kloridkoncentrationen samt dybden til filterbunden for alle vandprøver i JUPITER datasættet med samhørende værdier.

4.7.6 Strontium

Indholdet af strontium i figur 4.12 viser, at der overordnet ikke er en sammenhæng mellem klorid- og strontiumindhold, ligesom der heller ikke er entydige udviklinger med dybden. Dette skyldes, at strontium i grundvand er tæt knyttet til især kontakt med kalkmagasiner. Derfor vil strontium vanskeligt kunne bruges til visuelt at identificere kilder til klorid i grundvand i et landsdækkende datasæt, da der skal kloridkoncentrationer på mere end 1.000 mg/l til, før havvand og vejsalt visuelt vil adskilles. Dog er der (se afsnit 4.6) gode erfaringer med at bruge strontium til udredninger af kloridkilder i mindre områder og på kildepladser.

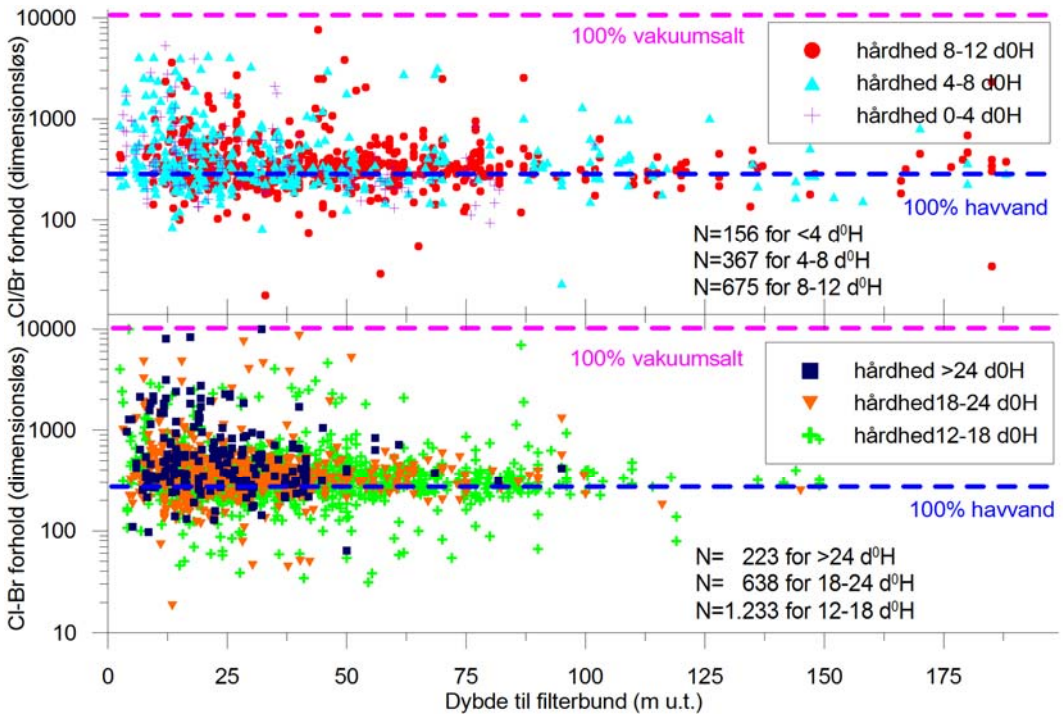


Figur 4.12: Koncentrationen af strontium vist som funktion af hhv. klorid og dybden til filterbunden i alle analyser med samhørende værdier fra JUPITER datasættet. Begge typer opblandinger er vist med udgangspunkt i medianværdien for strontium i dansk grundvand.

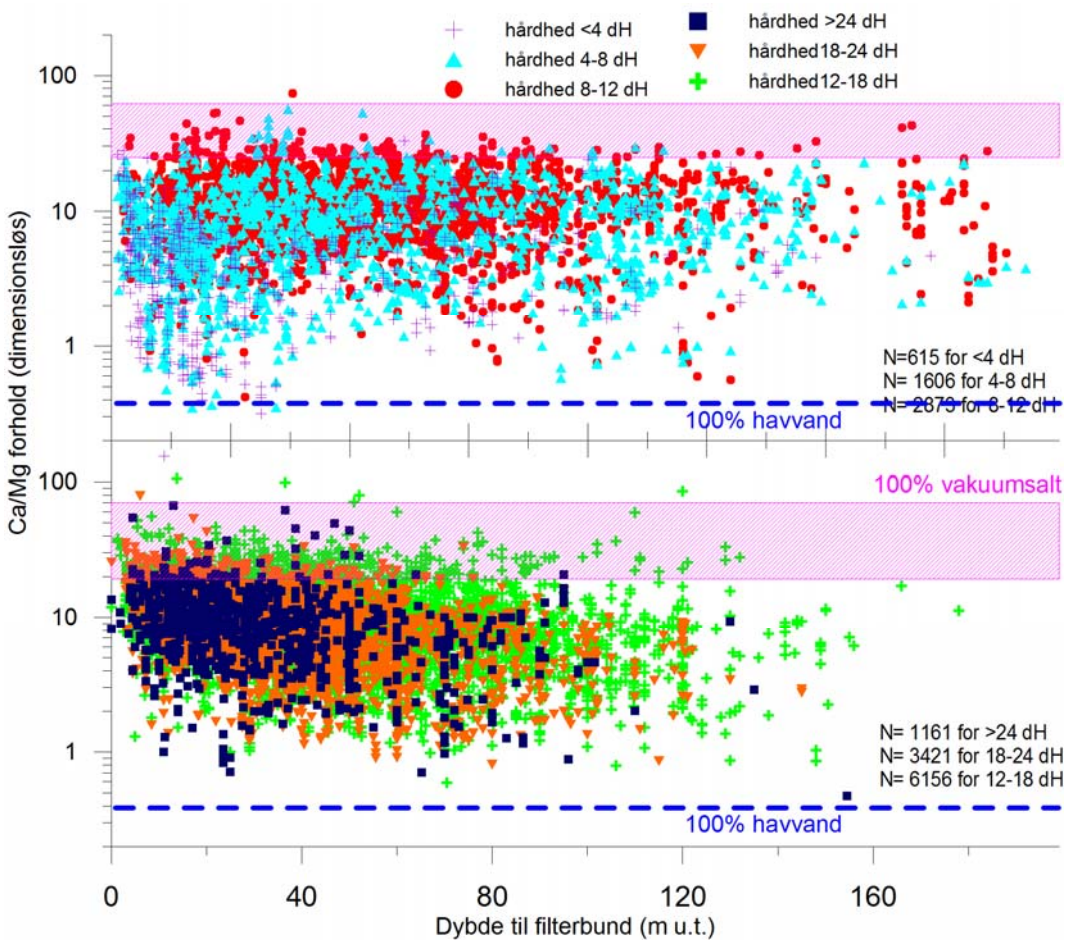
4.7.7 Hårdhed

I det følgende vises en række figurer med vandprøvers totale hårdhed (calcium + magnesiumindholdet), som er en indikator for mængden af opløst kalk, og som kan påvirkes af natrium fra vejsalt, ved at grundvandets hårdhed stiger som følge af ionbytning.

I figur 4.13 vises en tydelig tendens til, at klorid-bromidforholdet vil nærme sig havvands klorid-bromidforhold med dybden (se også figur 4.6). Dette ses som et tegn på, at der ikke er en entydig tendens til, at vandprøver med høj hårdhed også er de prøver, som har det højeste klorid-bromidforhold. Det tyder på, at en høj hårdhed i sig selv ikke er ensbetydende med saltpåvirkning. Omvendt er en stigende hårdhed samtidig med et stigende kloridindhold et tegn på, at der sker en forsaltning af et ferskt sediment pga. ionbytning. Det ses også, at bløde vandtyper (<12 d^0H) kan findes dybere end de hårdere. Dette tilskrives, at de dybere boringer fortrinsvis findes i sandmagasiner i Jylland uden kontakt til kalkmagasiner.

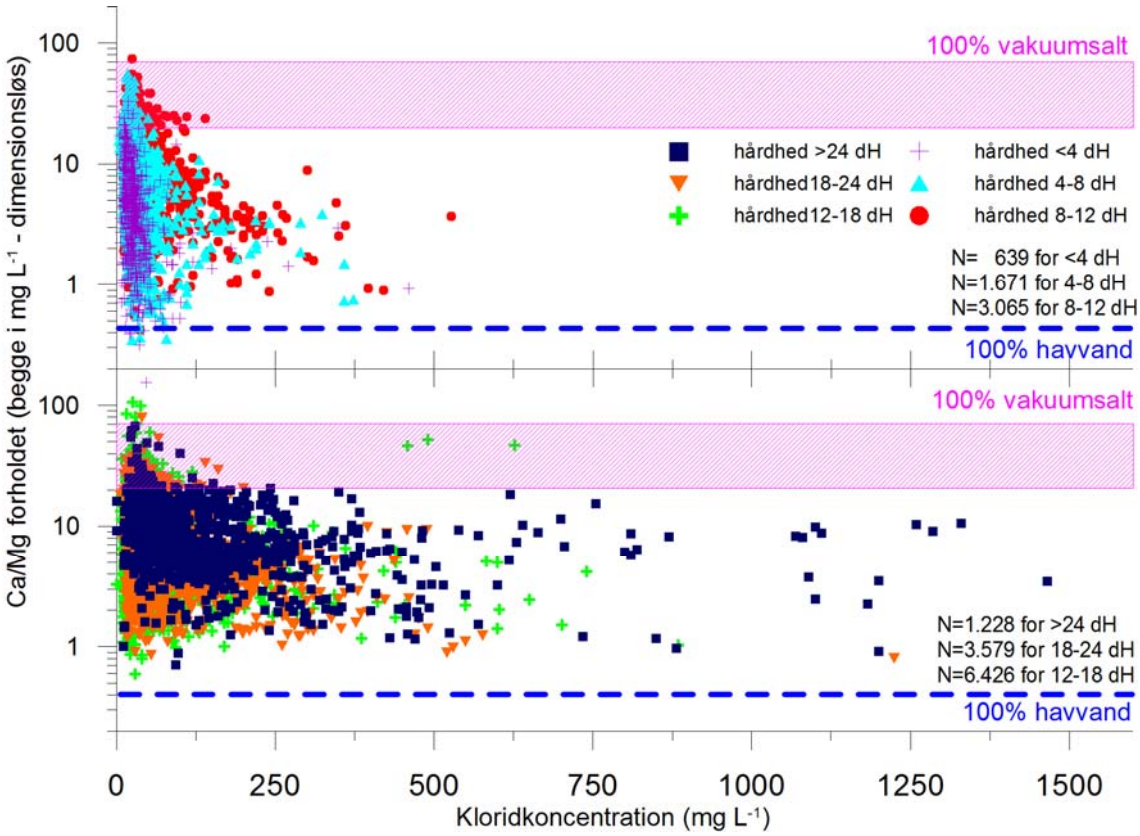


Figur 4.13: Klorid-bromidforholdet (mg/l imod mg/l) som funktion af dybde til filterbund og med vandets hårdhed (dºH) vist for vandprøver i JUPITER med samhørende værdier.



Figur 4.14: Magnesium-calciumforholdet som funktion af dybden til filterbunden i alle analyser med samhørende værdier i JUPITER datasættet. Hårdhederne er delt i to figurer for bedre at illustrere deres fordelinger.

Figurerne 4.14 og 4.15 indikerer, at calcium-magnesiumforholdet vanskeligt kan anvendes som indikator på årsager til forhøjet kloridindhold på et geologisk set komplekst datasæt, da calcium-magnesiumforholdet hverken med dybden eller stigende kloridkoncentration tilnærmer sig de to teoretiske beregnede forhold fra hhv. vakuumsalt og havvand. Derimod tyder det på, at calcium-magnesiumforholdet er styret af mineralogien i grundvandsmagasinerne, således der i kalkmagasiner (høje totalhårdheder) kan opløses en lidt større andel af magnesiumkarbonat (dolomit), hvilket trækker calcium-magnesiumforholdet ned imod ca. 1 til 2.



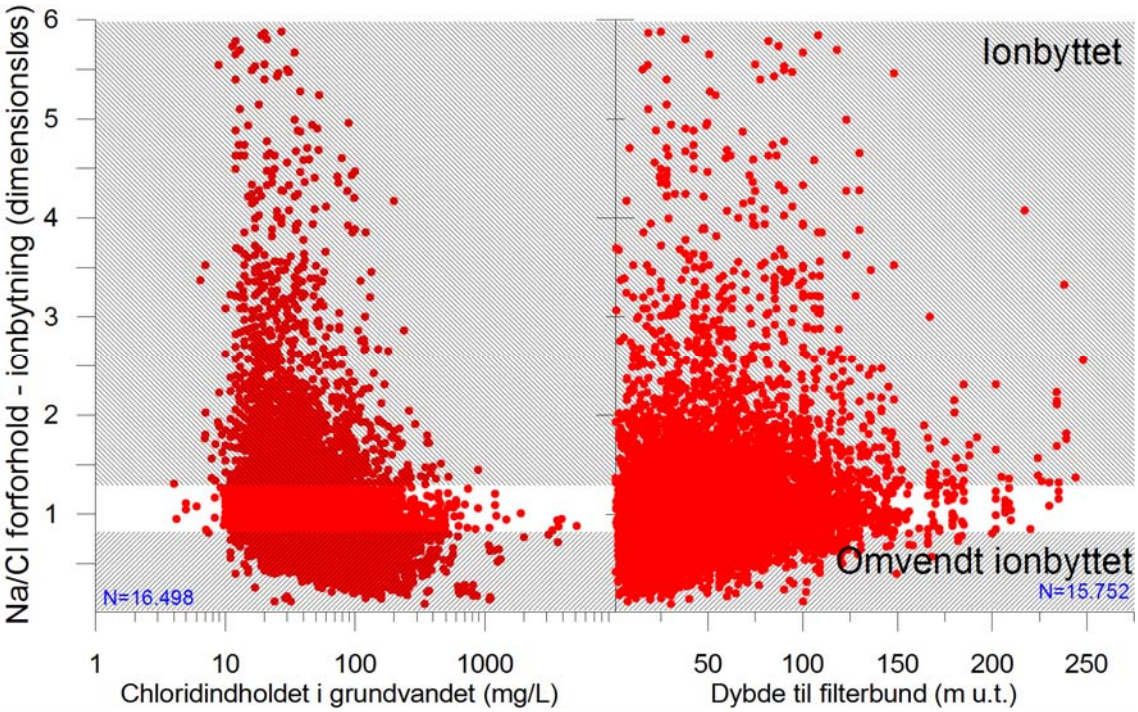
Figur 4.15: Calcium-magnesiumforholdet (mg/l imod mg/l) som funktion af kloridkoncentrationen i alle analyser med samhørende værdier i JUPITER.

Forholdet mellem calcium og magnesium er således kun anvendelige som saltindikator på kilderpladser, hvor der samtidig er geologiske forskelle i de magasiner, som grundvandet har passeret.

4.7.8 Ionbytning

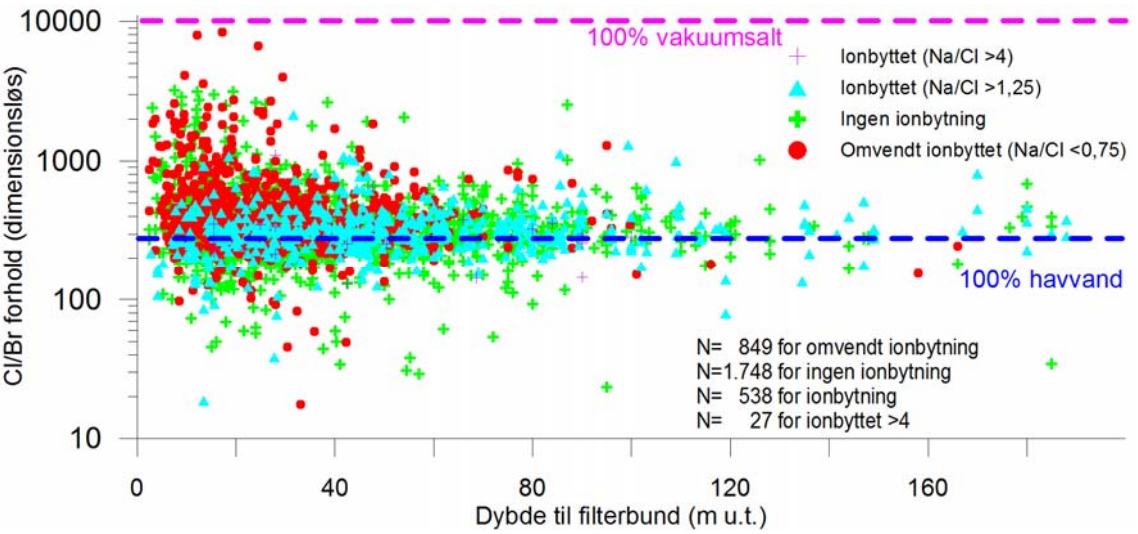
Ved at sammenligne ionbytningen som funktion af dybden til filterbunden og ionbytning som funktion af kloridindholdet (figur 4.16) ses det generelle træk, at højere kloridindhold

medfører en højere grad af omvendt ionbytning, som forventet ud fra teorien, da omvendt ionbytning er tegn på forsaltning af et i forvejen ferskt grundvandsmagasin. Se også ovenstående afsnit 4.7 om "klorid-bromid: estimering af en indikator på vejsalt".

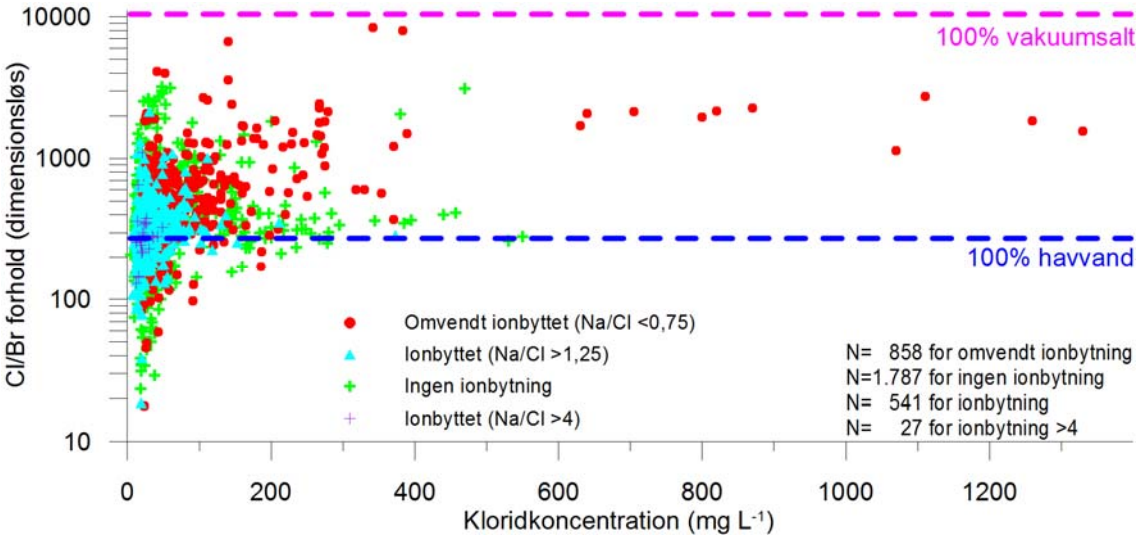


Figur 4.16: Ionbytning (mol/l imod mol/l) vist som funktion af kloridkoncentrationen samt dybden til filterbunden for alle vandprøver i JUPITER datasættet med samhørende værdier. <0.1 ‰ af analyserne har en ionbytning på >5 og antages at være fejlmålinger.

En omvendt ionbytning kan være et tegn på, at der trænger grundvand med forhøjet kloridkoncentration ind i magasinet. Dette er derfor en indikator på, at et grundvandsmagasin bliver mere salt. Årsagen til forsaltningen kan søges vha. klorid-bromidforholdet (se ovenfor). Det bemærkes i figur 4.16, at der på dybder >100 m u.t. sjældent ses omvendt ionbytning. Dette kan skyldes, at der i disse dybder næsten udelukkende sker opferskning af i grundvandsmagasiner, mens saltvandsindtrængning primært sker tættere på overfladen.



Figur 4.17: Klorid-bromidforholdet (mg/l imod mg/l) vist som funktion af dybden til filterbund og grupperet efter ionbytningen for alle vandprøver i JUPITER datasættet med samhørende værdier.



Figur 4.18: Klorid-bromidforholdet (mg/l imod mg/l) vist som funktion kloridkoncentrationen og grupperet efter ionbytningen for alle vandprøver i JUPITER datasættet med samhørende værdier.

Ionbytningen vist mod hhv. dybde og kloridindhold som funktion af klorid-bromidforholdet i figurerne 4.17 og 4.18 er god til at udrede de tendenser, som allerede er diskuteret ved foregående klorid-bromidforholdsfigurer. Figurerne 4.17-4.18 viser således yderligere, at prøver med omvendt ionbytning primært findes i overfladenære boringer, dvs. at forsaltningsprocessen primært sker overfladenært og ikke dybere ned, som man skulle forvente, hvis det var marint vand, der var årsagen. Omvendt er de dybere boringer (>50 m u.t.). tydeligvis generelt ikke ionbyttet, men følger derimod det klorid-bromidforhold som regnvand og havvand har. Samtidig ses en klar tendens til, at klorid-bromidforholdet i havvand (ca. 300:1) kun i nogen grad kan genfindes i de analyser, som har stærkt forhøjede kloridindhold (>250 mg/l). Ionbyttet vand derimod findes altovervejende inden for et mindre interval af klorid-bromidforholdet, der ligger omkring regn-/havvand.

Grundvandet i mange overfladenære filtre er omvendt ionbyttet, hvilket indikerer, at kloridkilder ved jordoverfladen (vejsalt, gødning i landbruget, etc, se tabel 3.1) påvirker grundvandets kvalitet. Samtidig er det bemærkelsesværdigt, at omvendt ionbytning ikke er mere udbredt i de dybere filtre som følge af f.eks. saltvandsindtrængning.

4.8 Konklusion

Borindholdet i dansk grundvand kan som udgangspunkt forventes at være brugbart som indikator af kloridkilderne. Dog viser sammenhængen mellem bor og klorid, at bor vanskeligt kan bruges som indikator på indblanding af, eller kontakt med marine aflejringer.

Tilsammen tyder bromiddataene på, at der fra overfladen nedsiver vand med meget forskellige bromidkoncentrationer, mens udviklinger med især dybden og til dels stigende kloridindhold bedre kan tilskrives indblanding af havvand (dvs. både recent eller residual).

Tilsvarende viser klorid-bromidforholdet, at der selv ved lave koncentrationer ses en væsentlig forskel mellem klorid fra "naturligt" hav-/regnvand og klorid fra veje/byer. Der er dog en række forhold omkring menneskeskabte kilder til bromid som gør, at klorid-bromidforholdet i grundvand skal tolkes med forsigtighed. Herunder at bromid tilsyneladende tidligere har været et forurenende stof fra veje o.l., da bromid var tilsat blyholdigt benzin.

Fluorid har vist sig at være en god indikator på kloridkilder i forbindelse med kildepladsudredninger. I det landsdækkende datasæt er eventuelle årsagssammenhænge mellem klorid- og fluoridindholdene overskygget af andre processer end salt grundvand.

Da jodindholdet i havvand og vejsalt har det samme relative forhold, og udvikling med stigende kloridindhold samt den ringe sammenhæng med dybde og kloridindhold (figur 4.8), kan det konstateres, at kildeopsporing vha. jod alene må forventes at være vanskelig under danske forhold. Dog er viden om jods opførsel i dansk grundvand meget begrænset.

Strontium, og især dets isotopforhold, har i kildepladsundersøgelser vist sig at være pålidelige indikatorer på årsagen til forhøjet saltindhold. I nærværende landsdækkende analyse har denne parameter ikke kunnet adskille saltkilder, men på lokalt niveau har den givetvis sin berettigelse som indikator.

Forholdet mellem magnesium og calcium er en indikator, som kun kan anvendes i begrænsede områder til at adskille kloridkilder, og her kun som et supplement til andre indikatorer. Omvendt kan stigende total hårdhed af grundvandet på f.eks. en kildeplads eller boring, bruges som en indikator på stigende kloridpåvirkning. Dette forudsætter, at alle kilder til forsuring af grundvandet har været uændrede. I praksis kan forøget hårdhed derfor ikke bruges alene som indikator på årsagen til en saltpåvirkning.

Dataanalysen af JUPITER datasættet viste, at klorid-bromidforholdet er velegnet som indikator på kloridkilden uanset øvrige geologiske og geokemiske forhold. Dog tyder litteraturen og ovenstående gennemgang på, at klorid-bromidforholdet ikke kan bruges ukritisk og alene til at adskille årsager til forøgede kloridindhold i grundvand. Salt fra veje, hvor der anvendes det moderne landsgennemsnit med 40 % vakuumsalt, vil således have et klorid-bromidforhold på ca. 5.600:1. I denne rapport er vakuumsalt anvendt som indikator på maksimal, teoretisk indblanding af vejsalt, og dets klorid-bromidforhold på 10.100:1 er vist. Stigende kloridkoncentration i et grundvandsmagasin med enten dybden eller med tiden vil følges af en udvikling i klorid-bromidforholdet, som i teorien vil følge enten opblandingskurve for vejsalt (40 % vakuumsalt) eller for regn-/havvand. Yderligere viste en gennemgang af data i JUPITER, at alle boringer med >125 mg/l klorid og et klorid-bromidforhold >550:1 med meget stor sandsynlighed var påvirket af menneskelig aktivitet fra veje og byer.

Mht. graden af vejsalts påvirkning af dansk grundvand, så er også ionbytningsfigurer (figurerne 4.16-4.17) informative. Disse viser, at omvendt ionbytning af ferske grundvandsmagasiner især sker i øvre indtag samt at disse i højere grad end gennemsnittet har klorid-bromidforhold, som indikerer, at forsaltningen skyldes vakuumsalt. Vakuumsalt som årsag til forøgede kloridkoncentrationer (i intervallet ca. 50 til 200 mg/l) i dansk grundvand kan altså bekræftes. Omfanget af forsaltningen kan dog ikke vurderes på baggrund af disse figurer, og det kan heller ikke ses, hvorvidt vejsaltning eller andre kilder til salt (f.eks. land-

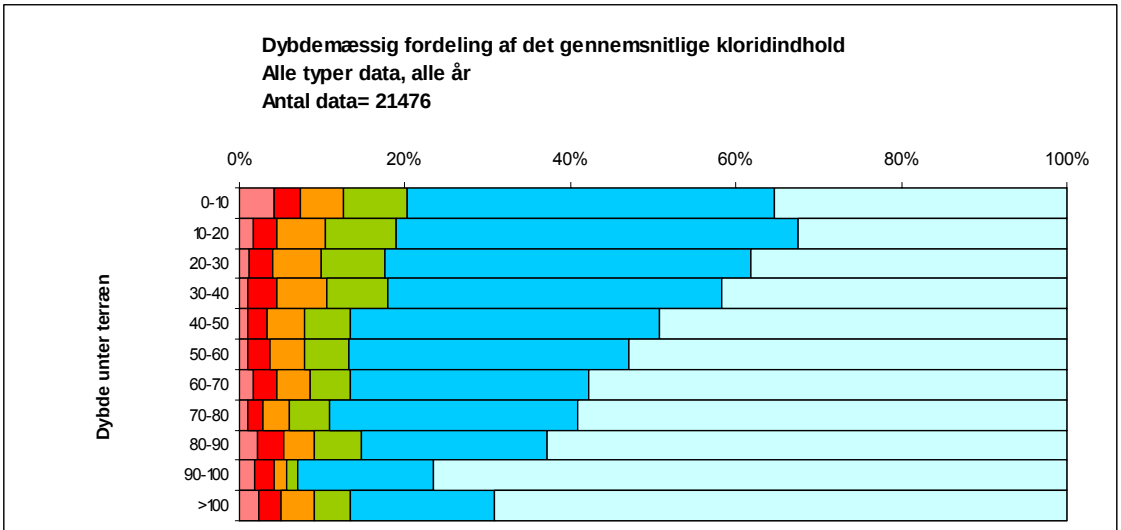
brugets gødskning, øget atmosfærisk deposition i 1990-erne) er årsagen til forsaltningen af de øvre, ferske grundvandsmagasiner.

5. Tidslig udvikling og regionale forskelle

Dette kapitel giver en status for kloridindholdet i grundvandet i Danmark både geografisk, rumligt og tidsligt.

5.1 Dybdemæssig fordeling af klorid i grundvandet

Figur 5.1 viser fordelingen af de 6 kloridkoncentrationsklasser, defineret i afsnit 4.2, i forhold til dybden af indtaget i boringerne (m u.t. til toppen af indtaget). Figuren er baseret på det gennemsnitlige kloridindhold (mg/l) fra i alt 21.454 boringer med informationer om dybden til indtaget. Det fremgår af figuren, at der er et gradvis fald i den procentvise andel af høje koncentrationer med dybden til ca. 80 m u.t., og at den største andel af høje kloridkoncentrationer findes i det øverste grundvand. Det vil sige, at den procentvise andel af analyser med kloridkoncentrationer <30 mg/l er stigende med dybden. Dette indikerer, at den primære kilde til klorid i grundvandet fra ca. 0-80 m u.t. findes ved jordoverfladen. Samtidig ses en stigning i den procentvise andel af høje koncentrationer fra 90 til >100 m u.t. Dette indikerer, at kilden til klorid i grundvandet i de dybere indtag primært findes i det underliggende grundvand med endnu højere kloridindhold. Samtidig fremgår det af tabellen under figuren, at antallet af indtag fra hvert dybdeinterval ikke er ligeligt fordelt, idet intervallet, fra 10-30 m u.t., har flest indtag.



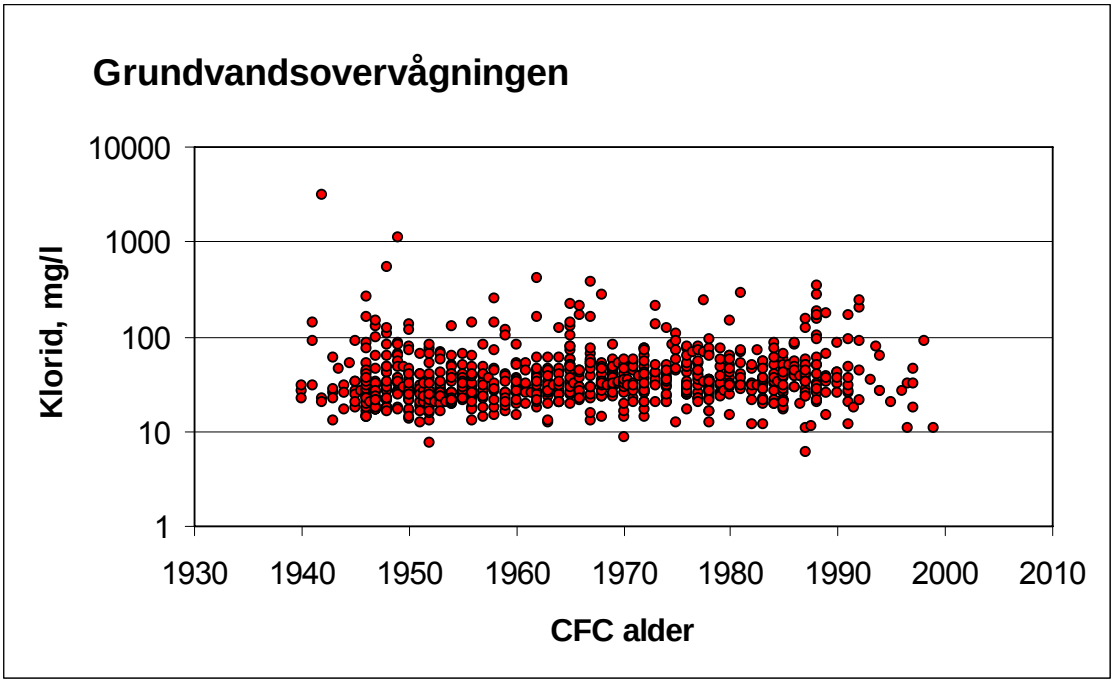
Dybde under terræn	>100	90-100	80-90	70-80	60-70	50-60	40-50	30-40	20-30	10-20	0-10
<= 30 mg/l klorid	273	163	200	320	537	792	1118	1344	1691	1520	1055
30-75 mg/l klorid	69	35	71	162	268	507	849	1300	1961	2268	1327
75-125 mg/l klorid	17	3	18	26	44	81	127	235	341	399	232
125-250 mg/l klorid	16	3	12	18	38	63	100	194	257	273	153
250-600 mg/l klorid	11	5	10	10	27	38	57	114	126	133	97
> 600 mg/l klorid	9	4	7	5	15	16	21	34	55	77	125

Antal indtag

Figur 5.1: Dybdemæssig fordeling (m u.t. til toppen af indtag) af det gennemsnitlige kloridindhold (mg/l) i grundvandsboringer inddelt i 6 koncentrationsintervaller fra i alt 21.476 boringer (indtag). Antallet af indtag i hvert koncentrations- og dybdeinterval er angivet. Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.

5.2 Aldersvurdering af kloridindholdet i grundvandet

I grundvandsovervågningen under NOVANA er flere overvågningsboringer blevet CFC-dateret. Data fra grundvandsovervågningen er anvendt til at få et billede af alderen af det grundvand, som er analyseret for klorid. Figur 5.2 viser CFC-alderen i forhold til kloridindholdet i grundvandet fra samtlige overvågningsboringer, som er dateret i forbindelse med Grundvandsovervågningen. Figuren er baseret på i alt 864 analyser.



Figur 5.2: Relationen mellem kloridindholdet og CFC-alderen af grundvandet af i alt 864 analyser fra grundvandsovervågningen. Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.

Figur 5.2 viser, at der ikke er nogen tidslig udvikling i kloridindholdet i grundvandet dannet i perioden fra 1940-2000. Sammenligningen mellem CFC-daterede aldre på grundvandet og dets kloridindhold i figur 5.3 indikerer også, at JUPITER-datasættet ikke kan give et fyldestgørende billede af vejsalts aktuelle påvirkning af grundvandsressourcen. F.eks. stammer ca. 20 % af de kemiske analyser fra grundvand dannet efter 1980, mens kun ca. 3 % er dannet efter 1990, hvor vejsaltsforbruget nåede sit nuværende høje niveau omkring 300.000 tons pr. år. Yderligere stammer analyser af det yngste, overfladenære grundvand primært fra grundvandsovervågningen (GRUMO), som er designet til overvågning af det åbne land og kun delvis i de byområder, hvor vejsaltet især bruges.

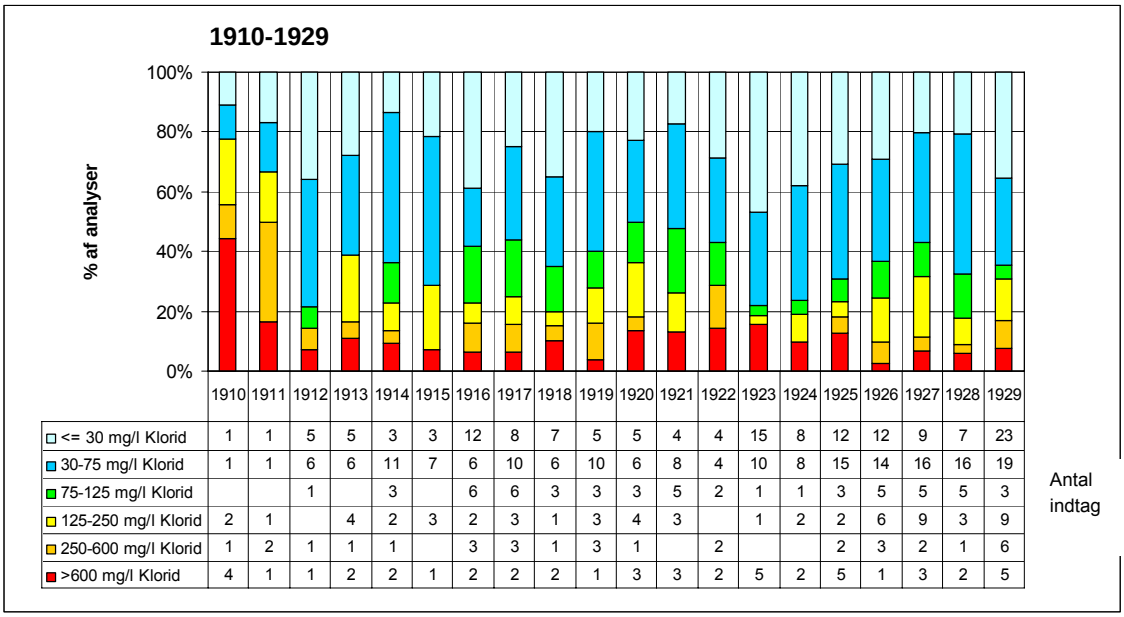
5.3 Tidslig udvikling i kloridindholdet på landsplan

På figur 5.3 ses den årlige procentvise udvikling i de 6 klorid-koncentrationsklasser i alle typer grundvandsboringer i Danmark fra 1910-2007 baseret på det gennemsnitlige kloridindhold pr. indtag pr. år. I tabellen under figuren viser, hvordan kloridkoncentrationen pr. indtag fordeler sig for hvert år i hver af de 6 koncentrationsklasser.

Det fremgår af tabellerne under figur 5.3, at antallet af kloridanalyser har været stigende siden 1910 og frem til begyndelsen af 1990'erne, hvor den nationale overvågning startede med Vandmiljøplan I, og kravet til analysehyppighed i indvindingsboringer er øget. Antallet af analyser af grundvandet fra de seneste ca. 20 år er derfor markant højere end den forudgående periode. Det fremgår også, at den procentvise andel af de høje koncentrationsklasser (>250 mg/l) er faldende frem til ca. 1988, hvorefter fordelingen af koncentrationsklasserne har været nogenlunde konstant. Denne udvikling skyldes antagelig forhold som:

- Data fra den nationale overvågning, som hovedsagelig moniterer i landbrugsområder medvirker til en udjævning de sidste 20 år
- Grænseværdien på 250 mg klorid pr. liter for drikkevand blev indført i 1980, og boringer kan være lukket for at undgå indvinding af grundvand med et for højt indhold af klorid.
- Teknisk og faglig udvikling, som har medvirket at kloridholdige boringer er undgået ved etablering af indvindingsboringer

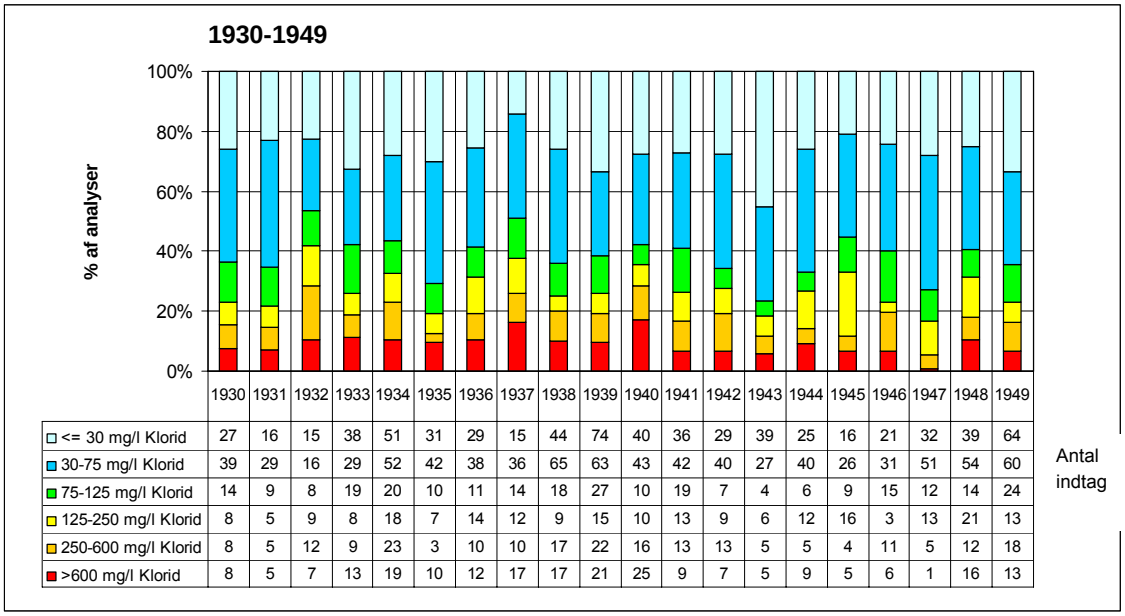
De seneste 20 år viser data, at størstedelen af kloridanalyserne (ca. 85 %) har koncentrationer under 75 mg/l, og under 1 % af analyserne har koncentrationer over 600 mg/l.



	1910	1911	1912	1913	1914	1915	1916	1917	1918	1919	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927	1928	1929
<= 30 mg/l Klorid	1	1	5	5	3	3	12	8	7	5	5	4	4	15	8	12	12	9	7	23
30-75 mg/l Klorid	1	1	6	6	11	7	6	10	6	10	6	8	4	10	8	15	14	16	16	19
75-125 mg/l Klorid			1		3		6	6	3	3	3	5	2	1	1	3	5	5	5	3
125-250 mg/l Klorid	2	1		4	2	3	2	3	1	3	4	3		1	2	2	6	9	3	9
250-600 mg/l Klorid	1	2	1	1	1		3	3	1	3	1		2			2	3	2	1	6
>600 mg/l Klorid	4	1	1	2	2	1	2	2	2	1	3	3	2	5	2	5	1	3	2	5

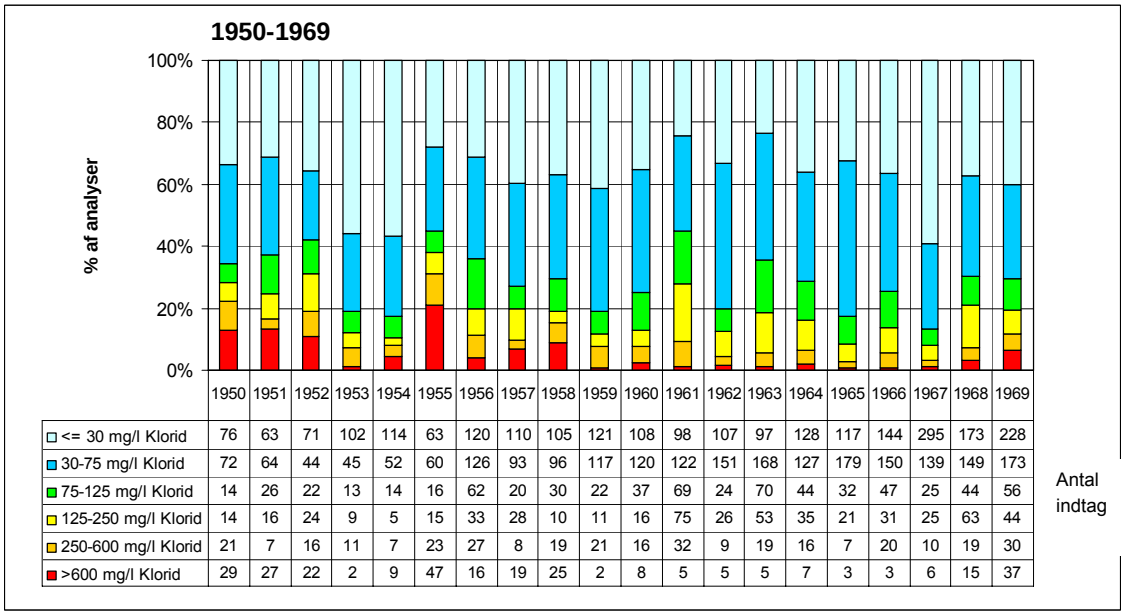
Antal indtag

Figur 5.3: Den procentvise fordeling af kloridanalyser (gennemsnit pr. indtag pr. år) i alle typer grundvandsboringer i Danmark fra 1910-1929. Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.



	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949
<= 30 mg/l Klorid	27	16	15	38	51	31	29	15	44	74	40	36	29	39	25	16	21	32	39	64
30-75 mg/l Klorid	39	29	16	29	52	42	38	36	65	63	43	42	40	27	40	26	31	51	54	60
75-125 mg/l Klorid	14	9	8	19	20	10	11	14	18	27	10	19	7	4	6	9	15	12	14	24
125-250 mg/l Klorid	8	5	9	8	18	7	14	12	9	15	10	13	9	6	12	16	3	13	21	13
250-600 mg/l Klorid	8	5	12	9	23	3	10	10	17	22	16	13	13	5	5	4	11	5	12	18
>600 mg/l Klorid	8	5	7	13	19	10	12	17	17	21	25	9	7	5	9	5	6	1	16	13

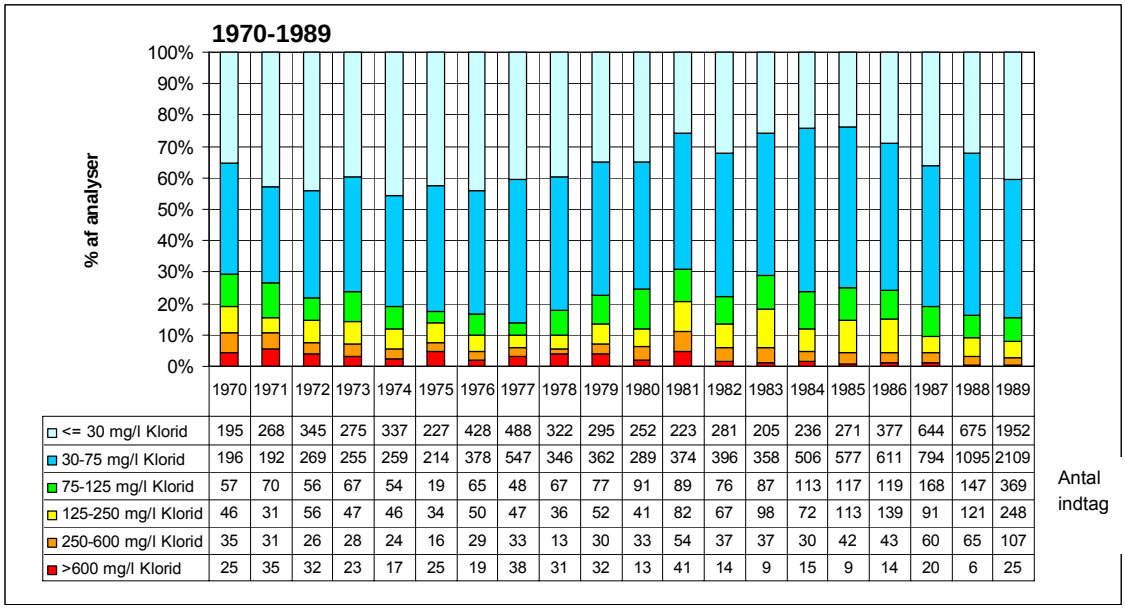
Antal indtag



	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969
<= 30 mg/l Klorid	76	63	71	102	114	63	120	110	105	121	108	98	107	97	128	117	144	295	173	228
30-75 mg/l Klorid	72	64	44	45	52	60	126	93	96	117	120	122	151	168	127	179	150	139	149	173
75-125 mg/l Klorid	14	26	22	13	14	16	62	20	30	22	37	69	24	70	44	32	47	25	44	56
125-250 mg/l Klorid	14	16	24	9	5	15	33	28	10	11	16	75	26	53	35	21	31	25	63	44
250-600 mg/l Klorid	21	7	16	11	7	23	27	8	19	21	16	32	9	19	16	7	20	10	19	30
>600 mg/l Klorid	29	27	22	2	9	47	16	19	25	2	8	5	5	5	7	3	3	6	15	37

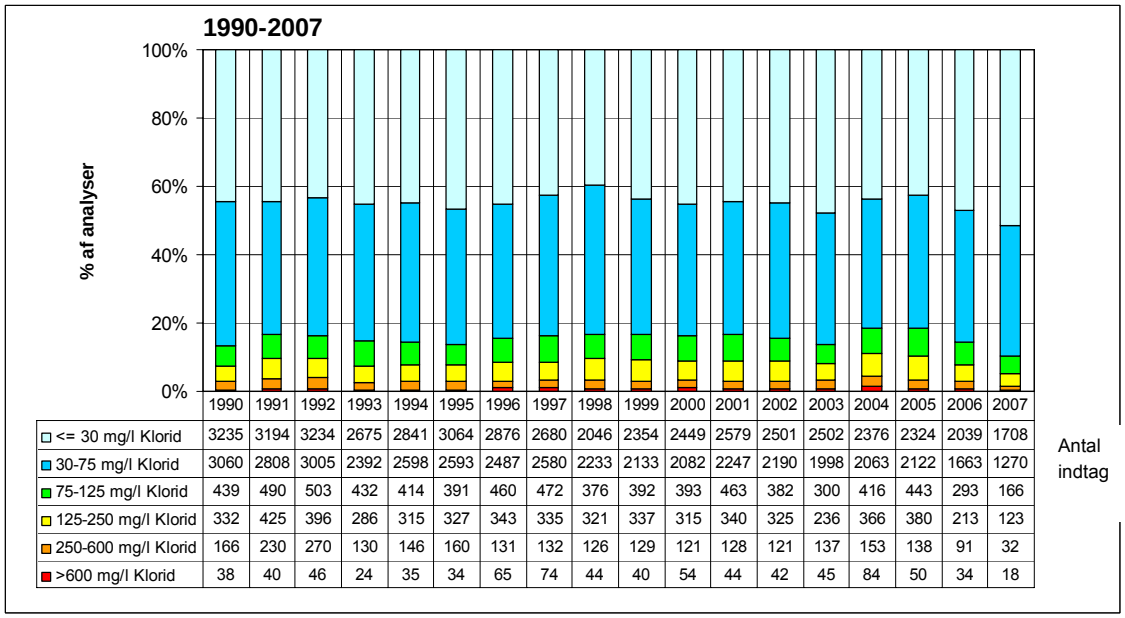
Antal indtag

Figur 5.3-fortsat: Den procentvise fordeling af kloridanalyser (gennemsnit pr. indtag pr. år) i alle typer grundvandsboringer i Danmark fra 1930-1969. Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.



	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
<= 30 mg/l Klorid	195	268	345	275	337	227	428	488	322	295	252	223	281	205	236	271	377	644	675	1952
30-75 mg/l Klorid	196	192	269	255	259	214	378	547	346	362	289	374	396	358	506	577	611	794	1095	2109
75-125 mg/l Klorid	57	70	56	67	54	19	65	48	67	77	91	89	76	87	113	117	119	168	147	369
125-250 mg/l Klorid	46	31	56	47	46	34	50	47	36	52	41	82	67	98	72	113	139	91	121	248
250-600 mg/l Klorid	35	31	26	28	24	16	29	33	13	30	33	54	37	37	30	42	43	60	65	107
>600 mg/l Klorid	25	35	32	23	17	25	19	38	31	32	13	41	14	9	15	9	14	20	6	25

Antal indtag



	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<= 30 mg/l Klorid	3235	3194	3234	2675	2841	3064	2876	2680	2046	2354	2449	2579	2501	2502	2376	2324	2039	1708
30-75 mg/l Klorid	3060	2808	3005	2392	2598	2593	2487	2580	2233	2133	2082	2247	2190	1998	2063	2122	1663	1270
75-125 mg/l Klorid	439	490	503	432	414	391	460	472	376	392	393	463	382	300	416	443	293	166
125-250 mg/l Klorid	332	425	396	286	315	327	343	335	321	337	315	340	325	236	366	380	213	123
250-600 mg/l Klorid	166	230	270	130	146	160	131	132	126	129	121	128	121	137	153	138	91	32
>600 mg/l Klorid	38	40	46	24	35	34	65	74	44	40	54	44	42	45	84	50	34	18

Antal indtag

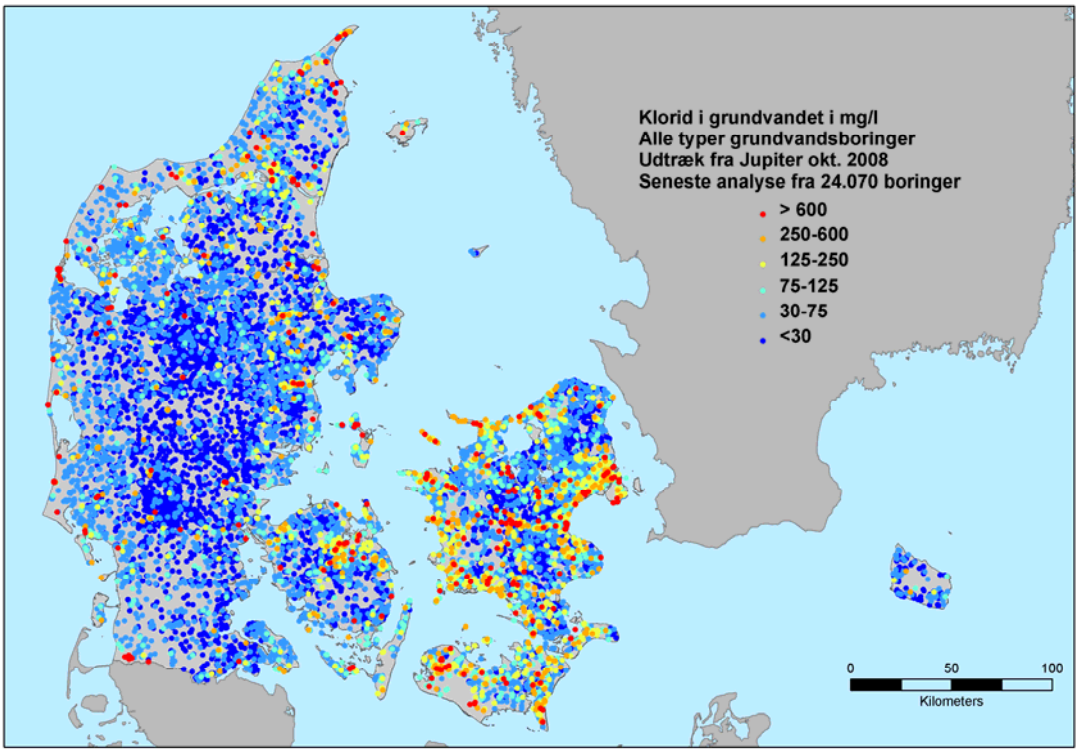
Figur 5.3-fortsat: Den procentvise fordeling af kloridanalyser (gennemsnit pr. indtag pr. år) i alle typer grundvandsboringer i Danmark fra 1970-2007. Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.

5.4 Geografisk fordeling

På figur 5.4 er vist den geografiske fordeling af kloridindholdet i grundvandet i Danmark baseret på seneste analyse fra i alt 24.070 boringer (indtag) med informationer om UTM koordinater. Data er inddelt i de 6 koncentrationsintervaller med de højeste kloridværdier afbilledet øverst.

Grundvand med et kloridindhold under grænseværdien på 250 mg/l forefindes overalt i Danmark. De højeste koncentrationer af klorid (>250 mg/l) i grundvandet forekommer specielt i kystområderne, herunder især på Sjælland, Lolland, Falster og Møn, den nordøstlige

del af Fyn, Middelfart området, Brabranddalen ved Århus, i Limfjordsområdet, på Skagen og enkelte andre steder i landet.



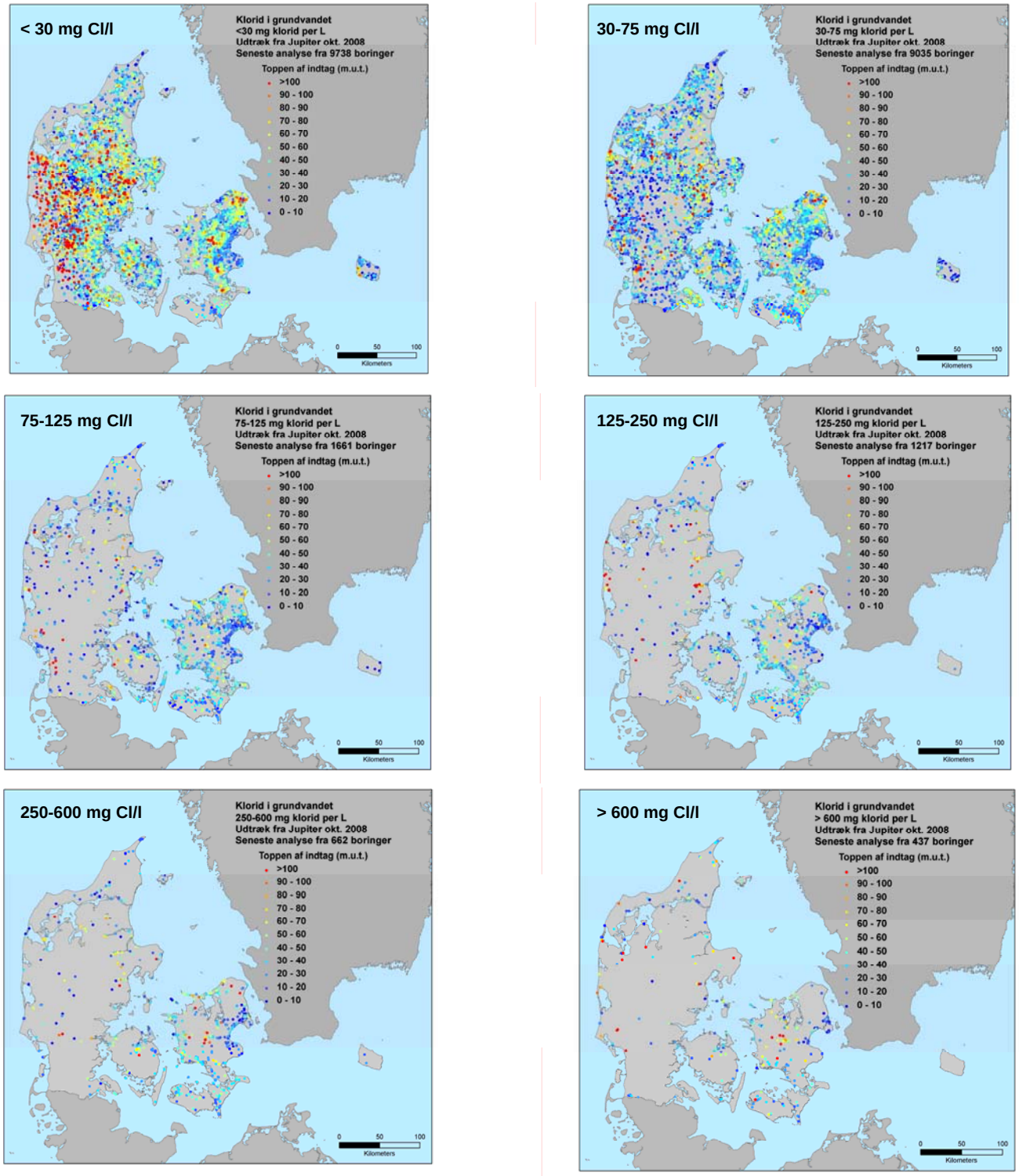
Figur 5.4: Geografisk fordeling af seneste kloridanalyse fra alle typer grundvandsboringer fra i alt 24.070 indtag inddelt i 6 koncentrationsintervaller. Højeste kloridværdier er afbilledet øverst. Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.

Figur 5.5 viser den geografiske og dybdemæssige fordeling (m u.t. til toppen af indtag) af de 6 kloridkoncentrationsintervaller baseret på seneste analyse fra grundvandsboringer (indtag) med de dybeste data afbilledet øverst. Det er igen tydeligt, at hovedparten af data (ca. 85 %) findes i koncentrationsniveauer under 75 mg klorid pr. liter.

Det fremgår af figuren, at de dybeste boringer langt overvejede indeholder grundvand med et lavt kloridindhold (<30 mg/l), og kun enkelte dybe boringer er påvirket af et højere kloridindhold. Dybe boringer med et lavt kloridindhold findes hovedsagelig vest for hovedopholdslinjen for sidste istid og (muligvis også) i forbindelse med begravede dalsystemer. Det kloridfattige dybe grundvand er sandsynligvis dannet ved den jyske højderyg og strømmer mod Vesterhavet.

Særlig høje koncentrationer af klorid i grundvandet (>600 mg/l) findes i både overfladenære boringer og i dybere boringer. Disse høje koncentrationer i de overfladenære indtag kan derfor muligvis skyldes en påvirkning fra salt fra jordoverfladen.

Mange af boringer omkring Køge Bugt med et højt kloridindhold (>75 mg/l) har toppen af filterindtaget meget overfladenært, mellem 0-30 m u.t., hvilket sandsynligvis skyldes, at dette er kalkboringer med et meget langt filterindtag.



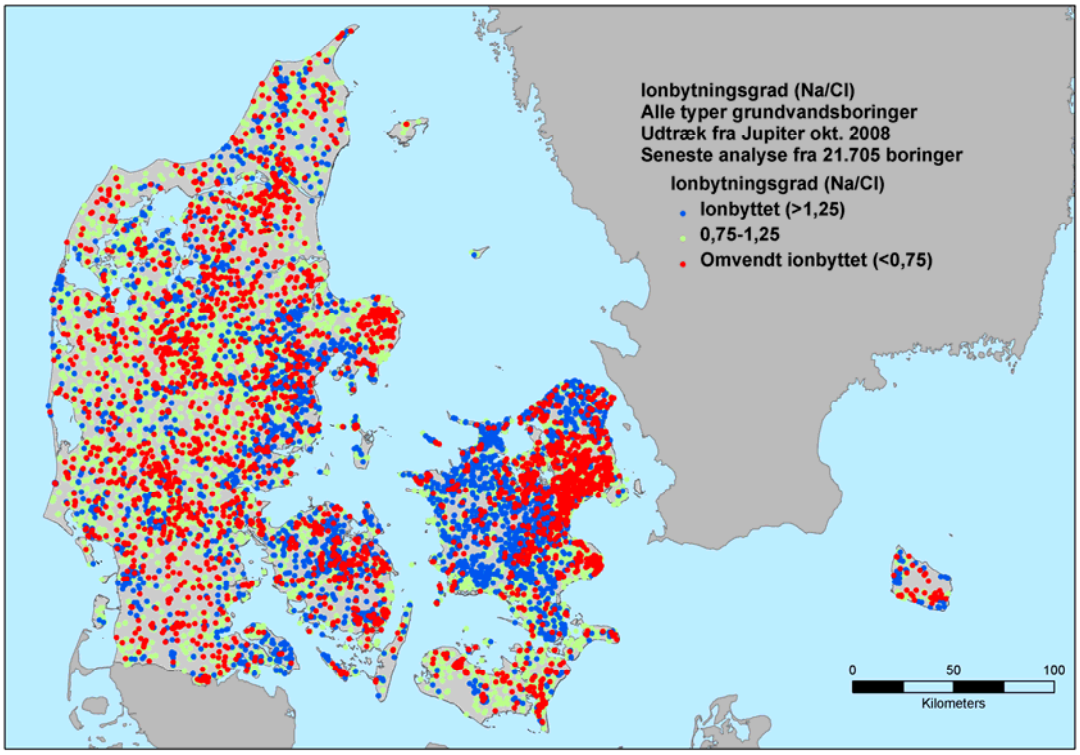
Figur 5.5: Geografisk og dybdemæssig fordeling (m u.t. til toppen af indtag) af 6 kloridkoncentrationsintervaller baseret på seneste analyse fra alle typer grundvandsboringer. Dybeste data er afbilledet øverst. Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.

5.5 Ionbytning

Figur 5.6 viser ionbytningsgraden af grundvandet i Danmark baseret på seneste analyse fra 21.705 grundvandsboringer, hvor der både foreligger natrium og klorid målinger fra samme prøvetagningsdato. Se mere om ionbytning i afsnit 4.4.

Omvendt ionbyttet grundvand (infiltration af saltvand i mere fersk grundvandssediment) optræder mange steder i landet, dog især omkring de store indvindinger på den østlige del af Sjælland og Fyn og også i mange kystområder og ved indvinding fra kalkmagasiner på Djursland.

Ionbyttet grundvand (infiltration af ferskvand i mere saltpåvirket grundvandssediment) findes også i mange egne af landet, men er mere jævnt fordelt på Sjælland og Fyn end det omvendt ionbyttede grundvand. Figur 5.6 indikerer, at ionbyttet grundvand er et udbredt fænomen i de begravede dale i Jylland, ligesom det er vidt udbredt på Øerne samt øst for Hoveopholdslinjen.

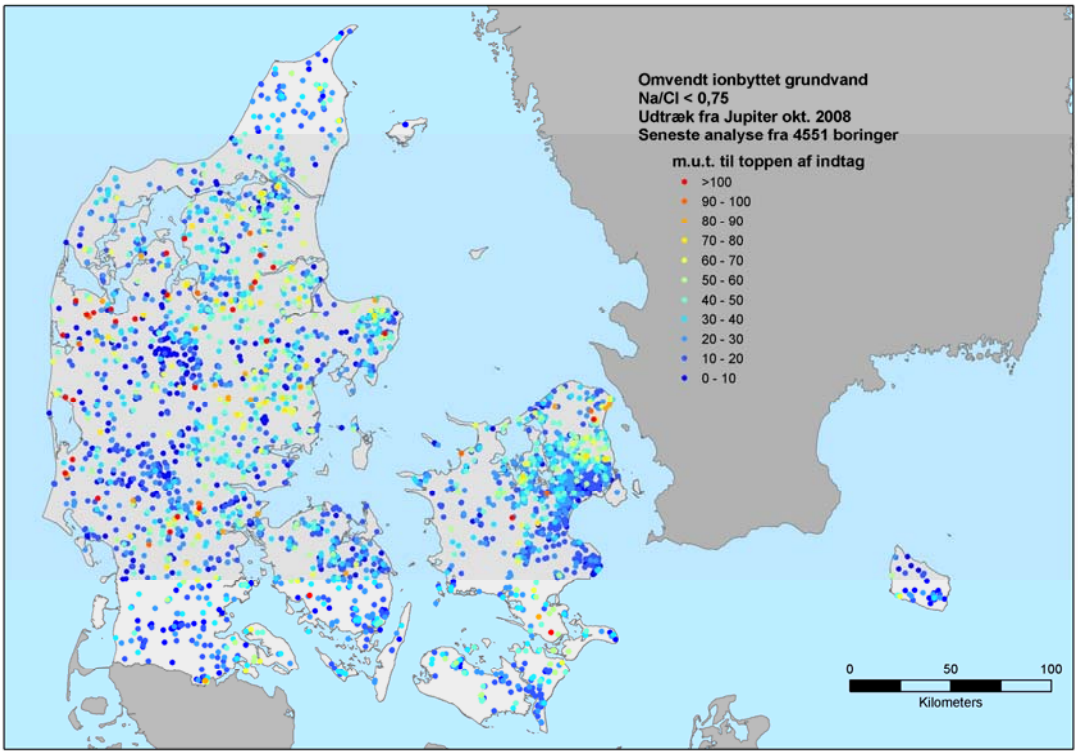


Figur 5.6. Geografisk fordeling af ionbytningsgraden (Na:Cl forholdet i milliækvivalenter) af seneste analyser fra 21.705 grundvandsboringer inddelt i 3 kategorier. Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.

Figur 5.7 viser den dybdemæssige fordeling af omvendt ionbyttet grundvand (infiltration af saltvand i mere fersk grundvandssediment), hvor dybden til indtagets top er angivet i m u.t. ved inddeling i intervaller. Figuren er baseret på seneste analyse fra 4.551 boringer, hvor natrium-klorid forholdet er < 0,75.

De dybe boringer (INDTTOP>70 m u.t., gule og røde signaturer) med omvendt ionbyttet grundvand tolkes som saltvandsindtrænging eller diffusion fra det underliggende salte grundvand jf. figur 5.2.

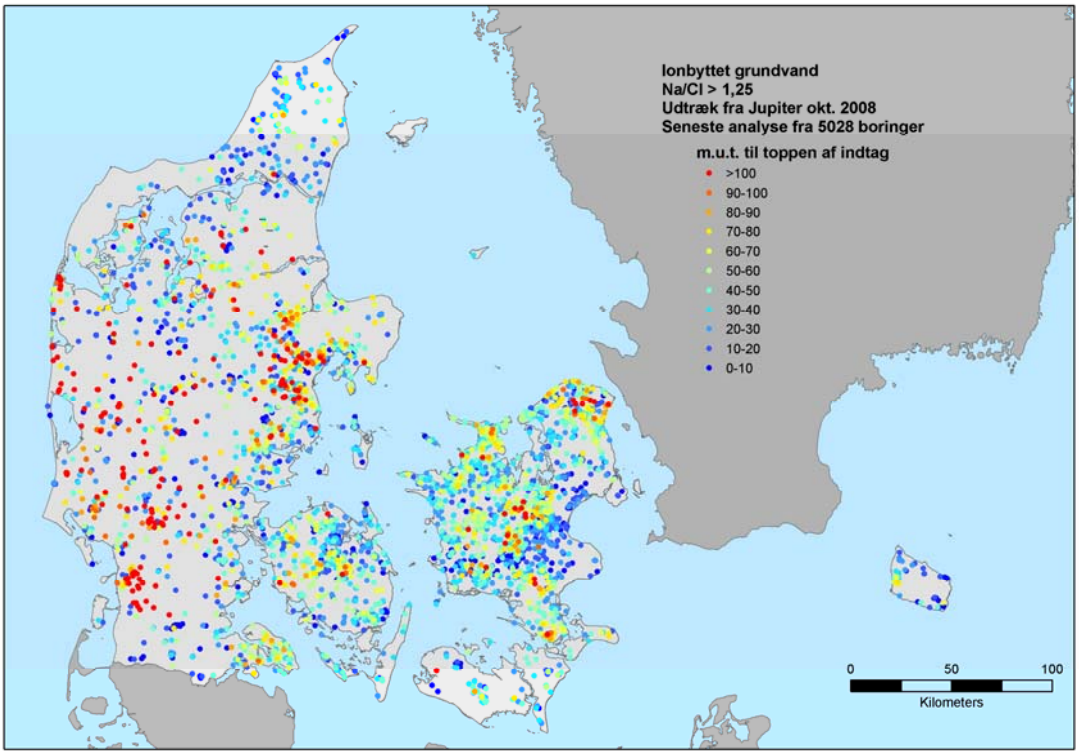
Forekomst af omvendt ionbyttet grundvand tæt på terræn (0-70 m.u.t.) er en indikation på påvirkning af grundvandskvaliteten fra jordoverfladen, hvor kloridkilden ved jordoverfladen kan være vejsaltning. Forekomst af omvendt ionbyttet grundvand tæt på terræn (0-70 m.u.t.), hvor boringer ligger på en linie, forstærker indikationen af påvirkning af grundvandskvaliteten fra vejsalt. I figur 5.7 ses der ingen tegn på sådanne linjer på landsplan, men boringerne er heller ikke placeret således at eventuelle linjekilder kan erkendes.



Figur 5.7. Geografisk og dybdemæssig (m u.t. til toppen af indtag) fordeling af omvendt ionbyttet grundvand (natrium-kloridforhold <0,75) i 4.551 grundvandsboringer. Baseret på seneste analyser af dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.

Figur 5.8 viser den dybdemæssige fordeling af ionbyttet grundvand (ferskvandspåvirkning af saltholdigt grundvandssediment), hvor dybden til indtagets top er angivet i m u.t ved inddeling i intervaller. Figuren er baseret på seneste analyse fra 5.028 boringer, hvor natrium-klorid forholdet er >1,25.

Ved sammenligning af figur 5.7 og figur 5.8 ses det tydeligt, at det ionbyttede grundvand i langt større grad er relateret til de dybe boringer end det omvendt ionbyttede grundvand. Det skyldes, at det ionbyttede grundvand er påvirket af marine aflejringer enten fra de kvartære aflejringer (omlejrede tertiære marine aflejringer) eller egentlige tertiære marine afflejringer (kalkaflejringer, miocænt sand), hvor saltvandspræget af sedimentet endnu ikke er udvasket.



Figur 5.8. Geografisk og dybdemæssig (m u.t. til toppen af indtag) fordeling af ionbyttet grundvand (natrium-kloridforhold >1,25) i 5.028 grundvandsboringer. Baseret på seneste analyser af dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.

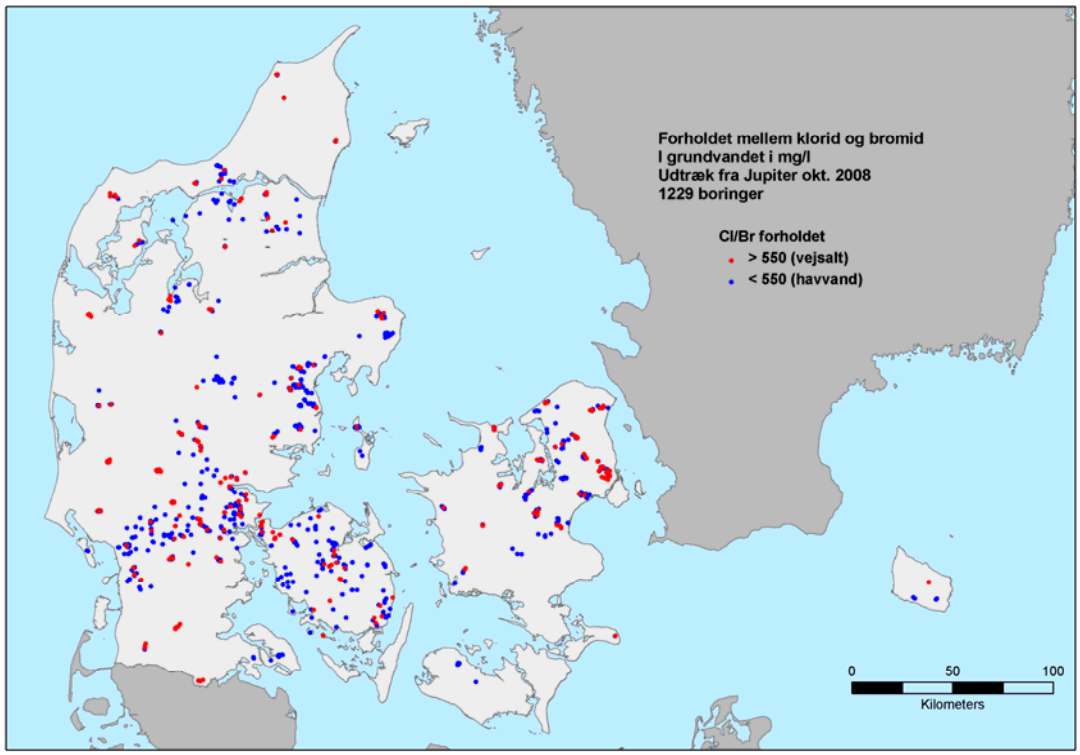
5.6 Klorid-bromidforholdet

Kilden til klorid i omvendt ionbyttet grundvand (infiltration af saltvand i et mere ferskt grundvandssediment), kan være (se også tabel 3.1):

- Infiltration af vejsalt fra jordoverfladen
- Infiltration af atmosfæriske salte fra jordoverfladen
- Infiltration af saltholdige forureningskilder ved jordoverfalden
- Indtrængning (advektiv) eller diffusiv transport af saltholdig grundvand

Det vil sige, at det er det omvendt ionbyttede grundvand, som eventuelt kan være påvirket af vejsalt.

I kapitel 4.7 er det vist, at klorid-bromidforholdet kan bruges til at spore kilderne til klorid i grundvandet, hvor der kan skelnes mellem grundvand, som tydeligt er påvirket af vejsalt (klorid-bromidforhold >550:1) eller havvand/regnvand og stensalt (klorid-bromidforhold <289:1). I figur 5.9 er vist seneste analyseresultater af klorid-bromidforholdet i 1.229 grundvandsboringer. Der er en meget uensartet geografisk fordeling af analyserne af klorid-bromidindholdet i grundvandet. Resultaterne viser, at 304 boringer muligvis kan være påvirket af vejsalt, da de har et klorid-bromidforhold på over 550.



Figur 5.9. Geografisk fordeling af klorid-bromidforholdet i grundvandet baseret på seneste analyser fra 1229 boringer med bromidanalyser. Klorid-bromidforhold > 550 bruges som en indikator for vejsaltpåvirkning, mens et klorid-bromidforhold < 550 bruges som en indikator for havvandspåvirkning. Punkter med Cl/Br > 550 er afbilledet øverst. Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.

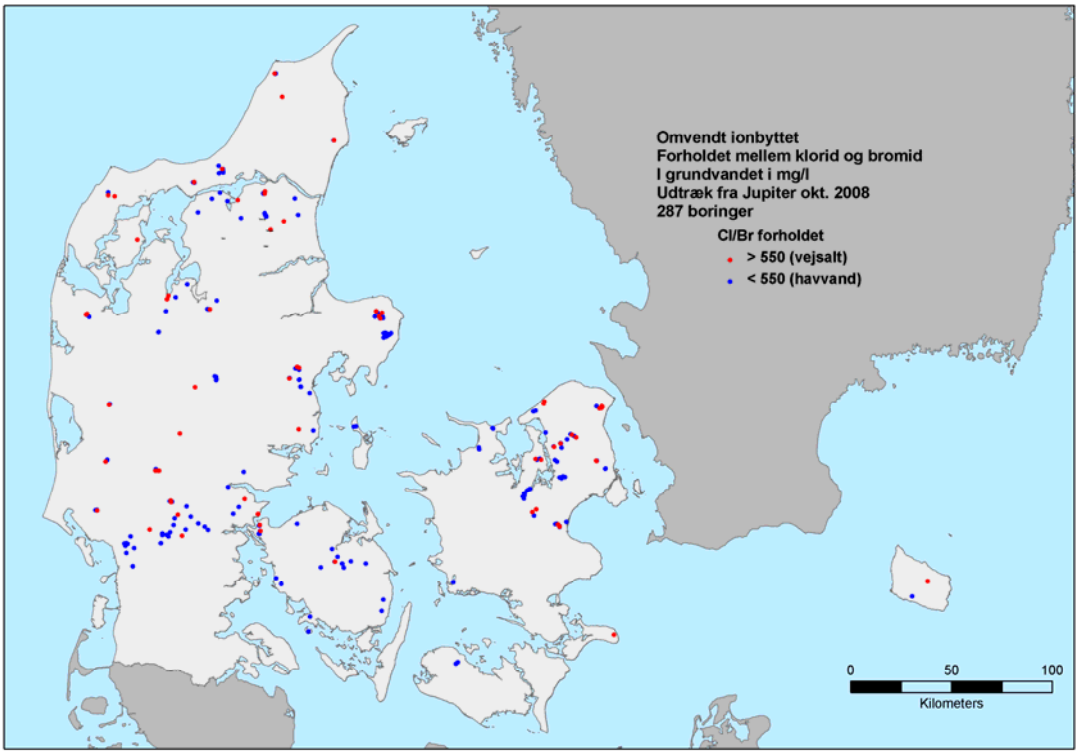
I afsnit 4. 7 (Klorid-bromid: Estimering af en indikation på vejsalt) er der forsøgt anvendt kriteriet med klorid-bromidforhold >550 og >125 mg klorid pr. liter, for at finde de boringer, som har påvirkning fra vakuumsalt og forhøjet kloridindhold. Denne delmængde af boringer havde næsten alle tegn på påvirkning fra byer og veje. Med det formål at studere boringerne med klorid-bromidforhold >550:1 nærmere, er det her forsøgt at indskrænke antallet af boringer i figur 5.9, til de som med større sikkerhed kan være påvirket af vejsalt. Her er følgende 2 kriterier anvendt i adskillelsen:

- Klorid-bromidforhold >550
- Omvendt ionbyttet (natrium-kloridforhold <0,75)

I figur 5.10 er vist seneste analyseresultater af klorid-bromidforholdet i de 287 boringer, som har omvendt ionbytning og en analyse af bromidindholdet i grundvandet. Der er igen en meget uensartet geografisk fordeling af analyserne af klorid-bromidindholdet i omvendt ionbyttet grundvand. Resultaterne viser, at 79 boringer muligvis kan være påvirket af vejsalt, da de har klorid-bromidforhold på >550 og omvendt ionbytning.

En gennemgang af disse 79 boringer viser, at 47 af dem ligger i umiddelbar nærhed af en hovedvej, mens 22 ligger i tilknytning til mindre byer og/eller biveje. Ti af boringerne ligger ikke i umiddelbar nærhed af oplagte kilder til vejsalt. I alt 14 boringer har kloridindhold på >125 mg/l, mens ca. 40 af dem har kloridkoncentrationer under 60 mg/l. Hovedparten af

boringerne med klorid-bromid >550 og omvendt ionbytning er altså sandsynligvis påvirket af vand fra veje, men ikke nødvendigvis med særlig høje koncentrationer til følge.

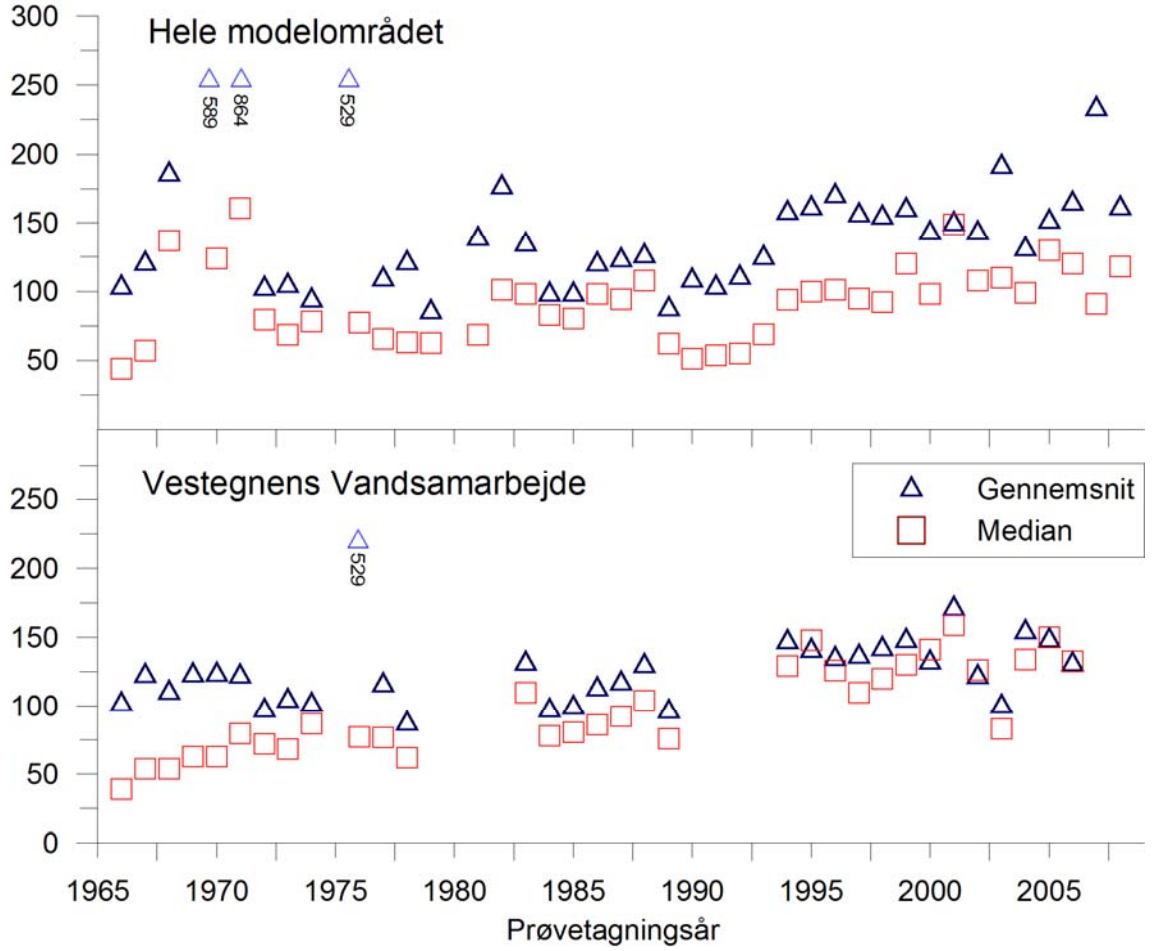


Figur 5.10. Geografisk fordeling af klorid-bromidforholdet i omvendt ionbyttet grundvand baseret på seneste analyser fra 289 boringer. Klorid-bromidforhold > 550 bruges som en indikator for vejsaltpåvirkning. mens et klorid-bromidforhold < 550 bruges som en indikator for havvandspåvirkning. Punkter med Cl/Br > 550 er afbilledet øverst. Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008.

5.7 Tidslig udvikling på regional skala i Storkøbenhavn

En regional analyse af den tidslige udvikling i grundvandets kloridindhold er foretaget for dele af Østsjælland. Baggrunden herfor er, at dette potentielt kan være mest belastet med klorid fra vejsaltning pga. lav nettonedbør og høj urbanisering. I figur 5.11 ses den tidslige udvikling for hele modelområdet og en delmængde af dette område, nemlig Vestegnens Vandsamarbejde, som er værkstedsområde for dette projekt (se kapitel 6 og specielt figur 6.1).

Figur 5.11 viser en større spredning i kloridkoncentrationerne for modelområdet end for det mindre værkstedsområde. Overordnet set er der den samme stigende tendens i kloridindholdet i både modelområdet og i det mindre delområde, som værkstedsområdet udgør.



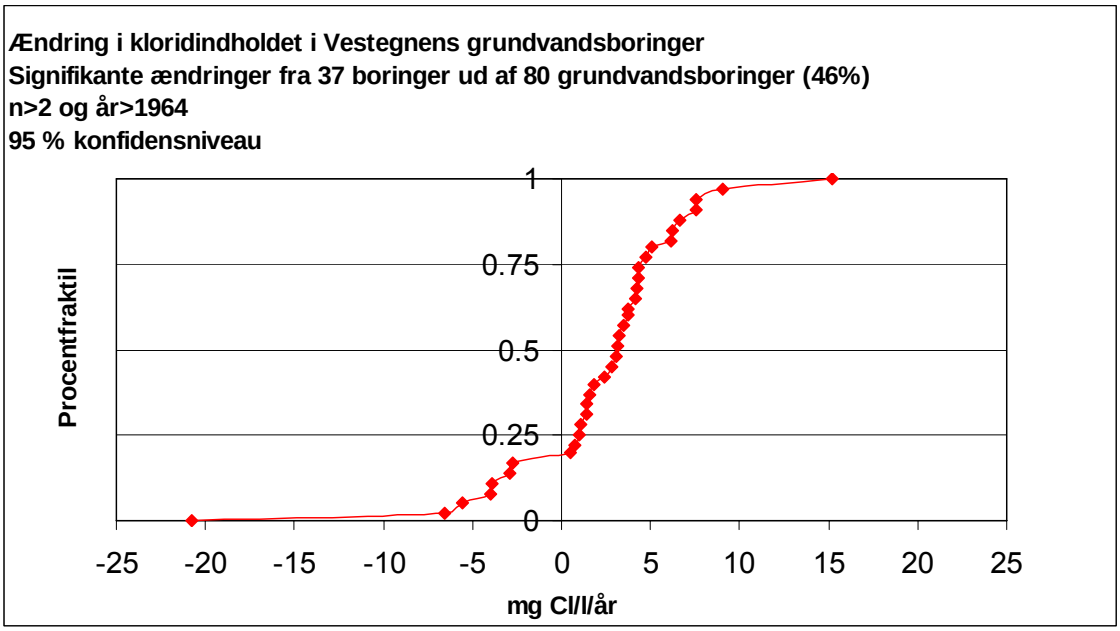
Figur 5.11. Den tidslige udvikling af kloridkoncentrationer (middel og median) i modelområdet og Vestegnens Vandsamarbejde, som er værkstedsområde i dette projekt (se afsnit 6). Baseret på dataudtræk fra JUPITER d. 7. oktober 2008 for boringer med >9 analyser pr. år for år>1965. Værdier over den anvendte skala er markeret.

Den tidslige udvikling i kloridindholdet i værkstedsområdet fra 1965 til 2007 er undersøgt nærmere ved linear regression for hver enkelt af 80 boringer med >2 kloridanalyser. Det er dermed undersøgt, om kloridkoncentrationen i hver enkelt boring udvikler sig lineært med tiden. Dette er foregået vha. statistik programmet SAS. I alt er det fundet, at 46 % af boringerne (37 ud af de 80 boringer) har signifikante ændringer i kloridindholdet på 95 % konfidensniveau.

I figur 5.12 er vist fordelingen af lineære signifikante ændringer i kloridindholdet for de 37 boringer. Ændringer i kloridindholdet (mg/l $år^{-1}$), som er afbilledet på x-akserne, svarer til hældningskoefficienten, som er fundet ved linear regression af kloridindholdet versus prøvetagningstidspunktet for hver af boringerne. Negative ændringer i kloridindholdet (mg/l $år^{-1}$) skal tolkes som boringer med signifikante lineære fald i kloridindholdet, mens positive ændringer i kloridindholdet tolkes som boringer med signifikante lineære stigninger i kloridindholdet gennem undersøgelsesperioden.

Figur 5.12 viser, at 80 % af de 37 boringer har en signifikant stigende tendens i kloridindholdet fra 1965 til 2007. Denne analyse af kloridændringer med tiden i enkeltboringer viste

altså, at 30 ud af 80 boringer (38 %) i området med flere end 2 vandanalyser har en signifikant stigende tendens, mens kun 7 af de 80 boringer (9 %) har en signifikant faldende tendens. Årsagen til stigningerne i kloridindholdet på boringsniveau kan være mange. På det foreliggende datagrundlag kan betydningen af vejsaltning i værkstedsområdet for stigningen i kloridindholdet på boringsniveau ikke afgøres. Figur 5.12 indikerer dog, at der er risiko for, at bl.a. vejsaltning medvirker til stigningen i kloridindholdet i mange boringer i værkstedsområdet.



Figur 5.12. Fordelingen af udviklingen i kloridindholdet (mg/l $år^{-1}$) for boringer i værkstedsområdet (Vestegnens Vandsamarbejde). Datagrundlaget er 37 boringer (ud af i alt 80 med >2 kloridanalyser i perioden fra 1965-2007) som har lineare signifikante ændringer på 95 % konfidensniveau.

5.8 Konklusion

Der er mange kilder til klorid i grundvandet, og det er svært med de eksisterende metoder og datagrundlag at differentiere mellem kilderne. Dataanalysen i dette kapitel kan dog give indikationer på eksistensen af forskellige typer kilder til klorid i grundvandet i Danmark.

Dataanalysen viser, at det øvre grundvand fra 0-80 m u.t., sandsynligvis er påvirket af kloridkilder på jordoverfladen. Den dybdemæssige fordeling af kloridindholdet i det danske grundvand indikerer nemlig, at den primære kilde til klorid i grundvandet fra ca. 0-80 m u.t. findes ved jordoverfladen. Kloridkilder ved jordoverfladen kan være atmosfæriske salte, vejsaltning, depoter af vejsalt og andre saltholdige forureningskilder såsom lossepladser, gødning og utætte kloakker og septiktanke. I modsætning hertil giver data fra større dybde (90- >100 m u.t.) indikationer på, at den primære kilde til klorid i grundvandet her skal findes i det underliggende saltholdige grundvand. Kilden til klorid i det dybereliggende grundvand kan være diffusion eller indtrængning af enten marint infiltrationsvand, marint residual vand eller salt mineralsk grundvand.

Data fra grundvandsovervågningen under NOVANA af samhørende værdier af kloridindholdet i grundvandet og CFC-datering af grundvandet viser ingen tidslig udvikling i kloridindholdet i det danske grundvand dannet fra 1940-2000. Dog stammer kun ca. 3 % af dataene fra perioden efter 1990, hvor vejsaltforbruget i Danmark nåede sit nuværende niveau på omkring 300.000 tons pr. år. Det kan derfor ikke forventes, at JUPITER datasættet kan give et fyldestgørende billede af den aktuelle vejsaltnings påvirkning af grundvandet.

Den årlige procentvise andel af høje kloridkoncentrationer (>250 mg/l) er faldende fra 1910 og frem til 1990'erne. Dette må delvis tilskrives den strukturelle, tekniske og faglige udvikling af vandforsyningsboringer samt etablering af omkring 1500 grundvandsovervågningsindtag fra 1990, etableret i områder og dybder uden de store kloridproblemer. De seneste 20 års data viser, at størstedelen af kloridanalyserne i det danske grundvand (ca. 85 %) har koncentrationer under 75 mg/l, og at under 1 % af analyserne har >600 mg klorid pr. liter.

Geografisk og dybdemæssig analyse af kloridindholdet i det danske grundvand viser, at særlig høje koncentrationer af klorid i grundvandet både findes i overfladenære boringer og i dybe boringer. Boringer med høje koncentrationer i de overfladenære indtag kan muligvis være påvirket af vejsaltning. De fleste af de dybe boringer har dog et meget lavt kloridindhold (< 30 mg/l), og findes hovedsagelig vest for hovedopholdslinjen i Jylland og i forbindelse med begravede dalsystemer.

Dataanalysen viser, at ionbytning er en vigtig indikatorparameter i forhold til identifikation af kloridkilderne i grundvandet. Det ionbyttede grundvand (infiltration af ferskvand i mere saltpåvirket grundvandssediment) er i stor grad relateret til de dybere boringer end det omvendt ionbyttede grundvand (infiltration af saltvand i mere fersk grundvandssediment). Ionbyttet grundvand er udbredt på Øerne og øst for hovedoplandslinjen i Jylland, hvor det sandsynligvis er et typisk fænomen i de begravede dale. Omvendt ionbyttet grundvand optræder mange steder i landet især omkring de store indvindinger, hvilket skyldes stigende saltindhold. Den geografiske dataanalyse af ionbytningsgraden i grundvandet indikerer, at grundvandet kan være påvirket af vejsalt de steder, hvor grundvandet er omvendt ionbytttet i det øvre grundvand (< 70 m u.t.), og hvor tæt liggende fund samtidig indikerer en linjekilde.

Dataanalysen viser, at påvirkningen fra vejsalt formentlig bedst kan erkendes i omvendt ionbyttet grundvand. Samtidig viser dataanalysen i kapitel 4, at klorid-bromidforholdet er brugbart under danske forhold til kildeadskillelse mellem vejsalt og havvand. Disse forhold er benyttet i en geografisk og dybdemæssig analyse af klorid-bromidforholdet i det omvendt ionbyttede grundvand. Analyse af ca. 1.200 boringer i Danmark indikerer, at der er omkring 80 boringer, som muligvis er påvirket af vejsaltning, men at kun 14 har >125 mg klorid pr. liter. Den geografiske analyse bygger dog på et sparsomt datagrundlag mht. bromidanalyser, som resulterer i en dårlig datadækning på landsplan. Flere fremtidige bromidanalyse vil kunne give et stærkere værktøj til vurdering af vejsaltningens påvirkning af grundvandsressourcen.

Vestegnens Vandsamarbejde er udvalgt til værkstedsområde for modellering i kapitel 6. En analyse af udviklingen i kloridindholdet i boringer i værkstedsområdet siden 1965 viser, at 46 % af boringerne med >2 analyser har signifikant ændrede kloridkoncentrationer, og at

80 % af disse ændringer skyldes en stigende tendens. Dette svarer til, at ca. 38 % af boringerne i værkstedsområdet med flere end 2 vandanalyser har en signifikant stigende tendens i kloridindholdet, mens kun 8 % har en signifikant faldende tendens og 54 % har ingen signifikante ændringer i kloridindholdet. Årsagen til stigningerne i kloridindholdet kan være mange, men klorid fra vejsaltning og indtrængende marint residual grundvand er sandsynlige årsager.

6. Vestegnens Vandsamarbejde som værksteds-område

Der er udviklet et risikovurderingsværktøj i MIKE SHE, som kan anvendes på oplandsskala til at vurdere risikoen fra vejsaltning samt mulige tiltags virkning på grundvandskvaliteten. Desuden er der udvalgt et værkstedsområde placeret i Storkøbenhavn, da eventuelle problemer med vejsalt for grundvandsressourcens kvalitet kan forventes i stærkt urbaniserede områder med lav netto nedbør.

Formålet med udviklingen af risikovurderingsværktøjet i MIKE SHE er at vurdere følgende:

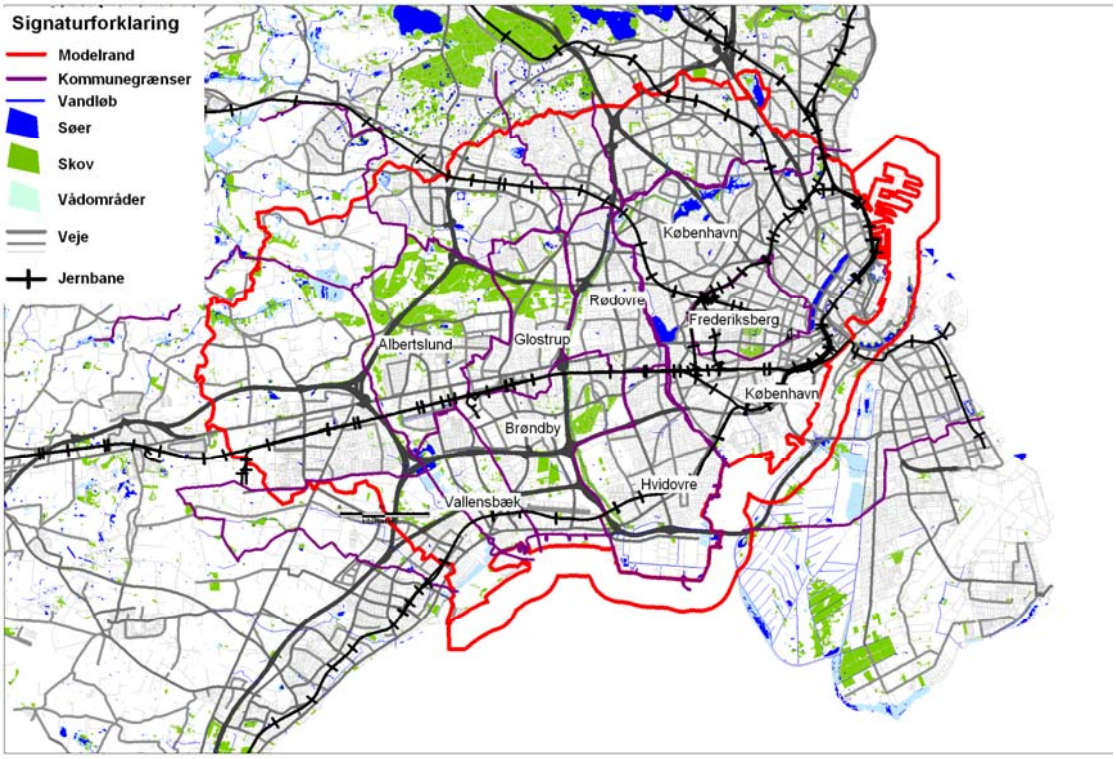
1. Er der lokal påvirkning af grundvandsressourcen fra vejsalt og
2. Er der regional påvirkning af grundvandsressourcens kvalitet fra vejsalt samt
3. Effekten af tiltag overfor forureningen fra vejsalt, herunder varighed af forureningen af grundvandsressourcen.

6.1.1 Værkstedsområdet

Det valgte værkstedsområde udgøres af Vestegnens kommuner, som deltager i Vestegnens Vandsamarbejde I/S. Vestegnens Vandsamarbejde består af Vestegnskommunerne: Albertslund, Brøndby, Glostrup, Hvidovre, Rødovre og Vallensbæk samt Københavns Energi, og dækker et område, som er stærk urbaniseret. Der indvindes i størrelsesorden 4,0-4,5 mio. m^3 vand om året inden for Vestegnskommunernes grænser og der er en samlet tilladelse på 6,8 mio. m^3 pr. år. Der indvindes overvejrende i Danienkalken, men der er også indvindinger i et dybere liggende skrivekridtmagasin.

På figur 6.1 er vist modelområdet, værkstedsområdet samt de større veje, hvor vejsalt kan tabes til omgivelserne. Værkstedsområdet ligger i det område, som i projektet ”Saltvandsgrænsen i kalkmagasiner i Nordøstsjælland” (Klitten m.fl., 2006) kaldes zone 4, og som dækker området Storkøbenhavn syd for Søndersødalen og går fra Amager mod vest til Roskilde fjord. Afgrænsningen mod syd går fra Køge bugt og mod vest til Roskilde fjord.

Prækvartæroverfladen udgøres af Danienkalk, som i den centrale del ligger højt, dvs. over kote 0 m, og hvor Skrivekridtet ligeledes ligger højt, dvs. over kote – 20 m. Imod øst ligger såvel prækvartæroverfladen som Skrivekridtet noget dybere som følge af Carlsberg forkastningen, der gennemskærer København fra Sydhavnen over Bellahøj.



Figur 6.1: Modelområde (mørkerød) for Vestegnens Vandsamarbejdes model, hvor de større veje er medtaget, og kommunegrænserne indenfor Vestegnens Vandsamarbejde er vist med lilla.

I projektet "Saltvandsgrænsen i kalkmagasiner i Nordøstsjælland" (Klitten m. fl., 2006) konkluderes det, at klorid i Danienkalken generelt er udvasket, og i området vest for København (Vestegnen) og Køge Bugt er den øvre del af Skrivekridtet ligeledes udvasket for klorid. Saltvandsgrænsen i Vestegnen findes i forbindelse med mergelhorisonter, hvilket sandsynligvis skyldes, at disse mergellag udgør en hydraulisk barriere, der virker hæmmende for det ferske grundvands opblanding med det saltvandspåvirkede grundvand. I Hvidovre ligger saltvandsgrænsen under det øverst beliggende mergellag (Kølbygårdmerglen), mens det i Glostrup og Rødovre er et mergellag, som ligger under Kølbygårdmerglen. Datagrundlaget er dog relativt spinkelt. Det må imidlertid forventes, at der er størst risiko for optrængning af residualt havvand i områder med perforerede mergellag, hvilket f.eks. kan være forårsaget af indvindingsboringer. I den øvrige del af projektets undersøgelsesområde (størstedelen af Nordsjælland) findes saltvandsgrænsen imidlertid ved overgangen mellem Danienkalk og Skrivekridt (Klitten m.fl., 2006 og Vestegnens Vandsamarbejde, 2009a).

Vestegnens Vandsamarbejde fik i 2008 (Vestegnens Vandsamarbejde, 2009a), lavet et udredningsprojekt omhandlende kloridindhold i indvindingsboringer. Her blev samtlige aktive indvindingsboringer gennemgået med hensyn til grundvandskemiske parametre og geofysiske logs. Kilderne til et evt. forhøjet kloridindhold i grundvandet blev vurderet. Fra rapporten (Vestegnens Vandsamarbejde, 2009a) er der hentet følgende kommentarer til indvindinger på Vestegnen fra kalk magasinet:

- For Albertslund vandforsynings boringer viser grundvandskemien samlet, at der er tale om "ungt" grundvand. Logging-undersøgelser viser endvidere, at der er mere

end 56 m fra indstrømningszonerne i indvindingsboringerne og ned til saltvandsgrænsen. Det vurderes derfor, at den sandsynlige kilde til de forhøjede kloridkoncentrationer til Vridsløselille Vandværk skyldes vejsaltning. Kloridkoncentrationerne er imidlertid lave og relativ konstante på 100 til 150 mg/l afhængig af den aktuelle indvindingsboring. Problemet med vejsaltning ser således ikke ud til at være stigende.

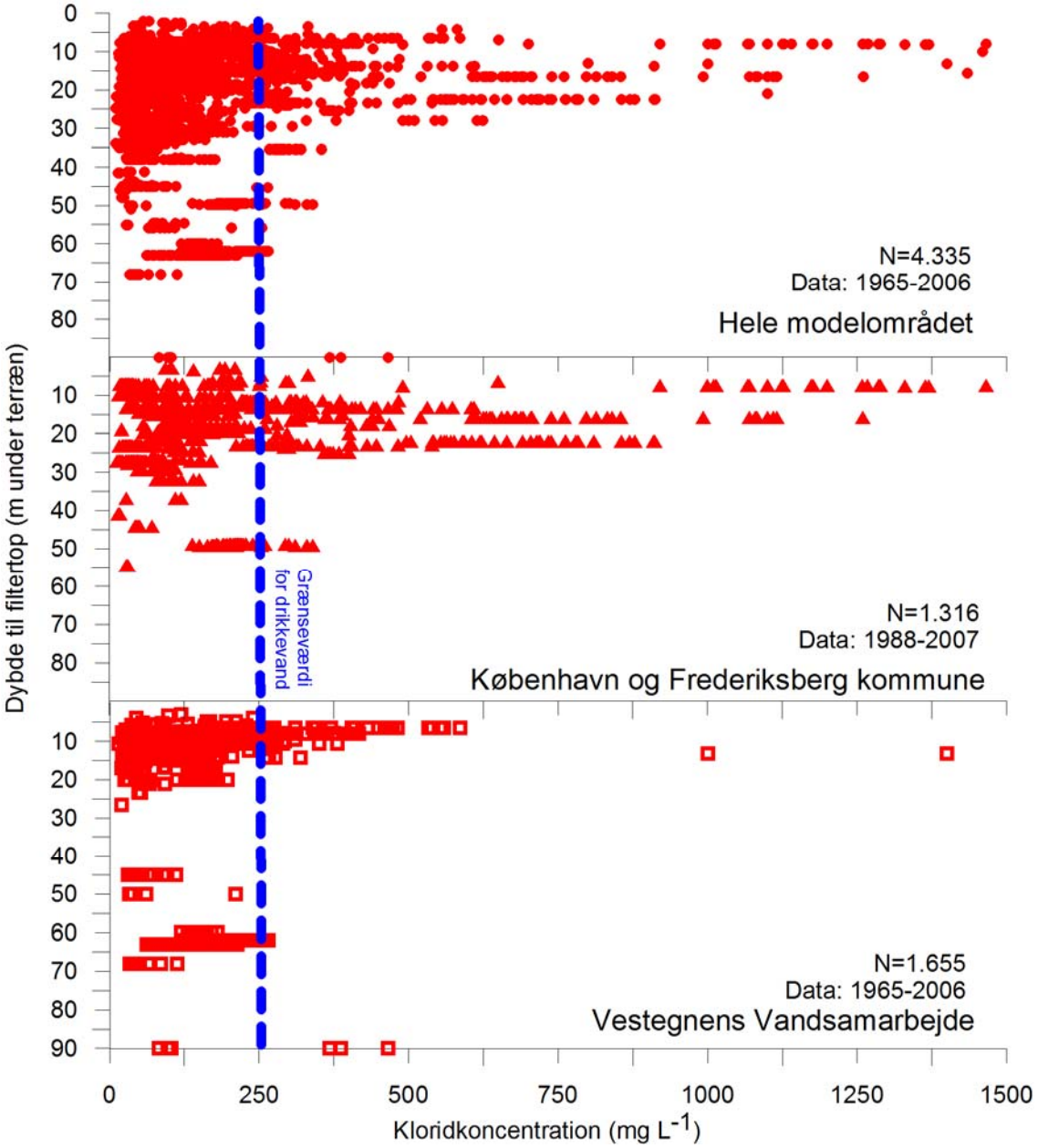
- For Rødovre vandforsynings boringer ses der kun to boringer (DGU nr. 200.38H og 200.3628), som er svagt saltpåvirket, og klorid udgør ikke et problem. Ligesom i Albertslund vurderes kilden til klorid at være vejsaltning på grund af den "unge" vandkemi og den relativ store dybde mellem de forventede indstrømningszoner i indvindingsboringerne og saltvandsgrænsen.
- For Brøndby og Hvidovre vandforsynings boringer er forholdene mere komplicerede, idet der i alle tilfælde er tale om relativt dybe boringer, som i Hvidovre mange steder gennemborer Kølbygårdmerglen. Endvidere viser flere niveau-specifikke vandprøver, at der er høje koncentrationer af klorid i både toppen af Danienkalken og i bunden af boringen. Det er derfor her sandsynligt, at både vejsaltning og optrængning af residualt havvand er kilder til klorid i grundvandet.
- For vandforsyningerne i Vallensbæk er der en tendens til, at de højeste indhold af klorid findes i de boringer, som ligger tættest på kysten. Desuden adskiller kemien sig i flere boringer fra de øvrige boringer i Vestegnen med indtag i toppen af prækvartæret, idet de forhøjede indhold af klorid ikke er sammenfaldende med forhøjede indhold af sulfat. Dette tyder på, at kilden til klorid kan være indtrængning af marint infiltrationsvand.

I de eksisterende undersøgelser er der således ikke tale om, at vejsaltning hidtil har bevirket en massiv forøget kloridpåvirkning, men kun indikatorer, som peger på, at klorid fra vejsalt kan være en væsentlig kilde til forhøjet kloridindhold.

6.1.2 Kloridindholdet i modelområdets grundvand

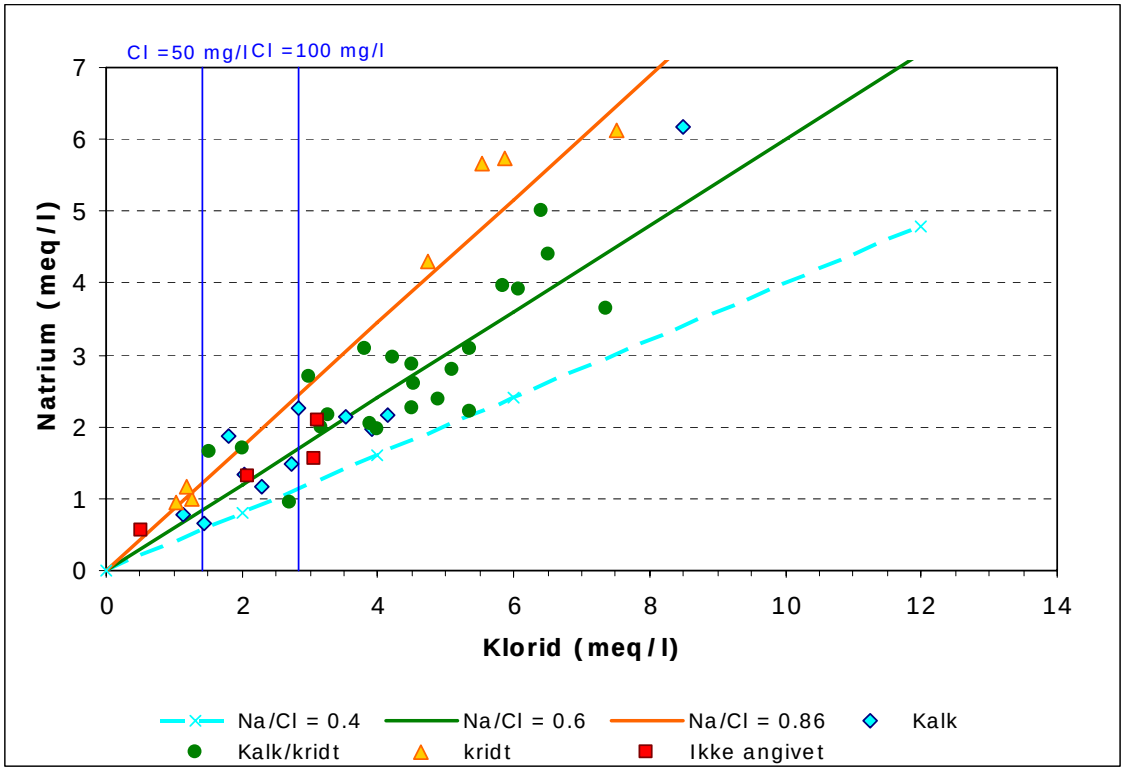
For at belyse den rumlige fordeling af kloridkoncentrationerne i modelområdet, er der i figur 6.2 vist kloridindholdet fra JUPITER datasættet og filterdybden. Her ses, at der er for hele modelområdet er en tendens til en høj kloridkoncentration ved overfladen, og at indholdet falder med dybden. Dette forhold skyldes dog sandsynligvis udelukkende, at filterdybder, hvor der erfaringsmæssigt findes forhøjede kloridkoncentrationer, bevidst undgås i forbindelse med udførsel af nye indvindingsboringer.

I figur 6.2 ses det, at Frederiksberg og Københavns kommuner har få boringer (samme dybde til filtertop), som hyppigt er analyseret, og hvor der er stærkt forhøjede koncentrationer. Disse boringer (f.eks. DGU nr. 201. 3791 og 201. 3822) fra GRUMO er generelt påvirkede af menneskelig forurening med bl.a. organiske opløsningsmidler og olierester, men er også tæt på større veje eller stærkt urbaniserede områder. Det forøgede kloridindhold kan derfor enten være udtryk for punktkildeforurening (forurenede grunde e.l.) eller skyldes diffus forurening fra vejsalt.



Figur 6.2. Kloridindholdet i modelområdets grundvand vist som funktion af dybden til filtertop. To delområder (Vestegnens Vandsamarbejde samt Frederiksberg og Københavns kommuner) er vist for overskueligheds skyld. Data fra JUPITER er medtaget fra og med det år hvor der er >9 analyser med samhørende data for klorid og dybde for de enkelte år. For hele modelområdet er 18 datapunkter ikke vist, da de indeholder >2.000 mg/l klorid.

For at vurdere om der er tale om ionbyttet vand i Vestegnen, er natrium som funktion af klorid i Vestegnens indvindingsboringer optegnet på figur 6.3. et ses, at for boringerne filtersat i Skrivekridtmagasinet ligger ionbytningsgraden på forholdet for havvand (0,86), og det er derfor sandsynligt, at kilden til klorid er residualt havvand (se også afsnit 4 og 5 vedr. ionbytning). Grundvand i Skrivekridtet er derfor generelt ionbyttet, og dette tyder på, at skrivekridtsmagasinet ikke bliver mere salt med tiden.



Figur 6.3. Natrium og kloridkoncentrationer sammenholdt med ionbytningsgrad og forskellige magasintyper.

For boringer med filtre i kalk eller kalk/kridt varierer forholdet mellem natrium og klorid mere end for boringerne filtersat i Skrivekridtet (figur 6.3). Der er her 30 boringer, som har et natrium-kloridforhold <0,8, hvilket vil sige, at grundvandet er omvendt ionbyttet, og kun otte boringer har ionbytning mellem 0,8 og 1,1, hvilket betyder, at grundvandet ikke er ionbyttet. Der er derfor relativt mange boringer i kalken med et lavt forhold mellem natrium og klorid, hvilket derved indikerer, at magasinet bliver mere saltholdigt med tiden enten fra menneskeskabte kilder (bl.a. vejsalt) eller fra optrængning af residualt havvand. Det har dog ikke været muligt at adskille de mulige kloridkilder fra hinanden i nærværende analyse.

6.1.3 Grundvandsmodel

Der eksisterer en kalibreret grundvandsmodel, opstillet i MIKE SHE systemet, som løbende er blevet opdateret i forbindelse med en række projekter under Vestegnens Vandsamarbejde (f.eks. Vestegnens Vandsamarbejde 2005, 2006a, 2006b og 2009b). Grundvandsmodellen dækker i alt 274 km^2. Afgrænsningen er vist på figur 6.1.

Modellen er udarbejdet i samråd med GEUS, og er godkendt af både GEUS og Københavns Amt til at kunne indgå som værktøj i vandressourceplanlægningen for Vestegnskommunerne, se Vestegnens Vandsamarbejde (2006a). I forbindelse med opsætning og kalibrering af modellen er der opsat en række kriterier for, at modellen ifølge Henriksen m.fl. (2001) er kalibreret på Hi-Fi niveau.

Tabel 6.1: Resume af modelpræstationer i forhold til de opstillede kriterier på blandt andet middelafvigelse (ME), middelværdien af kvadratafvigelsessummen(RMS) samt et vandbalance (FBal) for vandløbsafstrømninger.

Model	Kriterie	Modelpræstation	Kriterie opfyldt
Stationær	ME < 0,35 m	-0.26	√
	RMS < 1,75 m	1.19	√
	90% < FBal < 110%, for afstrømningen aggregeret over alle stationer og alle årene.	95 %	√
	80% < FBal < 120%, som max. afvigelse for enkeltstationer for alle årene	≤10 % for alle stationer	√
	Realistiske parameterstørrelser		√
	Inhomogen fordeling af residualer		√
Dynamisk	ME < 0,35 (kalibrering/validering)	-0.07/0.44	(√)
	RMS < 1,75 m (kalibrering/validering)	1.54/1.50	√
	90% < FBal < 110%, for afstrømningen aggregeret over alle stationer og alle årene (i valideringsperioden)	103 %	√
	80% < FBal < 120%, som max. afvigelse for enkeltstationer for alle årene (i valideringsperioden)	Kun 52.40 overskrider (126 %)	(√)
	70% < FBal < 130%, som max. afvigelse for enkeltstationer for enkelte år (i valideringsperioden)	Kun 53.08 og 53.ST overholder kravet	
	Realistiske parameterstørrelser		√
	Inhomogen fordeling af residualer		√

Tabel 6.1 viser et kort resume af modelpræstationerne i forhold til de opstillede kriterier ved kalibreringen udført i 2005/2006, og generelt præsterer modellen ganske godt. Modellen har dog ikke været i stand til at simulere vandbalancen inden for de enkelte vandløbsoplande i de enkelte år, men dette kan delvis skyldes, at de observerede data ved vandføringsstationerne er meget usikre. Vandløbsstationerne er påvirket af opstuvning (station 53.08), overløbsbygværk, hvorfra der pumpes (Station 53.10), samt vandføringsdata for 53ST (fiktiv station) er fiktive estimeret vandføringsdata, og station 52.40 er placeret meget tæt ved modelranden og har en meget lav vandføring.

De observerede vandføringsdata er således meget usikre, og vandføringen i vandløbene er desuden meget påvirket af tilledninger afværgevand, regnvand fra de befæstede arealer, som tilledes via forsinkelsesbassiner, og det har derfor været ganske vanskeligt at gennemføre og vurdere, om kalibreringen er tilfredsstillende i forhold til vandføringsdataene, se Vestegnens Vandsamarbejde I/S (2006a). Modellen er siden den oprindelige kalibrering i 2006 (Vestegnens Vandsamarbejde I/S, 2006a) løbende blevet opdateret i forhold til inddata (indvindinger mv.), og kalibreringen er desuden blevet forbedret på baggrund af nyere prøvepumpninger, samt en række stoftransportsimuleringer.

Der er i grundvandsmodellen indlagt vandindvindings- og klimadata for perioden 1981-2007 samt afværgeoppumpninger og udledning til vandløb. Modellen er vertikalt opdelt i 8 geologiske lag med hver sin fordeling af hydrauliske parameterværdier, se tabel 6.2 og diskretisering for den geologiske model i det horisontale plan er 100x100 meter. For den eksiste-

rende model er der 6 vertikale beregningslag, som følger de geologiske lag. Dog inkluderer det første beregningslag størstedelen af den kvartære lagpakke, se tabel 6.1. Oprindeligt er modellen opsat i 250x250 meter net, men ved modelsimuleringer i dette projekt er grundvandsmodellen opsat i 50x50 meter net, hvilket giver 129.315 beregningspunkter pr. beregningslag.

Tabel 6.2: Opdeling i geologiske og model beregningslag, se Vestegnens Vandsamarbejde I/S (2005); 2006a).

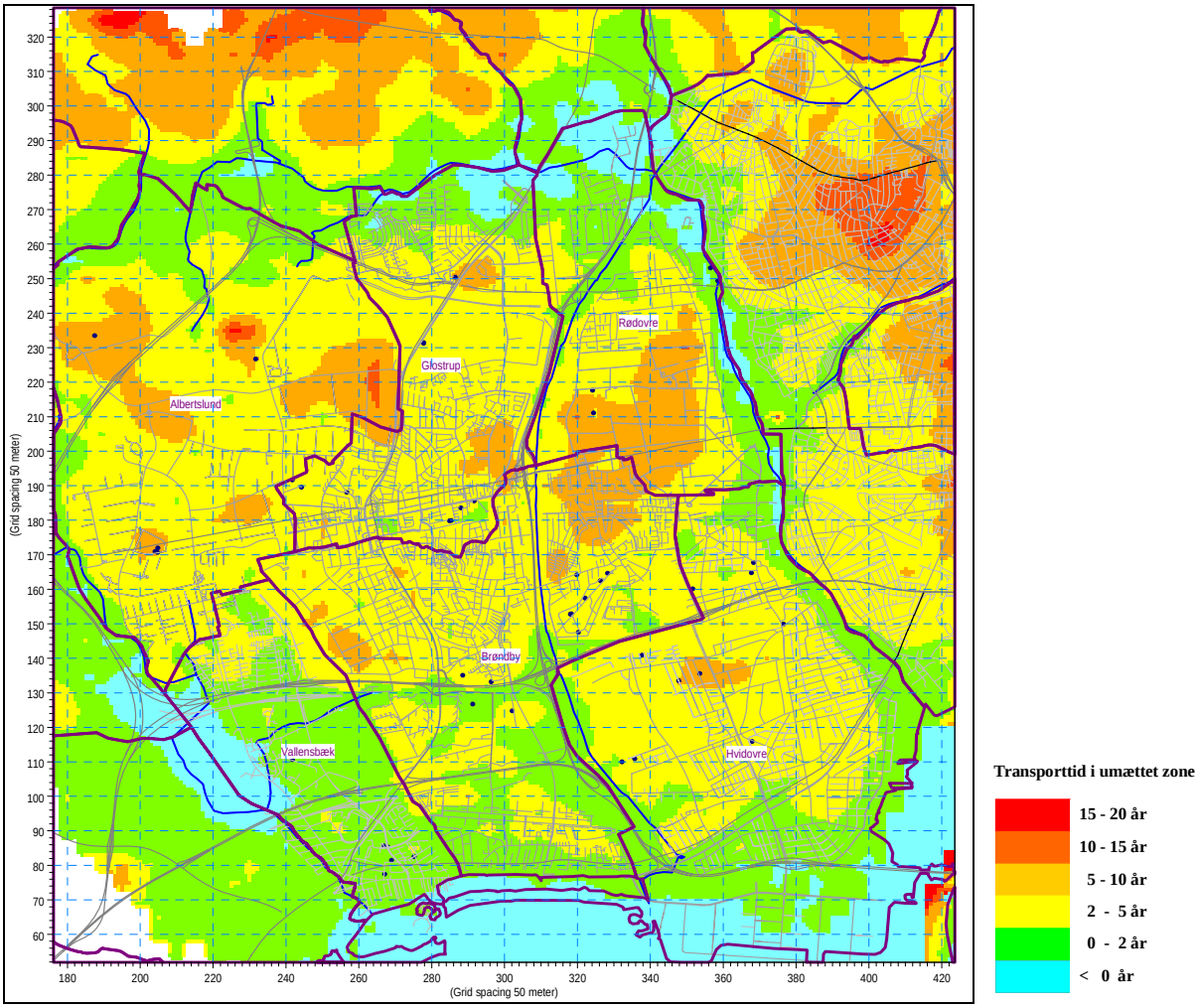
Geologisk lag	Repræsenterende følgende geologi	Beregningslag
Top	Tørv, gytje, muld, overjord og eventuelt sand og grus	Lag 1
Øvre ler	Ler over det sekundære magasin	
Øvre sand/grus	Det sekundære magasin	
Nedre ler	Leret over det primære magasin	
Nedre sand grus	Det primære magasin sammen med den underliggende opsprækkede kalk	
Kalk	Opsprækket Danienkalk (udgør sammen med Nedre sand/grus det primære magasin)	Lag 2
Nedre Kalk	Kalk/mergel/flint – lavpermeabelt lag, som adskiller det primære magasin og den vandførende horisont i skrivekridtet	Lag 3
Skrivekridt	Den vandførende horisont i skrivekridtet, hvorfra der indvindes vand på Glostrup Hovedvandværk og Hjælpevandværket	Lag 4

I modellen er der anvendt nettonedbør, som er beregnet eksternt i rodzonemodellen Daisy. Nettonedbøren er herefter konverteret til MIKE SHE, således at MIKE SHE ikke beregner nettonedbøren. Denne metode er den samme fremgangsmåde, som er anvendt i det tidligere Københavns Amts model kaldet KAM-modellen (Københavns Amt, 2005), og det har været et ønske fra det tidligere Københavns Amt for bedre at kunne sammenholde resultater fra Vestegnens model med amtets model (KAM-modellen). Rodzone modellen Daisy er ikke blevet opdateret siden 2003, og det er derfor ikke muligt at beregne nettonedbøren for perioden 2004-2007, idet den anvendte modelopsætning til Daisy ikke er tilgængelig. Det har derfor været nødvendigt at anvende en midlet nettonedbør i den dynamiske model, dækkende perioden fra 2003 og frem, mens der for de stationære modeller altid anvendes en midlet nettonedbør.

Det er således ikke muligt med Vestegnens grundvandmodel at beregne transporthastigheden ned igennem den umættede zone, og derfor er den gennemsnitlige transporttid *t* fra kilden til det primære magasin vurderet ved følgende udtryk

$$t = \frac{d \cdot \theta_{eff}}{N}$$

hvor N er nettoinfiltrationen, θ_{eff} er den effektive vandfyldte porøsitet, og d er transportlængden fra kilden til det primære magasin. Transportlængden er estimeret ved at beregne difference mellem topografien og grundvandspotentialet i det primære magasin, og ved at anvende en effektiv porøsitet på 10 % fås estimatet på transporttiden, som angivet i figur 6.4. Det ses, at for Vestegnens Kommuner generelt er en estimeret transporttid under 5 år.



Figur 6.4: Estimat fra grundvandsmodellen for transporttid fra jordoverfladen til det primære magasin i Værkstedsområdet.

Stoftransportmodellen simulerer vejsaltets skæbne i grundvandet over en periode fra 1967 og frem til 2060, men perioden er delt op i tre faser på grundlag af inddataene.

- Fase I forløber fra 1967-1981 og her er strømningsmodellen en stationær model med indvindinger svarende til 1981. Datagrundlaget for forbruget af vejsalt før 1967 er svagt, og det vurderes, at forbruget har været lavt, se figur 3.9 med saltleverancer.
- Fase II, som forløber fra 1981-2007, hvor strømningsmodellen en dynamisk model med varierende indvindinger og daglige nettonedbør værdier. Dog er der anvendt en middelværdi af netto-nedbøren for hele perioden fra 1981-1991 samt 2003-2007, idet nettonedbøren for disse perioder ikke er blevet beregnet

ekstern med Daisy modellen (Københavns Amt, 2005). Der er for denne periode anvendt varierende estimerede forbrug af vejsalt pr. vintersæson, forløbende fra oktober til og med marts måned.

- Fase III er et fremtidsscenario, hvor strømningsmodellen igen er en stationær model, med midlet nettonedbør og estimerede indvindingsmængder hovedsageligt bygget på indvindingsmængderne i 2007, dog justeret med viden omkring kendte lukninger eller oprettelse af vandvindinger. Vejsaltforbruget efter sæsonen 2007/2008 er konstant og er estimeret ud fra de foregående år.

I stoftransportmodellen antages det, at transporten i opsprækket kalk kan beskrives ved et sæt effektive parametre, hvilket kaldes en ækvivalent porøs medium model. Det er valgt at anvende en effektiv porøsitet i kalkmagasinet på 10 %. Den effektive porøsitet på 10 % er en blanding af sprækkeporøsitet og den del af matricens porøsitet, som bidrager i transportprocesserne. Volumen af sprækker over hele kalkmagasinets volumen udgør typisk ca. 1-5 %, hvilket kaldes sprækkeporøsitet, mens porøsitet af selve matricen er i størrelsesorden 20-35 % (fx R&H Bulletin, 1991; Jacobsen, m.fl., 1993; Brettmann m.fl., 1993; Vestegnens vandsamarbejde I/S, 2009c). Den effektive porøsitet er således behæftet med en vis usikkerhed, men sammenholdt med de andre usikkerheder eksempelvis på kildestyrkemodellen, strømningsmodellen og transporten igennem umættet zone, vurderes det at være en acceptabel usikkerhed.

6.2 Risikovurdering med modelsimuleringer

Modelsystemet, til på oplandskala at risikovurdere truslen fra vejsalt på grundvandsressourcen og konsekvenserne af forskellige tiltag, er opbygget af 3 modeltyper:

1. En kildestyrkemodel,
2. En model for umættet strømning (se figur 6.4) og
3. En model for strømning i mættet grundvandszone.

En kildestyrkemodel for værkstedområdet Vestegnen er opstillet ved hjælp af følgende fremgangsmåde:

- Indsamle data vedr. forbrug af vejsalt, herunder eventuelle punktkilder såsom saltoplagringspladser og snedepoter.
- Opstille en kildestyrkemodel på baggrund af input af vejsalt, tab ud af systemet via overfladevandssystemet (bassiner, vandløb, dræn og kloakker mv.), og tab til grundvandet.
- Kildestyrkemodellen leverer klorid fluks til grundvandszonen, som vil variere både i tid og sted.
- Efter at modellen har simuleret kloridkoncentrationerne frem til nu, køres der en række prædikative simuleringer, der illustrerer konsekvenserne for grundvandsressourcen af 1) fortsættelse af det nuværende vejsaltsforbrug, 2) reduceret forbrug (f.eks.: 75 %, 50 %, og 25 %) eller 3) reduceret forbrug inden for udpegede sårbare zoner.

Dataindsamling og vurdering af historisk vejsaltforbrug

I forbindelse med en rapport udarbejdet af Rambøll for Vestegnens Vandsamarbejde (Vestegnens Vandsamarbejde, 2009a), er der indhentet data vedrørende det kommunale forbrug af vejsalt inden for Vestegnens Vandsamarbejdes interesseområde tilbage til vinteren 2001/2002. Desuden er der indhentet data om placering af nuværende og tidligere saltlagre, snedeponier og kunstgræsbaner samt andre steder, hvor der saltes meget. Forbruget på statsveje og amtsveje i det gamle Københavns Amt fra før efteråret 2007 og statsveje efter foråret 2007 for Vejcenter Hovedstaden er fundet på www.vintertrafik.dk, som ejes af Vejdirektoratet.

I Tabel 6.3 ses indhentede data. Trods manglende data, er der et rimeligt overordnet billede af forbruget af vejsalt fra vinteren 2001/2002 og frem. Fordelingen på vejtyper, herunder mængder på stats- og amtsveje i Vestegnen, er dog ikke kendt. For København Kommune er der desuden fundet ældre data for vejsaltforbruget, dækkende perioden fra 1970/71 til 1989/90 i referencen Frederiksberg Kommune(1991), og disse data er også anvendt i estimeringen af vejsalt forbruget inden for Frederiksberg Kommune.

Tabel 6.3: Forbruget af vejsalt for Vestegnens Kommuner (Vestegnens Vandsamarbejde, 2006), samt Frederiksberg Kommune og Københavns Kommune (indhentet via dette projekt fra de respektive kommuner). Data fra Københavns Amt/vejcenter Hovedstaden.

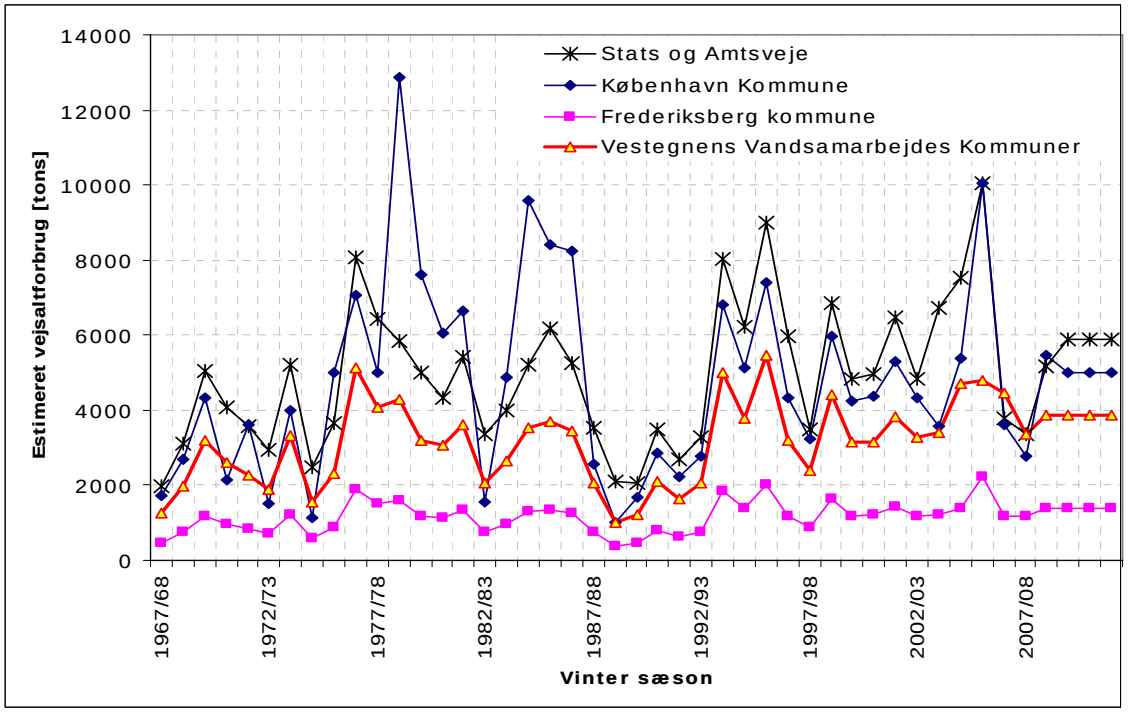
Kommune		2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09
Albertslund	Tons tørsalt	700	444	722	?	797	1.022	629	
Brøndby	Tons tørsalt	600*	600*	600*	600*	600*	600*	600*	
Glostrup	Tons tørsalt				1.041	1.100	472	310	
Hvidovre	Tons tørsalt			427	1.265	874	1.713	833	
Rødovre	Tons tørsalt	600	600	632	701	907	238	603	
Vallensbæk	Tons tørsalt	400	400	400	400	500	400	400	
København	Tons tørsalt			3.562	5.361	10.067	3.632	2.795	5.479
Frederiks-berg	Tons tørsalt				1.400	2.233			
Københavns Amt		NB: efter foråret 2007 er det Vejcenter Hovedstaden							
		2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09
Stats-veje	Tons tørsalt		3.129	3.208	3.379	4.392	2.993	4.390	7.872
Amts-veje	Tons tørsalt		2.128	2.393	2.453	3.083	2.144		

I Vestegnens Vandsamarbejde (2009a) har man ikke vurderet vejsaltforbruget tilbage i tiden før 2001/02 for hverken statsveje, amtsveje eller de kommunale veje, hvilket er nødvendigt for at simulere den historiske udvikling i saltforbruget inden for Vestegnens Vandsamarbejdes interesseområde. De historiske tidsserier for vejsaltforbruget i området er

derfor i nærværende udredning forsøgt estimeret ved at finde en korrelation mellem de eksisterende data fra vinteren 2001/2002 og frem, og de totale leverancer af salt (natriumklorid) til stat, amter, og kommuner samt antal dage med frost og evt. nedbør under en vintersæson for Københavnsområdet.

Der er en række usikkerheder ved denne øvelse, idet eksempelvis de totale leverancer af salt for en sæson ikke direkte er lig med saltforbruget i den pågældende sæson. Stigningen i vejnettet i hele landet følger ikke udviklingen i urbaniseringsgraden i Københavnsområdet. Privates forbrug af vejsalt i området kendes ikke (se afsnit 3.6), og er ikke medtaget, da det antages at udgøre mindre end 10 % af det offentliges. Der er anvendt en linear korrelation mellem forbruget i Vestegnens Kommuner og de totale leverancer af salt til alle landets kommuner. Med hensyn til stats- og amtsveje er der anvendt en linear korrelation mod de totale leverancer af salt til stats- og amtsveje.

Tidsserier med det estimerede vejsaltforbrug, som er implementeret i modellen, er vist i figur 6.5. Forbruget er behæftet med stor usikkerhed. Dog er forbruget for Københavns Kommune kendt for periode 1970-1990, idet forbruget er opgivet i Frederiksberg Kommune, 1991.



Figur 6.5: Tidsserier med estimerede historiske kommunale vejsaltforbrug og forbruget på stats- og amtsveje.

6.2.1 Vejsaltets fordeling på vejklasser

Det estimerede historiske vejsaltforbrug skal fordeles på vejnettet, således at kildestyrken kan implementeres i MIKE SHE modellen. Vejmyndighederne, herunder kommunerne, udarbejder et regulativ for vintervedligeholdelse og renholdelse af veje, stier, fortove og pladser. I regulativet anvises typisk, hvorledes vintervedligeholdelsen udføres efter en prioriteret plan, hvor veje, stier, fortove og pladser inddeles i klasser. Opdelingen i vejklasser bygger på, om vej eller stisystemet er primære eller sekundære trafikårer. Private veje og stier indplaceres i laveste klasse ved vurderingen af vejsaltforbruget. Vestegnen gennemskæres ligeledes af statsveje og andre kommunale veje (tidligere amtsveje), hvor Vejcenter Hovedstaden forestår udførelse af vintertjenesten (se figur 6.6).

Vejsaltets fordeling vurderes i det følgende for statsveje og amtsveje i Københavns Amt, København og Frederiksberg Kommuner og sidst i Vestegnskommunerne.

Figur 6.6: Vintertjenesten under Vejcenter Hovedstaden (Vejdirektoratet). De røde veje er statsveje og de blå veje er de kommunale veje, som Vejcenter Hovedstaden vinter-vedligeholder.

<u>Stat og Københavns Amt</u>

Statsveje og de tidligere amtsveje er helt overvejede primære trafikårer, som må forventes at have 1. prioritet. Vejene er delt op i tre klasser på baggrund af vejklasseopdelingen i DDO vektor kort. Det estimerede forbrug af vejsalt for statsveje og Københavns Amt fordeles ved at antage, at vejbredden for vejklasserne I og II er 14 meter og klasse III er 10 meter. Herved beregnes de totale vejarealer for hver vejklasse, og da det antages, at der anvendes samme mængde salt pr m^2, kan saltforbruget beregnes.

<u>København og Frederiksberg Kommuner</u>
For de primære ruter er der anvendt samme saltforbrug pr. m^2 vej, som er beregnet for stats- og amtsveje i forrige afsnit, mens den resterende vejsaltsmængde for København og Frederiksberg Kommuner er fordelt ligeligt på de sekundære veje.

<u>Vestegnens Kommuner</u>
I udredningsprojektet, udarbejdet af Rambøll for Vestegnens Vandsamarbejde (Vestegnens Vandsamarbejde, 2006), er der indhentet GIS-temakort fra Vestegnens kommuner med kommunernes klassifikation af vej- og stiklasser samt vurdering af saltforbruget for de forskellige klasser. Kommunerne har opdelt deres vej- og stinet på forskellig vis. Eksempelvis arbejder Hvidovre Kommune med 4 vejklasser og 2 stiklasser, mens Albertslund Kommune anvender 2 vejklasser og stiklasser. Kun Albertslund og Vallensbæk kommuner har estimeret forbruget af vejsalt anvendt på de forskellige vejklasser ud fra en vurdering om, at 2/3 anvendes på klasse I-veje og 1/3 på klasse II-veje.

Vejsaltet er fordelt ens i forhold til vejlængderne, da der ikke foreligger en fordeling af vejsaltforbruget mellem vejklasser, og da opdelingen af vejklasser heller ikke er ensartet inden for Vestegnens Kommuner.

6.2.2 Vejsaltets transportveje til det omgivende miljø i Vestegnen

I afsnit 3.6 gennemgås projektets koncept for forbrug og tab af vejsalt til omgivelserne (se figur 3.8 og 3.9). Konceptet præsenteret i afsnit 3.6 danner dermed grundlag for risikovurderingen her i kapitel 6.

Vejdirektoratet og Skov & Landskab (2001) vurderer, at op til 30 % (15-30 %) af vejsaltet ender i rabatten under danske forhold. Men det er ikke sikkert, at hele denne mængde vil infiltrere til grundvandet, da en del ledes bort som overfladevand i løbet af vinteren. Det må derfor forventes, i et tæt bebygget og befæstet område som Vestegnen, at en del af saltet vil blive opfanget af dræn eller kloakker, og at mindre end de 30 % ender i grundvandet.

I Pedersen og Ingerslev (2007) refereres et canadisk studium (Howard & Haynes, 1993), hvor koncentrationer og strømningshastigheder blev målt detaljeret over 3 år, og det blev fundet, at kun 45 % af den tilførte vejsalt blev fjernet via overfladeafstrømning. Det canadiske studie vurderer derfor, at hele 55 % var tilgængeligt for grundvandet. Det er i Pedersen og Ingerslev (2007) ikke beskrevet, om undersøgelsesområdet var beliggende i et veludbygget urbant område med høje kantsten, kloakker, dræn m.v., eller om det var en vej i mere landlige omgivelser med større risiko for tab til grundvandet. Ligeledes konkluderer

Pedersen og Ingerslev (2007) fra en række andre danske undersøgelser, at der i gennemsnit tabes ca. 25 % af det tilførte vejsalt til jorden nær gader og veje.

Overordnet er tabet til omgivelser altså fra 15 op til 55 %, hvoraf en del med sikkerhed indfanges i dræn eller lignende langs vejene. Tabet kan for nogle veje næsten sættes til nul, idet der er kloakeret, hele vejbanen og rabatter er befæstede og langs siderne er der placeret en støjmur (se f.eks. figur 6.7). På baggrund af ovenstående vurderes det, at der i det meget urbaniserede område, som Vestegnen udgør, vil være et tab af vejsalt til grundvandet af størrelsesordenen 10-20 % af det samlede forbrug. Hvorvidt denne anslåede tabsprocent har været konstant igennem vejsaltningens historie vides ikke.

Figur 6.7: Billede, som viser en moderne motorvej (motorringvej O3) ved København, hvor det direkte tab af vejsalt til grundvandet må være meget begrænset pga. effektiv afskærmning af vejen samt opsamling og bortledning af vejvandet.

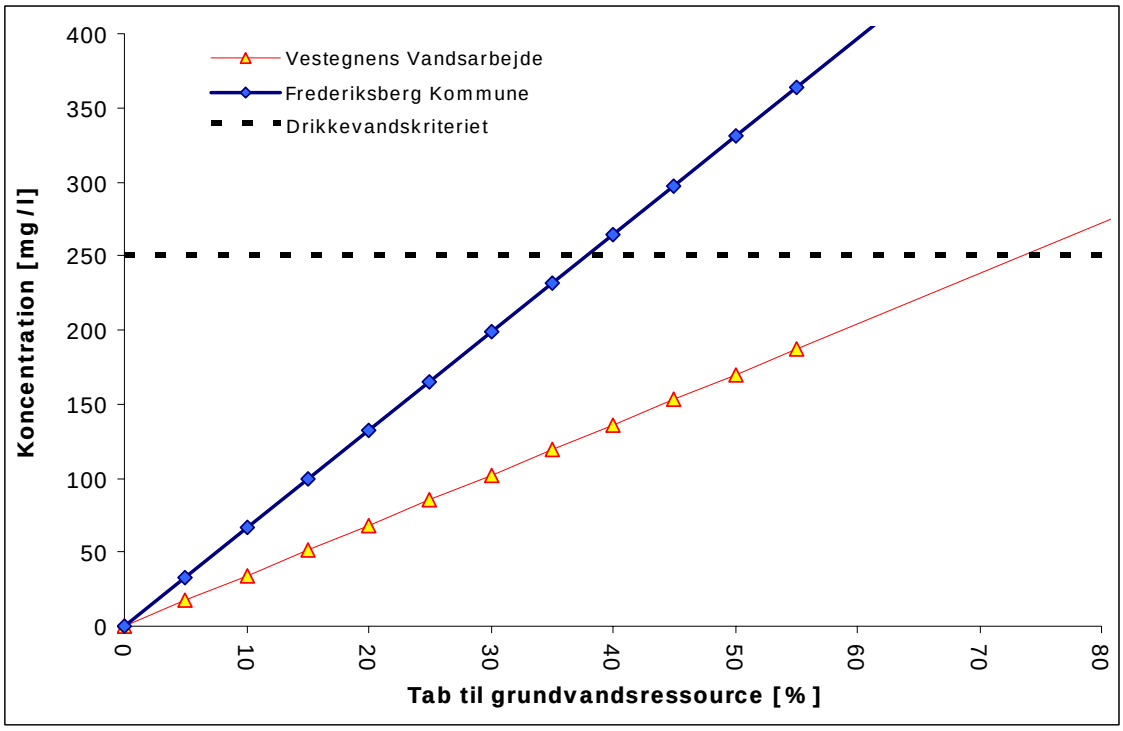
6.2.3 Opstilling af model og modelscenarioer

Inden selve modelleringen er påbegyndt, er der udført simple overslagsberegninger, som er udført for at vurdere dels kildestyrkemodellen, og om stofbelastningen er stor nok til at udgøre en reel risiko for områdets vandindvindinger. I den ene af disse overslagsberegninger beregnes koncentrationen i infiltrationsvandet ved hjælp af grundvandsdannelse, anvendt mængde vejsalt og estimeret tab til omgivelserne. Der ses i første omgang på området, som dækkes af Vestegnskommunerne:

Følgende antagelser er anvendt:

- Den gennemsnitlige grundvandsdannelse er beregnet i Vestegnens Vandsamarbejde (2006b) til 17,825 mio. m^3 pr. år inden for Vestegnens Kommuner, svarende til 177 mm pr. år.

- Det antages, at der er anvendt 10.000 tons vejsalt om året, hvilket er i den høje ende af forbruget. Men da en del af oplandene for indvindinger leverer drikkevand til eksempelvis Københavns Kommune, vurderes det rimeligt i overslagsberegningen.
- Kloridindholdet antages at udgøre ca. 60 % af vejsalt, da vejsalt hovedsageligt består af NaCl (se afsnit 3.8).
- Tabsprocenten til grundvand ligger mellem 15-55 %, men sandsynligvis nærmere de 15-20 %, idet saltningen hovedsagligt vil ske på befæstede arealer med god overfladisk dræning til kloak og/eller regnvandsledninger.



Figur 6.8: Simpel massebalance til at vurdere størrelsesordenen af forventede kloridkoncentrationer i grundvandet forårsaget af vejsaltning. Beregningen for Frederiksberg er foretaget på grundlag af data fra Hjuler, m.fl. (2007).

Det fremgår af figur 6.8, at vejsalt kan bidrage til et kloridproblem i Københavnsområdet, herunder Vestegnen. Hvis tabet til grundvandet er i størrelsesordenen 10-20 %, er bidraget mellem 40-125 mg/l for Københavns området, afhængig af, om der ses på kurven for Frederiksberg eller Vestegnens Kommuner. Der skal således være andre kloridkilder for at niveauet kommer over drikkevandsgrænsen. Dog kan der naturligvis stadigt være lokale problemer, idet figur 6.8 bygger på nogle meget forsimplede overslagsberegninger.

Hvis tabet af vejsalt derimod er i størrelsesordenen 55 %, som angivet i det canadiske studie af Howard & Haynes (1993), vil gennemsnitskoncentrationen i grundvandsmagasinet for klorid hidrørende fra vejsalt blive tæt på drikkevandskriteriet på 250 mg/l, og nær veje endnu højere.

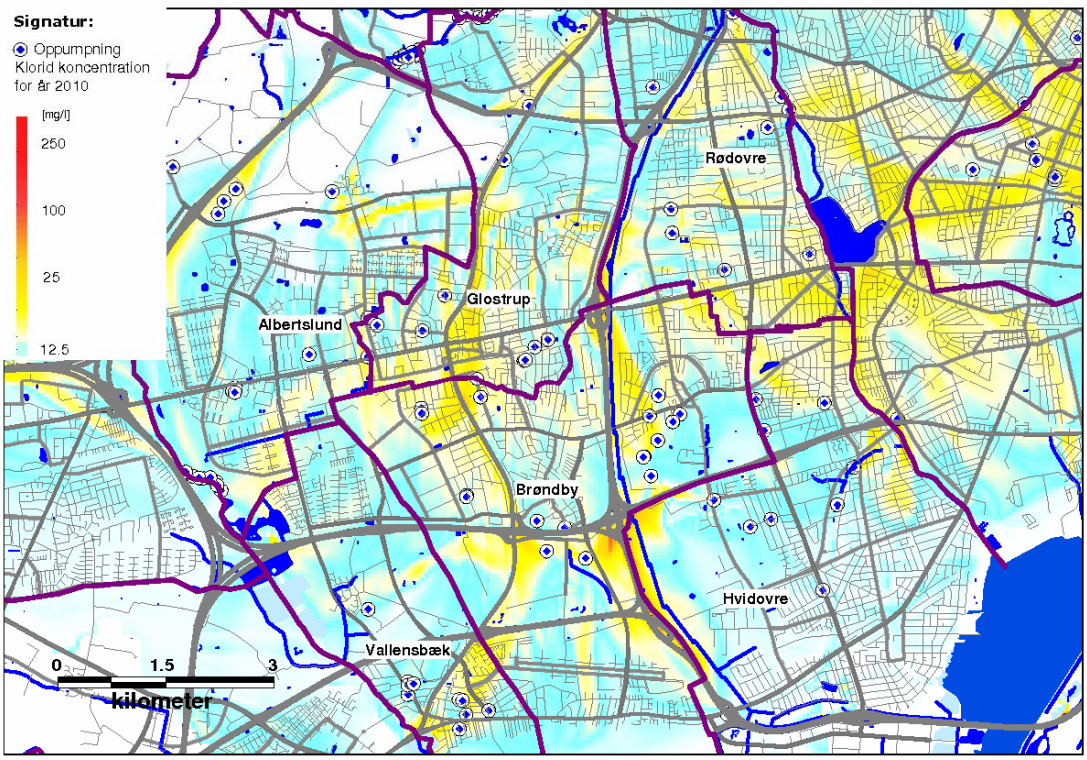
6.3 Modelresultater og varighedsvurdering

Modelresultaterne består dels af en referencesimulering med den nuværende vejsaltning og en række prædikative simuleringer med et reduceret forbrug, der illustrerer konsekvenserne for grundvandsressourcen ved et reduceret forbrug. I scenarierne regnes der med 15 % tab af vejsalt, men et ”worst-case scenario”, med eksempelvis et tab på 50 %, kan vurderes ved at multiplicere resultaterne med en faktor 3.33.

For værkstedsområdet har det ikke været muligt at adskille kilderne til klorid i grundvandet, eller vurdere baggrundsniveauet uden vejsaltning, og det har derfor ikke været mulig at udføre en kalibrering af hverken kildestyrkemodellen eller selve transporten af kloridet i grundvandet. Modelresultaternes formål er derfor dels at vurdere om det er sandsynligt, at koncentrationerne har nået et stationært niveau, dels om det er en regional eller kun en lokal påvirkning af grundvandsressourcen, samt vurdere effekten af tiltag overfor forureningen fra vejsalt, herunder varighed.

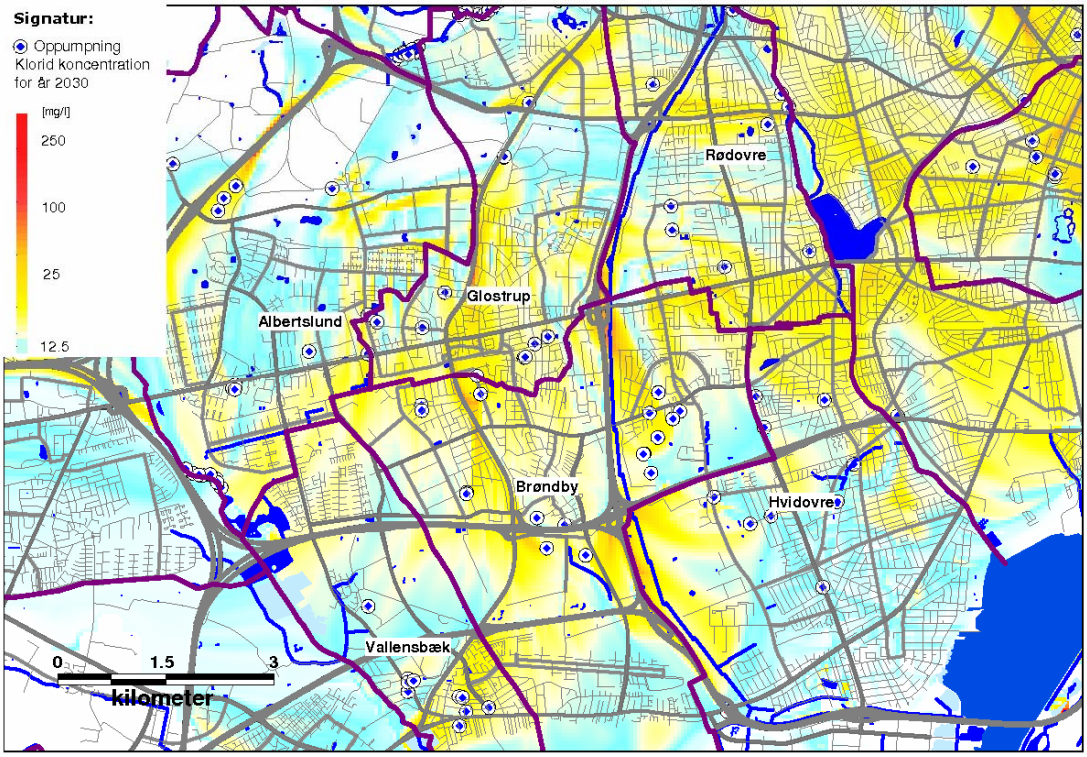
6.3.1 Referencesimulering

I det følgende vises den tidslige variation af kloridindholdet i grundvandet for scenariet med et tab på 15 % til grundvandet(figur 6.9-6.12). Det ses, at hele de bynære områder bliver påvirket af vejsaltningen, men også at der går meget langt tid, inden en stationær situation er opnået. Der er således ikke opnået en stationær situation ved år 2010, mens den visuelle forskel mellem resultaterne i år 2030 og 2060 er minimal. Dog ses, at der ikke er opnået en stationær situation i 2030 i de udvalgte gennembrudskurver vist figur 6.12, idet der stadig er en svag stigning i kloridkoncentrationerne, til trods for at strømningsbilledet og kildestyrken har været fikseret i mere end 20 år (siden årsskiftet 2007/2008).

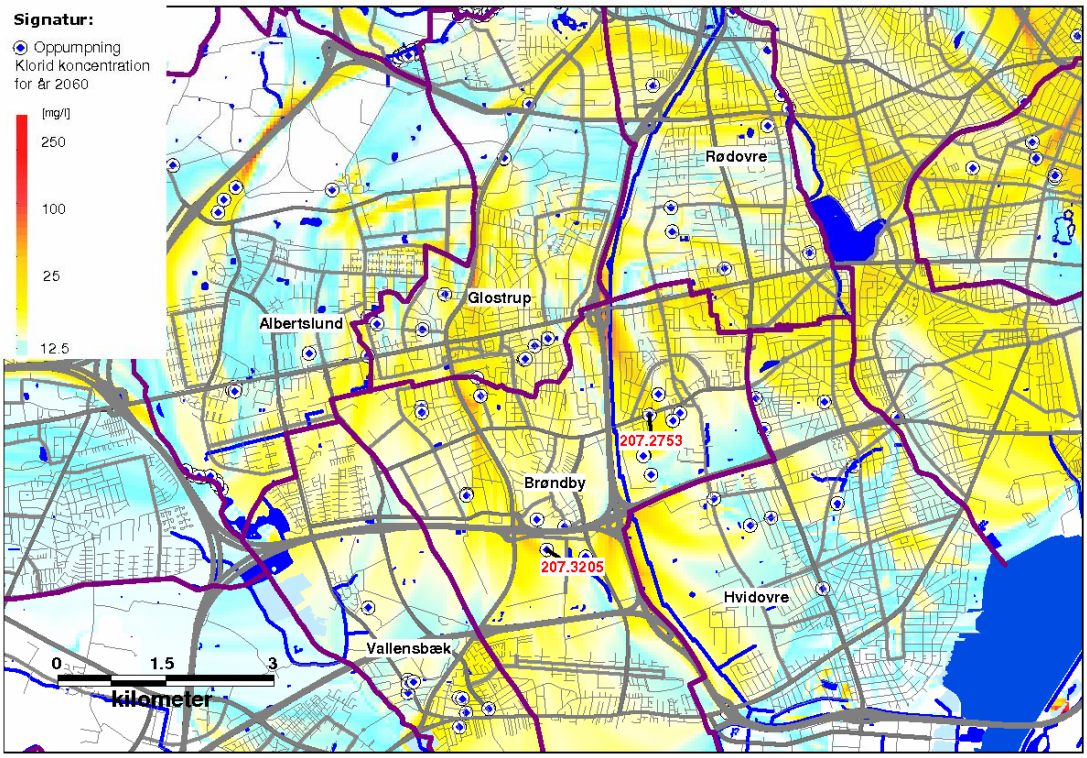


Figur 6.9: Kloridkoncentration forårsaget af vejsalt i det primære magasin for år 2010. Simuleringen er med et tab af vejsaltsforbruget på 15 % til grundvandet.

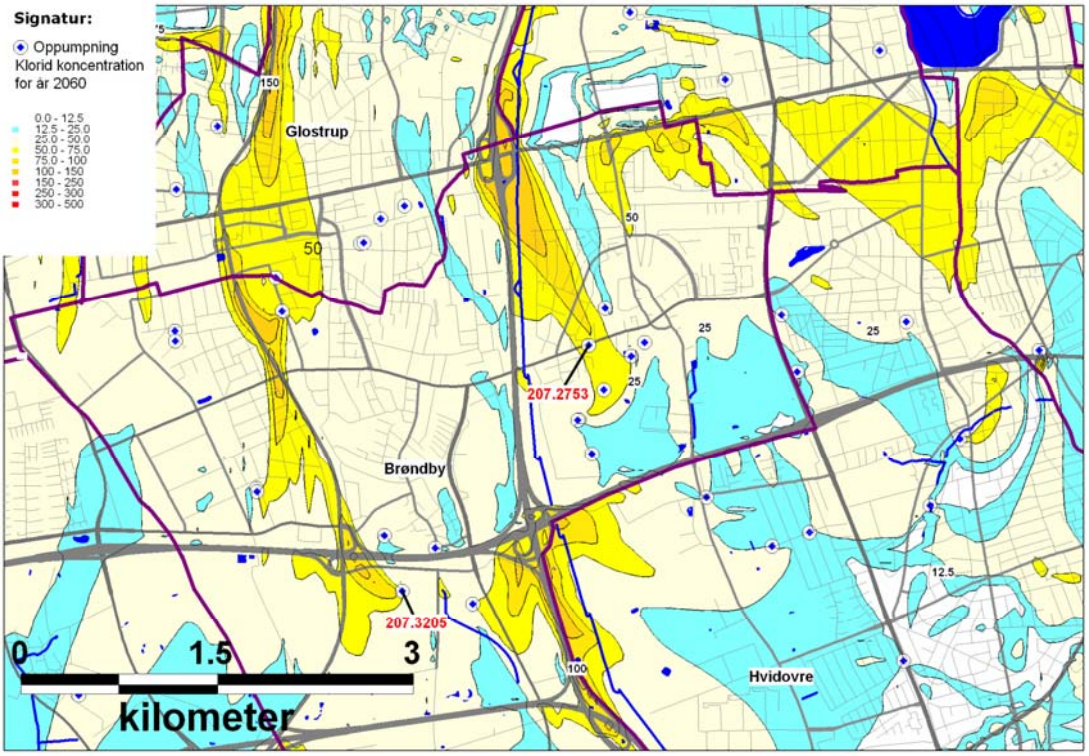
På figurerne 6.9-6.11 ses den tidslige udvikling i kloridkoncentration fra vejsaltning i Værkstedsområdet, og der en tydelig vejsaltpåvirkning langs motorvejen O3 på grænsen mellem Hvidovre, Vallensbæk, igennem Brøndby Kommune, og langs grænsen mellem Rødovre og Glostrup Kommune.



Figur 6.10: Kloridkoncentration forårsaget af vejsalt i det primære magasin for år 2030. Simuleringen er med et tab på 15 % af vejsaltsforbruget til grundvandet.



Figur 6.11: Kloridkoncentration forårsaget af vejsalt i det primære magasin for år 2060. Simuleringen er med et tab på 15 % af vejsaltsforbruget til grundvandet.



Figur 6.12: Kloridkoncentration forårsaget af vejsalt i det primære magasin for år 2060. Simuleringen er med et tab på 15 % af vejsaltsforbruget til grundvandet. Udsnit af figur 6.10 omkring de 2 indvindingsboringer, hvorfra der er vist gennembrudskurver i figur 6.12.

Generelt er stigningen i grundvandets kloridindhold omkring 25-40 mg/l som følge af vejsaltningen, men meget ulige fordelt over værkstedsområdet (figur 6.9-6.11). Ved de større vejbanefletninger dannes der i flere tilfælde en fane af klorid med koncentrationer over 100 mg/l tæt ved vejbanefletningen, mens der ved andre vejfletninger ikke dannes en kloridfane. Dette skyldes de lokale strømningsforhold. For eksempel kan der være opadrettet gradient mod overfladevandsystemer som ved St. Vejle Å eller Vallensbæksøerne. I den sydlige del af Hvidovre Kommune er påvirkninger fra vejsaltet ligeledes i væsentligt lavere, hvilket skyldes, at der sker terrænnær dræning i modellen, blandt andet ved den sydlige del af Motorvej E20.

Figur 6.12 er et udsnit af figur 6.10 som illustrerer hvordan modelleringsresultaterne ved 15 % tab fordeler vejsaltet i grundvandet i de centrale dele af værkstedsområdet. Her ses, at >50 mg klorid pr. liter kan findes i grundvandet nedstrøms dele af de større veje i området, men at kloridkoncentrationer >100 mg/l kun opstår lokalt nedstrøms vejbanesammenfletninger og hvor en større vej løber parallel med grundvandets strømningsretning.

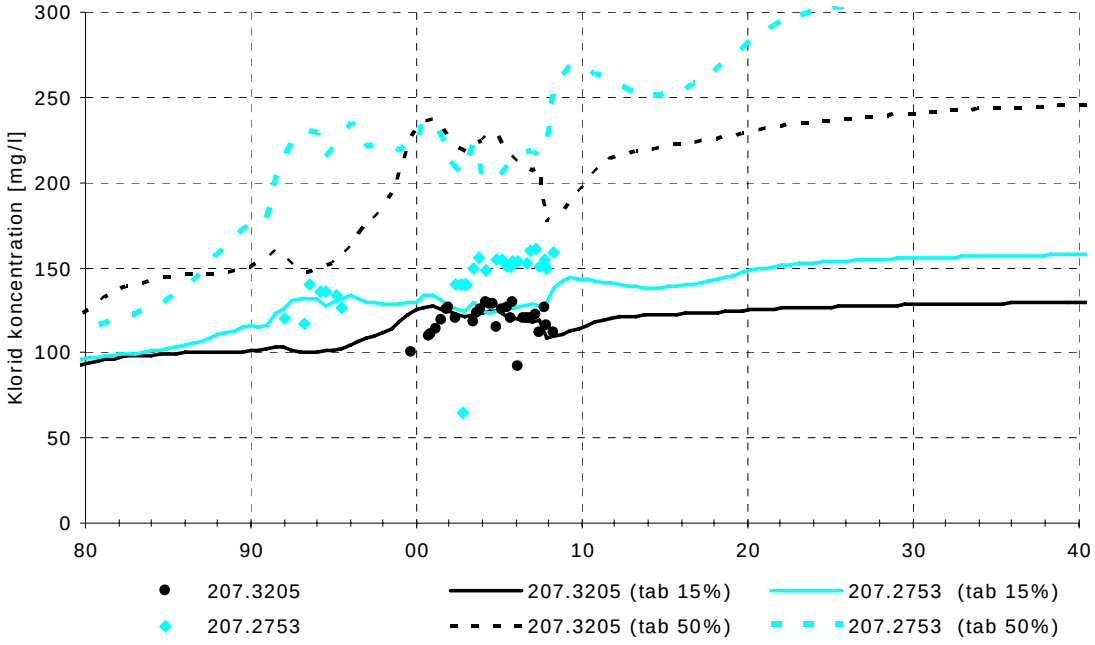
Der er udarbejdet gennembrudskurver for samtlige vandforsyningers indvindingsboringer inden for Vestegnens Vandsamarbejde, men i figur 6.13 er der kun vist to indvindingsboringer fra Brøndby Vandforsyning som illustration.

Der er udvalgt to boringer (DGU nr. 207.2753 og DGU nr. 207.3205) fra Brøndby Vandforsyning, idet fladekortet (figur 6.12) viser, at disse boringer kan være påvirket af vejsaltning.

I rapporten Vestegnens Vandsamarbejde (2009a) blev det desuden vurderet, at grundvandet er ungt og kraftigt påvirket af pyrit-oxidation og omvendt ionbytning, som tyder på, at magasinet bliver mere salt med tiden.

Boringen (DGU nr. 207.2753) indvinder primært fra Danienkalk, men der er også en indstrømningszone i Skrivekridtet. Niveauspecifikke prøver i kalken har indikeret, at kloridkoncentrationen er højest i toppen af kalken. For boring DGU nr. 207.3205 er der ikke udført flowlog eller taget niveauspecifikke prøver. I Vestegnens Vandsamarbejde (2009a) vurderes det, at den mest sandsynlige kilde til forhøjet kloridindhold i denne boring er vejsaltning.

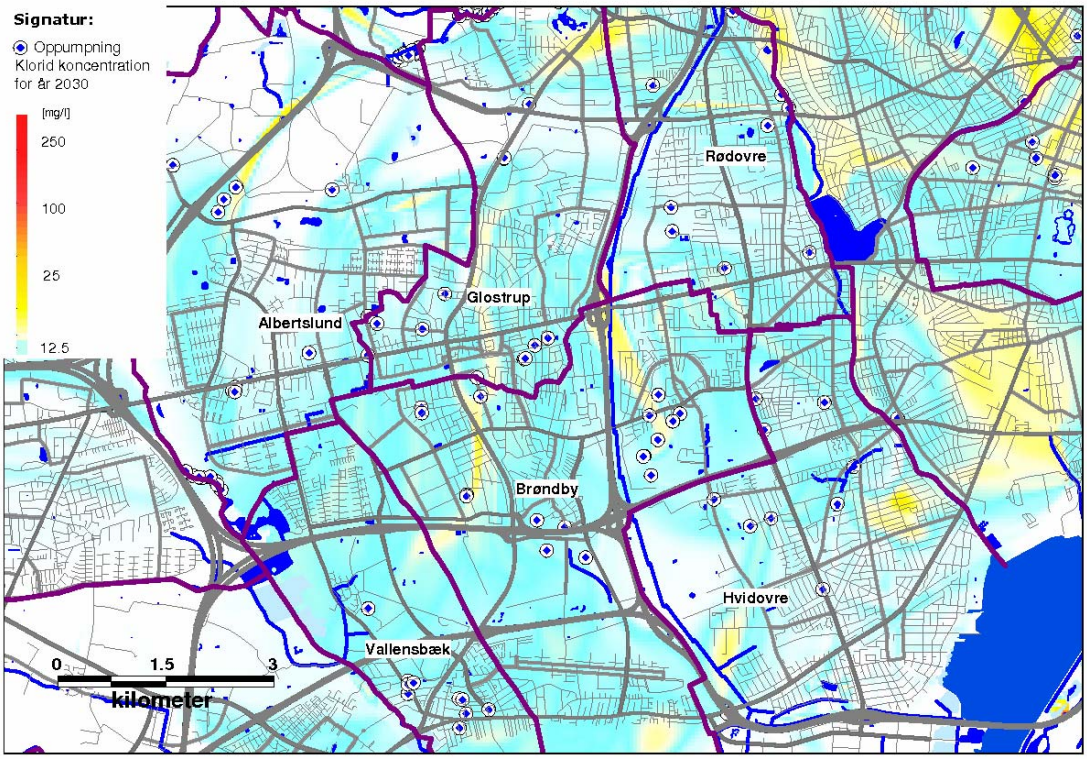
I Figur 6.13 er de målte kloridkoncentrationer sammenholdt med simulerede gennembrudskurver i de to boringer ved et tab til grundvandet på 15 %, hvor der dog er adderet en realistisk baggrundskoncentration på 80 mg/l for at løfte koncentrationsniveauet op til de målte niveauer. Det er således ikke niveauer, som skal sammenholdes, men derimod om stigning i kloridindhold stemmer rimeligt med modellen. For både de målte og de modellerede kloridkoncentrationer er der en svag stigning, og modellen simulerer en fortsat svag stigning fremover. På figuren er der også vist et worst-case resultat med et tab på 50 %, som er i samme størrelsesorden, som angivet i det canadiske studie af Howard & Haynes (1993). Hvis tabet var i denne størrelsesorden må man forvente, at en række flere indvindings- og moniteringsboringer ville være tydeligt påvirket af vejsaltning.



Figur 6.13: Modellerede gennembrudskurver (linjer) for indvindingsboringerne DGU nr. 207.3205 og 207.2753 i Brøndby Kommune sammenholdt med målte værdier (prikker). Baggrundskoncentrationen fra andre kilder end vejsalt er medtaget (estimeret til 80 mg klorid pr. liter).

6.3.2 Reduceret vejsaltforbrug

Modellen kan anvendes til at udføre prædikative simuleringer i forhold til tiltag med eksempelvis generel reduktion eller øget forbrug af vejsalt eller særlige tiltag ved særligt følsomme områder for aktive kildepladser eller særlige vejtyper. Klimaændringer som medfører større/mindre behov for vejsalt vil tilsvarende kunne vurderes, omend der her også forventes ændringer i nettonedbøren hvilket vanskeliggør direkte sammenligninger med de generelle reduktioner i vejsaltsforbruget. I det følgende er kort resultatet af de prædikative modelleringer, hvis der overalt i glatførebekæmpelsen i området reduceres med hhv. 25 %, 50 % og 100 % af det nuværende vejsaltsforbrug.

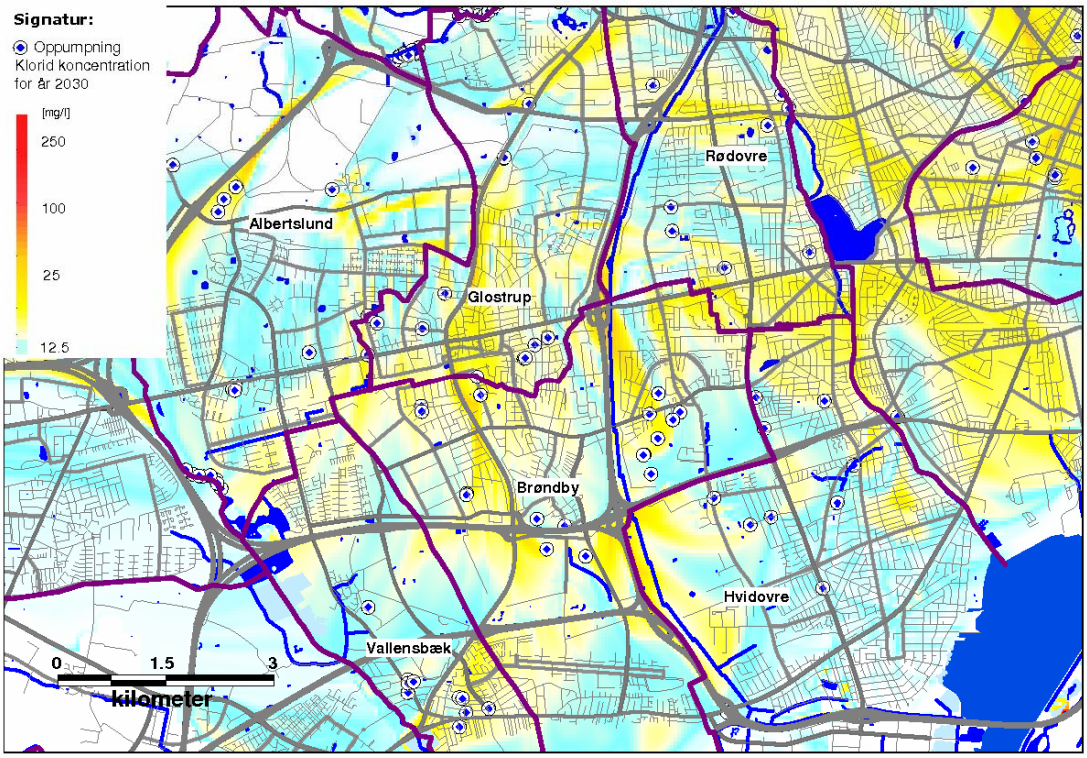


Figur 6.14: Kloridkoncentration forårsaget af vejsalt i det primære magasin for år 2030 ved totalt stop af vejsaltning i 2007.

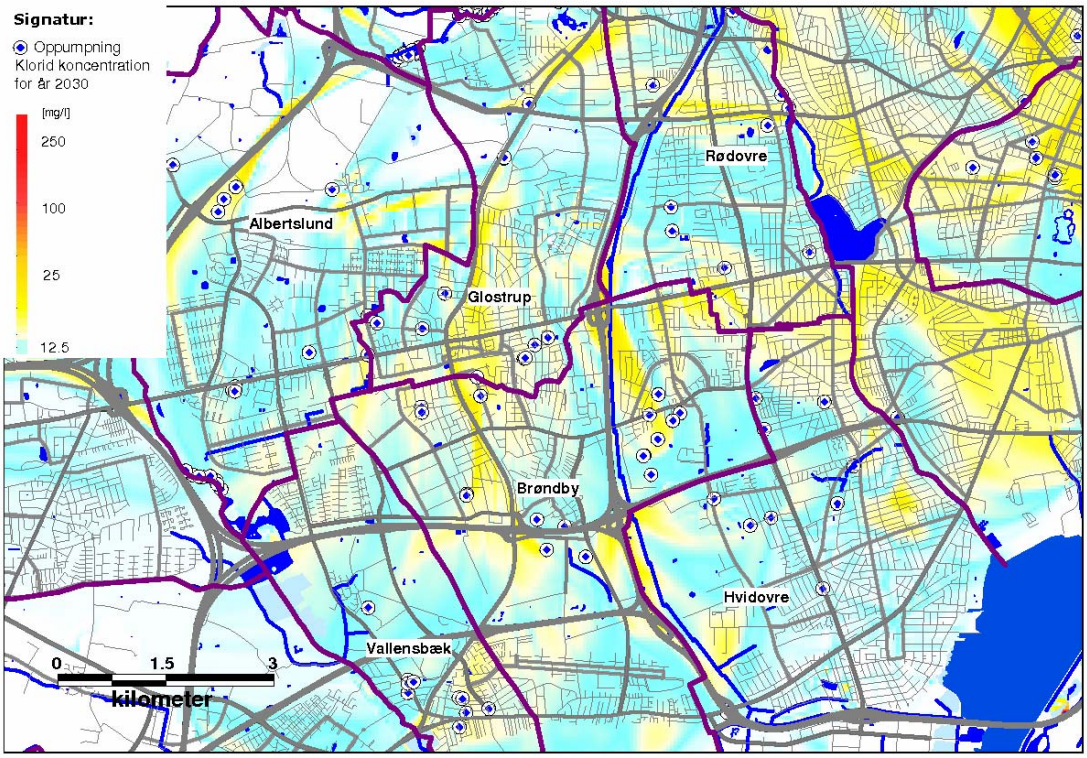
Figur 6.14 viser kloridkoncentrationen i år 2030, hvis intet vejsalt blev forbrugt er i år 2008 og det ses, at koncentrationsniveauerne er lave. Tilsvarende viser figur 6.15 og 6.16 kloridkoncentrationen for år 2030 med en reduktion på 25 % og 50 % af de nuværende udbragte mængder. For boring DGU nr. 207.3205 ses det, at en reduktion på 25 % svarer til, at koncentrationsniveauet i boringen fastholdes på den nuværende kloridkoncentration. Det er i dette tilfælde nok til at sikre, at der ikke sker et yderligere stigende indhold af klorid hidrørende fra vejsalt, men til gengæld sker der heller ikke et fald i koncentration af klorid.

Ved at fjerne vejsaltforbrug eller tabet til grundvandet for statsveje og de tidligere Københavns Amts veje og fastholde vejsaltforbruget på resten af vejnettet, sker der stadig en kraftig reduktion af kloridindholdet i DGU nr. 207.3205 (figur 6.17). Begrænsninger i vejsaltsforbruget vil således efter en årrække give anledning til en faldende kloridkoncentration i grundvandet. Dette viser, at det vil være hensigtsmæssigt at udpege de vejstræknin-

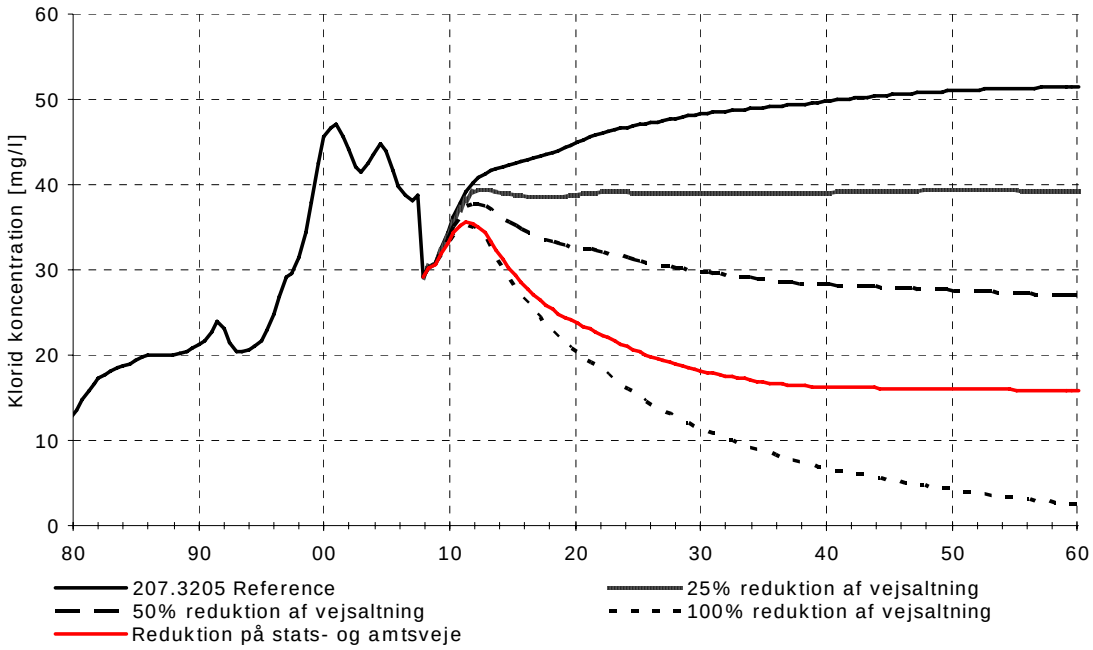
ger, som udgør den største risiko i forhold til kildepladserne i området, således at der mest effektivt kan sættes ind overfor tab af vejsalt til omgivelserne, herunder til grundvandet.



Figur 6.15: Kloridkoncentration forårsaget af vejsalt i det primære magasin for år 2030 ved en reduktion med 25 % af det nuværende gennemsnitlige forbrug.



Figur 6.16: Kloridkoncentration forårsaget af vejsalt i det primære magasin for år 2030 ved en reduktion med 50 % af det nuværende forbrug.



Figur 6.17: Prædikative simuleringer af kloridindholdet i boring DGU nr. 207.3205 ved en gennemsnitlig reduktion af forbruget af vejsalt på hhv. 100, 50 og 25 %, samt et scenario med nul vejsaltsforbrug på stats- og amtsveje. En baggrundskoncentration på ca. 80 mg klorid pr. liter er ikke medtaget.

6.4 Usikkerheder og deres betydning

Usikkerheden på strømningsmodellen nedarves til transportmodellen, idet stoftransportsmodellen anvender hastighedsfeltet fra strømningsmodellen. Usikkerheden ved strømningsmodellen går på, hvor godt modellen repræsenterer virkeligheden, både i forhold til den hydrogeologiske model, og hvor gode de drivende parametre, eksempelvis klimatiske data og indvindingsforhold, er indbygget. For stoftransportmodellen er der stor usikkerhed, bl.a. da den effektive porøsitet direkte indvirker på transporthastigheden, samt på dispersion, som bevirker en spredning i grundvandsmagasinet.

Usikkerheden på kildestyrken af vejsaltet udgør dog den største effekt på konklusion, om vejsaltning udgør et problem i værkstedsområdet, som udgøres af Albertslund, Brøndby, Glostrup, Hvidovre, Rødovre og Vallensbæk kommuner. Dette udgør et ganske stort problem, idet det netop ikke har været muligt at kalibre modellen mod koncentrationsniveauer i grundvandet og derved justere kildestyrken. Kildestyrkemodellen bygger således alene på et sparsomt datagrundlag for forbruget af vejsalt, et gæt på fordeling af forbruget af vejsaltet på vejtyper, og tabet til omgivelserne vurderet på et tyndt grundlag fra litteraturen.

Der er derfor et behov for at forbedre vidensgrundlaget, for at opbygge troværdige massebalancer for vejsaltets spredningsveje, og vurdering af tabet af vejsalt til det omgivende miljø/grundvand for de forskellige vejtyper i et urbaniseret området. Dette kunne være via feltforsøg i byområder, hvor alle transportveje for klorid moniteres kontinuert og kloridind-

holdet i det terrænnære grundvand ligeledes moniteres for at vurdere mængde af vejsalt som ender i grundvandet, samt hvor stor udbredelsen af en kloridfane fra veje kan være.

6.5 Konklusion

Risikovurderingsværktøjet, som er udviklet i dette projekt, består af en kildestyrkemodel og en allerede eksisterende grundvandsmodel, som er opstillet i MIKE SHE. Kildestyrkemodellen danner input til MIKE SHE ved fordeling af vejsaltforbruget på vejnettet i værkstedsområdet ved Vestegnen på Sjælland. Der er gjort en indsats for at indsamle informationer om det historiske vejsaltsforbrug. Dog har ikke alle informationer været tilgængelige, og det vurderes at kildestyrkemodellen er behæftet med en del usikkerhed.

Vejsalt tabes til det omkringliggende miljø ad flere transportveje. Tabet af vejsalt til grundvandet kan ligge mellem 15 og 50 % af vejsaltsforbruget. Tabet kan for nogle veje være tæt på nul, hvis der er kloakeret, hele vejbanen og rabatter er befæstede, og der langs siderne er placeret en støjmur. Det vurderes, at der i det meget urbaniserede værkstedsområde ved Vestegnen vil være et tab af vejsalt til grundvandet af størrelsesordenen 10-20 % af det samlede forbrug.

Simple overslagsberegninger viser, at en tabsprocent på 10-20 % vil resultere i en stigning af kloridindholdet i grundvandet på 40-125 mg/l over baggrundsniveauet. Til sammenligning vil et tab på 50 % af vejsaltsforbruget medføre en stigning i kloridkoncentrationen over baggrundsniveauet på tæt ved drikkevandskriteriet på 250 mg/l.

Modelsimuleringer ved en tabsprocent på 15 % viser, at grundvandet under de bynære områder og ved vejbanefletninger især bliver påvirket af vejsaltningen. Der kan gå op til 20-40 år inden der opnås en stationær grundvandskemisk situation med et konstant kloridindhold, og vejsaltningen vil resultere i en fladeforurening af store dele af grundvandsressourcen i værkstedsområdet. Vejsaltning i dag vil derfor påvirke vores grundvandsmagasiner i mange år fremover.

Udpegning af kritiske vejstrækninger, ved hjælp af risikovurderingsværktøjet, som udgør den største risiko for grundvandsforurening, vil være hensigtsmæssigt i forhold til at beskytte grundvandet mod vejsaltsforurening.

Modelleringen i Værkstedsområdet ved Københavns Vestegn, samt den indledende analyse af mulig koncentration af klorid i grundvandet, viser, at vejsalt ikke i sig selv forventes at udgøre et større regionalt problem, men kun kan forøge kloridindholdet i enkelte boringer væsentligt. Dog kan klorid fra vejsaltningen udgøre et problem, idet der i værkstedsområdet i forvejen er en høj baggrundskoncentration, som ikke hidrører fra vejsalt, samt at der i den nuværende situation kan trækkes residualt saltvand op fra dybere lag. Herved kan de generelle kloridkoncentrationer i området bliver kritisk høje.

I modelsimuleringen, med et beregnet tab på 15 % af det tilførte vejsalt til veje, er kloridkoncentrationen forøget med 25-40 mg/l over baggrundskoncentrationen, mens der lokalt ved vejbanesammenfletninger ses op til 125 mg klorid pr. liter. Ved en øget tabsprocent af

vejsalt til grundvandet øges koncentrationsniveauerne tilsvarende. Hvis tabet er betydeligt højere end 15 % – eksempelvis 50 %, ville koncentrationsniveauerne stige tilsvarende, og der burde være observeret tydelige indikatorer på, at grundvandsressourcen er påvirket af vejsalt. Dette blev ikke påvist i Vestegnens Vandsamarbejde I/S (2009a) idet indikatorerne kun var svage. Der blev således ikke fundet "en rygende pistol".

Med de valgte antagelser om vejsaltningens fordeling på områdets veje simulerer modellen, at kloridforureningen fra vejnettet giver en ensartet, diffus fladepåvirkning af grundvandsressourcen. Kun lokalt omkring de største veje ses der tydelige tegn på, at der er tale om linjekilde forurening.

De prædikative simuleringer viser, at det er muligt at sænke kloridpåvirkningen af grundvandet stammende fra en/flere veje inden for en tidshorisont på ca. 20-30 år. Det kan fx ske som en konsekvens af ændrede udbringningsmetoder eller tømidler som medfører mindre tab til omgivelserne eller som følge af eventuelle klimaændringer som formindsker behovet for vejsalt. Modellen kan dog ikke bruges til at sige noget om udvikling ved den enkle indvindingsboring, idet det ikke var muligt at udføre en kalibrering eller validering af selve stoftransportmodellen eller af kildestyrkemodel.

7. Referencer

Alvarado, J.A.C., Purtschert, R., Hinsby, K., Troldborg, L., Hofer, M., Kipfer, R., Aeschbach-Hertig, W., & Arno-Synal, H., 2005. ^{36}Cl in modern groundwater dated by a multi-tracer approach ($^{3}H/^{3}He$, SF_6, CFC-12 and ^{85}Kr): a case study in quaternary sand aquifers in the Odense Pilot River Basin, Denmark. Applied Geochemistry, 20: 599-609.

Andersen, S., Petersen, S.B. og Laurberg, P., 2002. Iodine in drinking water in Denmark is bound in humic substances. European Journal of Endocrinology 147, 663-670.

BEK 1449 af 11/12/2007. Bekendtgørelse om vandkvalitet og tilsyn med vandforsyningsanlæg. https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=113759.

Bjerg, P.L. & Christensen, T.H. 1992. Temporal and spatial small-scale variation in groundwater quality of a shallow sandy aquifer. Journal of Hydrology 131, 133-149.

Blomqvist, G., Norrström, A.-C. & Thunqvist, E.-L. 2001. Miljøproblem vid drift och underhåll av vägar. Forskningsrapport, TRITA-AMI rapport 3083, Avdelningen för Mark- og Vattenresurser, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm.

Blume, H.P., Brümmer, G., Schwertmann, U., Horn, R., Kögel-Knabner, I., Stahr, K., Auerwald, K., Beyer, L., Hartman, A., Litz, N., Scheinost, A.,, Stanjek, H., Welp, G., Wilke, B.-M., 2002. Lehrbuch der bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, 593 sider.

Bonnesen, B., Larsen, F., Sonnenborg, T., Klitten, K. & Stemmerik, L. 2009. Deep saltwater in Chalk of North-West Europe: origin, interface characteristics and development over geological time. Hydrogeology Journal 17, 1643-1663.

Brettmann, K.L., K. Høgh Jensen and R. Jacobsen (1993). Tracer test in fractured chalk. II. Numerical analysis, Nordic Hydrology, 24, 275-296.

Bækken & Hauge, 2006. Kjemisk tilstand i vegnære innsjøer. Rapport utbyggingsavdelingen nr. UTB 200/06Vegdirektoratet, Oslo, Norge. 92 sider.

Carl Bro, 2001. Statusrapport: Alternative Tømidler, Fase 1 egenskaber, data og prøvningsmetoder, Carl Bro, Maj 2001

Carl Bro, 2003. Alternative Tømidler, Fase 2-virkning på asfalt, stål og galvaniseret stålsamt miljøaspekter, Carl Bro, Marts 2003

Carlson, B.B., Nielsen, M.Æ. Bjerg, P.L, Christensen T. H og J.K. Petersen, 1998. Vejsalt genfindes i høje koncentrationer i grundvandet. Stads & Havneingeniøren, 3: 32-36.

Davis, S., Cecil, D.W., Zreda, M., Sharma, Pl., 1998. Uses of chrloride/bromide ratios in studies of potable water. Ground Water 36: 338-350.

Direktiv 2006/118/EF. Grundvandsdirektivet.

Eggenkamp, H.G.M. & Coleman, M.L., 2009. The effect of aqueous diffusion on the fractionation of chlorine and bromine stable isotopes. Geochimica et Cosmochimica Acta 73: 3539–3548

European Environmental Agency, 2009. Water resources across Europe - confronting water scarcity and drought. EEA Report 2/2009.

Fyns Amt, 2001. Grundvand 2000 - vandmiljø overvågning. Fyns Amt.

Fyns Amt, 2002. Grundvand 2001 - Vandmiljøovervågning. Fyns Amt.

Freeman, J.T., 2007. The use of bromide and chloride mass ratios to differentiate salt-dissolution and formation brines in shallow groundwaters of the Western Canadian Sedimentary Basin. Hydrogeology Journal 15: 1377-1385.

GEUS, 1996. Grundvandsovervågning 1995. GEUS. 145 sider.

Hansen, B. m.fl., i trykken. Geovejledning nr. 5. Kemisk Grundvandskortlægning, GEUS.

Hansen, L. & Pedersen, E.F. 1982. Drænvandsundersøgelser 1971-1974. Tidsskrift for Planteavl, 79: 670-688.

Hinsby, K., Edmunds, W.M., Loosli, H.H., Manzano, M., Condesso de Melo, M.T. & Berbecot, F., 2001. The modern water interface: recognition, protection and development - advance of modern waters in European aquifer systems. I: Edmunds, W.M.; Milne, C.J. (red.), Paleowaters in Coastal Europe: Evolution of groundwater since the late Pleistocene. Geological Society, London, Special Publications

Hinsby, K., Jensen, T.F. & Bidstrup, T., 2003: European reference aquifers: The limestone aquifers around Copenhagen, Denmark. Report for the EU research project ('BASELINE'): Natural Baseline Quality of European Groundwater: A basis for Aquifer Management. 1-18.

Hjuler, H., Wernberg, T., Bering, J.B., & Ramsey, L. 2007. Vurdering af risikoen for kloridpåvirkning af grundvandet, Frederiksberg kommune - samt en vurdering af udviklingen i grundvandet i forhold til drikkevandsproduktionen. Watertech. 41 sider.

Howard, K.W.F. & Haynes, J., 1993. Groundwater contamination due to road de-icing chemicals – salt balance implications. Geosciences Canada, 20: 1-8.

Howard, K.W.F. & Beck, P.J., 1993. Hydrogeochemical implications of groundwater contamination by road de-icing chemicals. Journal of Contaminant Hydrology, 12(3): 245-268.

Howard, K.W.F. & Maier, H., 2007. Road de-icing salt as a potential constraint on urban growth in the Greater Toronto Area, Canada. Journal of contamination hydrology 91, 146-170.

Hseu, K.J., 1963. Solubility of dolomite and composition of Florida ground waters. Journal of hydrology 1: 228-310.

Hulling, E.E. & Hollocher, T.C., 1972. Groundwater contamination by road salt: steady-state concentrations in the Eat Central Massachusetts. Science 176: 288-290.

Jensen, M.B., de Jonge, L.W. & Møldrup, P. 2000. Udgør trafikken en trussel mod grundvandet. Stads- & Havneingeniøren 5/2000: 28-33.

Jørgensen, N.O., Andersen, M.S. & Engesgaard, P., 2008: Investigation of a dynamic seawater intrusion event using strontium isotopes ($^{87}Sr/^{86}Sr$). Journal of hydrology 348: 257-269.

Jørgensen, N.O. & Holm, P.M., 1995. Strontium-isotope studies of chloride-contaminated groundwater, Denmark. Hydrogeology Journal, 3(2): 52-57.

Jørgensen, N.O. & Holm, P.M., 1999. Strontium-isotope studies of "brown water" (organic-rich groundwater) from Denmark. Hydrogeology Journal, 7: 533-539.

Jørgensen, M. & Kjeldsen, P., 1995. Kildestyrkevurdering af gamle lossepladser. Projekt om jord og grundvand nr. 16.

Jørgensen, U. & Kristensen, K., 2004. Drænvandsorientering fra fem marker i perioden 1998-2003 sammenlignet med resultater fra 1971-1994. Planteavlsorientering, 07-507.

Kjeldsen, P. & Christensen, T.H., 1996. Kemiske stoffers opførsel i jord og grundvand. projekt om jord og grundvand fra Miljøstyrelsen, nr. 20.

Klitten, K., Larsen, F. og Sonnenborg, T.O., 2006. Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, hovedrapport. Resume af delprojekternes resultater og konklusioner samt perspektivering. GEUS og Institut for Miljø & Ressourcer, DTU.

Kutilak, M. & Nielsen, D.R. 1994. Soil hydrology. GeoEcology Textbook. Catena verlag Cremlingen, Germany.

Københavns Amt, 2005: Dynamisk grundvandsmodel (KAM). Foreløbig rapport. Watertech, Maj 2005.

Larsen, F., Sonnenborg, T., Madsen, P., Ulbak, K.A. & Klitten, K., 2006. Saltvandsgrænsen i kalkmagasinerne i Nordøstsjælland, delrapport 6. Saltvandsudvaskning i Danienkalk og Skrivekridt - Detailundersøgelser i Karlslunde værkstedsområde. Danmarks & Grønlands Geologiske Undersøgelser 2006/21

Lovbekendtgørelse nr. 1026 af 20-10-2008. Bekendtgørelse af lov om vandforsyning m.v. (Vandforsyningsloven). https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=121065

Lundmark, A. & Olofsson, B., 2007. Chloride deposition and distribution in soils along de-iced highway – assessment using different methods of measurement. Water, Air & Soil Pollution 182: 173-185.

Miljøstyrelsen, 2002. Metoder til værdisætning af dansk vejtrafiks forurening af jord og grundvand. Miljøprojekt nr. 712.

Mielby, S. & Møller, R.R. (2007). Den nationale grundvandskortlægning i Danmark – status pr. 2007. Særudgivelse, GEUS.

Mielby, S. & Sandersen, P., 2005. Indsatskortlægning I Nyborg-området – om samspillet mellem geologiske stor-skala strukturer og forekomsten af salt grundvand. ATV-møde, Vintermøde om jord- og grundvandsforurening, Vingstedcentret 8.-9. Marts 2005.

Miljøcenter Roskilde, 2008. Fase 1 kortlægning for Område 2bc (Gladsaxe, Gentofte, Lyngby og Søllerød kommuner).

Miljøstyrelsen, 2008. Bekæmpelsesmiddelstatistik 2007. Orientering fra Miljøstyrelsen nr. 4.

Millero, 2002. Seawater as an electrolyte. I: Gianguzza, A., Pelizzetti, E., Sammartano, S. (red.), Chemistry of Marine water and sediments. Kap 1. Springer, New York. Side 1-34.

Lindström, R., 2007. A system for modelling groundwater contamination in water supply areas: chloride contamination from road de-icing as an example. Nordic Hydrology 37, 41-51.

Nystén, T. 1998. Transport processes of road salt in quaternary formations. Proceedings: International Symposium on Deicing and Dustbinding—Risk to Aquifers, Helsinki, Finland. October 14–16, I: Nystén, T. & Suokko, T. Eds. Nordic Hydrological Programme, NHP Report No. 43, Helsinki, Finland, p. 31– 40.

Naturvårdsverket, 1999: Bedömningsgrunder - Grundvatten. Naturvårdsverket, Rapport 4915.

Olofsson, B. 1999: Metoder för differentiering av salt grundvatten i Sverige. Sveriges Geologiska Undersökning (SGU). Slutrapport, projekt 03-853/14.

Ostendorf, D.W., Hinlein, E.S., Rotaru, C. & DeGroot, D.J. 2006. Contamination of groundwater by outdoor highway deicing agent storage Journal of Hydrology 326, 109-121.

Panno, S.V., Hackley, K.C., Hwang, H.H., Greenberg ,S.E., Krapac, I.G., Landsberger, S., & O'Kelly, D.J., 2006a. Characterization and Identification of Na-Cl Sources in Ground Water. Ground Water, 44: 176-187.

Panno, S.V., Kelly, W.R., Martinsek, A.T., & Hackley, K.C., 2006b. Estimating Background and Threshold Nitrate Concentrations Using Probability Graphs. Ground Water, 44: 697-709.

Pedersen, E. F., 1982. Grundvandsundersøgelser på sandjord 1975-1979. Tidsskrift for Planteavl 86:543-565.

Pedersen, J.B., 1988. Grundvandskemi. Ingeniørhøjskolen, Horsens Teknikum. 1. udg.

Pedersen, K.M., Laurberg, P., Nøhr, S., Jørgensen, A. & Andersen, S., 1999. Iodine in drinking water varies by more than 100-fold in Denmark. Importance for iodine content of infant formulas. European Journal of Endocrinology 140: 400-403.

Pedersen L., B. og M. Ingerslev, 2007. Alternativer til vejsalt som tømiddel i glatførebekæmpelse. Arbejdsrapport nr. 36, Skov & Landskab. Hørsholm, 2007 49 s ill.

POLMIT, 2002. Pollution of groundwater and soil by road and traffic sources: dispersal mechanisms, pathways and mitigation measures. Delivery D5 – pollution from roads and vehicles and dispersal to the local environment: Final repost and handbook. EU project under the 4th framework program POLMIT RO-97-SC.1027.

R&H Bulletin No. 27 Juli 1991 Frederiksberg Kommune: Sikring af Drikkevandsressourcen. Sammendrag af undersøgelser 1988-1991.

Refshøj, J., 2005. Brasiliansk havsalt i vintertjenesten. Dansk Vejtidsskrift okt. 2005: 4-5.

Ribe Amt, 2003. Grundvand 2002 - vandmiljø overvågning. Ribe Amt. 120 sider.

Storstrøms Amt, 2004: Indsatsplan for grundvandsbeskyttelse for Sydfalster.

Tesmer, M., Möller, P., Wieland, S., Jahnke, C., Voigt, H. & Pekdeger, A., 2007. Deep reaching fluid flow in the North East German Basin: origin and processes of groundwater salination. Hydrogeology Journal. DOI 10.1007/s10040-007-0176-y.

Thorling, L., 1992. Sulfat som aldersindikator i grundvand. Vand og Jord 1: 113-115.

Thunqvist, E.L., 2004. Regional increase of mean chloride concentration in water due to the application of deicing salt. Science of The Total Environment, 325(1-3): 29-37.

U.S. Department of Energy, 1994. Handbook of Methods for the Analysis of the Various Parameters of the Carbon Dioxide System in Seawater. Edited by Dickson, A. G. and C. Goyet. http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/cdiac74/chapter5.pdf.

Vejbæk. O., 2006. Ørken og salthav. I: Larsen, G. (red.) Naturen i Danmark, Geologien. Gyldendal. s. 125-138.

Vejdirektoratet, 1996. Vejsalt, træer og buske – en litteraturundersøgelse om NaCl's effekter på vedplanter langs veje. Rapporten er udarbejdet af T.B. Ran-drup og L.B. Pedersen fra Forskningscenteret Skov & Landskab. Vejdirektoratet rapport 64. Kan fås på www.vejdirektoratet.dk

Vejdirektoratet og Skov & Landskab, 2001. Vejsalt og Planter. Hæfte på 20 sider. ISBN 10: 87-7903-119-6 ISBN 13: 978-97-7903-119-7. Kan fås på www.sl.life.ku.dk

Vejregelrådet, 2006. Vejdrift – tømidler, sand og grud til glatførebekæmpelse. Vejdirektoratet.

Vestegnens Vandsamarbejde I/S, 2005. Grundvandsmodel, Modelopsætning. Rambøll. Februar 2005.

Vestegnens Vandsamarbejde I/S, 2006a. Grundvandsmodel, kalibrering. Rambøll. Februar 2006.

Vestegnens Vandsamarbejde I/S, 2006b. Grundvandsmodel, Scenarieberegninger. Rambøll. December 2006

Vestegnens Vandsamarbejde I/S, 2009a. Kloridindhold i indvindingsboringer i Vestegnen - Udredningsprojekt. Rambøll. Januar 2009. 125 sider.

Vestegnens Vandsamarbejde I/S, 2009b. Grundvandsmodel, Opdatering og scenarioberegninger. Rambøll. Januar 2009

Vengosh A., & Pankratov, I., 1998. Chloride/Bromide and Chloride/Fluoride Ratios of Domestic Sewage Effluents and Associated Contaminated Ground Water. Ground Water 36: 815-824.

Williams, D.D., Williams, N.E & Cao, Y., 1999. Road salt contamination of groundwater in a major metropolitan area and development of a biological index to monitor its impacts. Water Resource Research 24: 127-138.

Whittemore, D.O., 1988. Bromide as a tracer in groundwater studies: geochemistry and analytical determination. Proceedings Ground Water Geochemistry Conference, Denver, National Water Well Association, 339-360.

Wright, J. & Colling, A., 1995. Seawater: its composition, properties and behavior. Prepared by the open Universitycourse team. Butterworth. Heinemann (Elsevier), Oxford, UK.

Ødum, H. & Christensen, W., 1936. Danske grundvandstyper og deres geologiske optræden. Danmarks Geologiske Undersøgelse, III. række nr. 26:1-183.

Århus Amt, 2006. Redegørelser for grundvandsressourcerne i Århus Syd-området. Red.: S.W. Grønhøj, B. Hansen, O.D. Jensen, B.E. Jordt, S. Rasmussen og R. Thomsen, 285 sider.

8. Appendiks

Appendiks A

Geologi, boringsindretning, vandkemiske karakteristika samt kommenterer til de 88 vandanalyser som indeholder >125 mg klorid per liter samt har et klorid-bromidforhold på >550 i JUPITER databasen. Datasættet er udtrukket 7. oktober 2008. Se afsnit 4.5 for yderligere om analysen. Analyserne fra 34 boringer er grupperet efter faldende klorid-bromidforhold.

DGU nr. / GRUMO nr.	Indtag top (m u.t.)	Indtag bund (m u.t.)	Prøve-tagnings-dato	Bromid (µg/l)	Klorid (mg/l)	Cl/Br forhold	Na/Cl Ionbyt forhold	Bemærkninger
215. 743-f2 (30.14.05.02)	49	52	17-09-1996	10	5100	510000	0.89	Eggeslevmagle, Vestsjælland, GRUMO, ved Sorø Landevej (rute 156), Eksterm høj Cl, olierester i filter ovenover, Br evt. fejlanalyse.
188. 919 (20.14.04.01)	16.7	17.2	28-05-1991	41	342	8341	0.45	Nyrup, Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, CFC alder 20 år, Cl 25-450 mg/l sulfat moderat, ingen miljøfremmede stoffer,
188. 919-f2 (20.14.04.02)	11.7	12.2	28-05-1991	48	383	7979	0.64	Nyrup, Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, CFC alder 15 år, Cl 250-950 mg/l sulfat moderat, + phenol
188. 922 (20.14.06.01)	24	24.5	29-05-1991	21	140	6667	0.44	Kvistgård, GRUMO lige ved A6, Cl 70-570 mg/l, CFC på 25 år, ingen miljøfremmede stoffer
105. 1395 (60.11.10.03)	12.66	13.36	30-10-1991	39	140	3590	0.55	Thyregod, lige ved rute 176 og i udkanten af byen, CL på 65-250 mg/l og stigende, CFC på 6 år, + atraziner
188. 919 (20.14.04.02)	11.7	12.2	04-09-1995	150	469	3127	0.95	Nyrup, Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, CFC alder 15 år, Cl 250-950 mg/l sulfat moderat, + phenol
201. 3791 (13.11.05.02)	16.5	19.5	07-09-2000	405	1110	2741	0.15	Nørrebro Bycenter, GRUMO, +TCE, Cl varierer 400-1200 mg/l,
13.11.02.03	13.8	14.3	16-09-1993	60	145	2417	0.32	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO
188. 922 (20.14.06.01)	24	24.5	27-09-2000	118	267	2263	0.29	Kvistgård, GRUMO lige ved A6, Cl 70-570 mg/l, CFC på 25 år, ingen miljøfremmede
201. 3791 (13.11.05.01)	22.5	25.5	07-09-2000	385	870	2260	0.18	Nørrebro Bycenter, GRUMO, +org. opløsningsmidler, Cl varierer 400-900 mg/l,
207. 2829 (15.12.04.02)	8.8	9.5	15-05-1997	380	820	2158	0.19	Ishøj, ved Køgebugt motorvejen, CFC alder >60 år, +benzinrester, CL 500-1200 mg/l
135. 1103 (42.13.02.05)	6.2	6.7	18-09-1996	130	279	2146	0.72	Harndrup, Fyn, bivej ved rute 303, Cl 25-250 mg/l, sulfat moderat til høj, +pesticider,
201. 3791 (13.11.05.01)	22.5	25.5	22-09-1993	330	705	2136	0.22	Nørrebro Bycenter, GRUMO, + organiske opløsningsmidler, Cl varierer 400-900 mg/l,
201. 3791 (13.11.05.02)	16.5	19.5	08-05-1996	310	640	2065	0.20	Nørrebro Bycenter, GRUMO, +TCE, Cl varierer 400-1200 mg/l,
188. 919-f2 (20.14.04.02)	11.7	12.2	25-09-2000	185	380	2054	0.79	Nyrup, Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, CFC alder 15 år, Cl 250-950 mg/l sulfat moderat, +phenol
207. 2829 (15.12.04.02)	8.8	9.5	28-09-1995	410	800	1951	0.21	Ishøj, ved Køge bugt motorvejen, CFC alder >60 år, +benzinrester, CL 500-1200 mg/l
135. 1103 (42.13.02.05)	6.2	6.7	03-09-2002	130	250	1923	0.00	Harndrup, Fyn, bivej ved rute 303, Cl 25-250 mg/l, sulfat moderat til høj, +pesticider, CFC alder?
201. 4795-f2 (13.11.18.02)	8	9	08-05-1996	680	1259	1851	0.52	Vanløse, ved ring O2 og Flintholm st., København/Frederiksberg komm., GRUMO, SO4 høj, med MTBE,
199. 1007 (20.11.08.01)	27.9	28.4	19-09-2000	111	205	1847	0.23	Onsved, Odsherred, rute 53, Cl på 70-270 mg/l, ingen miljøfremmede
188. 919	16.7	17.2	25-09-2000	151	275	1821	0.67	Nyrup,. Espergærde, GRUMO tæt ved E47

DGU nr. / GRUMO nr.	Indtag top (m u.t.)	Indtag bund (m u.t.)	Prøve-tagnings-dato	Bromid (µg/l)	Klorid (mg/l)	Cl/Br forhold	Na/Cl Ionbyt forhold	Bemærkninger
(20.14.04.01)								og A6, CFC alder 20 år, Cl 25-450 mg/l sulfat moderat, ingen pesticider e.l.,
135. 1103 (42.13.02.05)	11.2	11.7	10-09-2003	110	200	1818	0.85	Harndrup, Fyn, bivej ved rute 303, Cl på 100-200 mg/l, sulfat moderat til høj, +pesticider, CFC alder 10 år
105. 1395 (60.11.10.03)	12.66	13.36	20-10-2003	150	267	1780	0.64	Thyregod, lige ved rute 176 og i udkanten af byen, CL på 65-250 mg/l og stigende, CFC på 6 år, + atraziner
164. 935 (42.11.07.03)	18.5	19	23-11-2000	110	190	1727	0.00	Svendborg, bivej nord for, GRUMO, vand-kemi?
56. 894 (76.11.02.02)	26	27	20-08-2001	83	143	1723	0.00	Viborg, ved rute 533, cl 70-150 mg/l CFC alder på 20 år, ingen miljøfremmede stoffer,
201. 3791 (13.11.05.02)	16.5	19.5	22-09-1993	370	630	1703	0.22	Nørrebro Bycenter, GRUMO, +TCE, Cl varierer 400-1200 mg/l,
15.13.10.01	33	40	26-10-1999	94.2	160	1699	0.57	Nørrebro, GRUMO
188. 920 (20.14.03.01)	7.2	7.7	28-05-1991	96	161	1677	0.65	Nyrup,. Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, CFC alder 30 år, Cl 110-170 mg/l sulfat moderat, ingen pesticider e.l.,
141. 929 (50.12.08.03)	26	27	26-08-1996	110	180	1636	0.41	Rødding, i byen og ved rute 449, CFC alder 20 år, CL 90-200 mg/l, sulfat høj
121. 958 (55.13.06.01)	16.5	17	09-10-2000	120	192	1600	0.00	Varde, Sdr. Plantage, mellem A11 og A12, GRUMO, Cl på 50-300 mg/l, CFC alder på 20 år
13.11.03.02	8.2	8.7	09-05-1995	850	1330	1565	0.54	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO
135. 1103 (42.13.02.05)	11.2	11.7	13-11-2001	150	230	1533	0.67	Harndrup, Fyn, bivej ved rute 303, Cl 100-200 mg/l, sulfat moderat til høj, +pesticider, CFC alder 10 år
24. 785 (80.12.16.02)	9	11	13-08-1991	260	389	1496	0.44	Skerping, Hanherred, GRUMO, A29, Cl 200-350 mg/l, +BAM, CFC alder 30 år
135. 1103 (42.13.02.05)	11.2	11.7	18-09-1996	110	162	1473	0.76	Harndrup, Fyn, bivej ved rute 303, Cl 100-200 mg/l, sulfat moderat til høj, +pesticider, CFC alder 10 år
24. 785 (80.12.16.02)	9	11	31-08-1994	180	264	1467	0.47	Skerping, Hanherred, GRUMO, A29, Cl 200-350 mg/l, +BAM, CFC alder 30 år
24. 785 (80.12.16.02)	17	19	05-11-1990	187	269	1439	0.29	Skerping, Hanherred, GRUMO, A29, Cl 200-300 mg/l, +BAM, CFC alder 30 år
105. 1395 (60.11.10.03)	12.66	13.36	08-10-2001	130	180	1385	0.65	Thyregod, lige ved rute 176 og i udkanten af byen, CL på 65-250 mg/l og stigende, CFC på 6 år, + atraziner
141. 929 (50.12.08.03)	26	27	01-09-1999	127.3	176	1383	0.53	Rødding, i byen og ved rute 449, CFC alder 20 år, CL 90-200 mg/l, sulfat høj
188. 920 (20.14.03.01)	7.2	7.7	30-08-1995	97	129	1330	0.78	Nyrup,. Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, CFC alder 30 år, Cl 110-170 mg/l sulfat moderat, ingen pesticider e.l.,
207. 2829 (15.12.04.01)	18.5	19.2	15-10-1991	120	159	1325	0.18	Ishøj, ved Køge bugt motorvejen, CFC alder >60 år, +benzinrester, CL 20-200 mg/l
24. 785 (80.12.16.02)	9	11	25-09-2001	200	263	1315	0.81	Skerping, Hanherred, GRUMO, A29, Cl 200-350 mg/l, +BAM, CFC alder 30 år
37. 1039 (76.13.01.03)	6.65	8.45	30-09-1991	190	246	1295	0.69	Nykøbing Mors, GRUMO, ved A26, Cl på 70-200 mg/l - faldende?, + atraziner, Sulfat faldende
24. 785 (80.12.16.02)	17	19	25-09-2001	180	228	1267	0.53	Skerping, Hanherred, GRUMO, ved A29, Cl 200-300 mg/l, +BAM, CFC alder 30 år
24. 785 (80.12.16.02)	9	11	08-09-1997	150	189	1260	0.52	Skerping, Hanherred, GRUMO, ved A29, Cl 200-350 mg/l, +BAM, CFC alder 30 år
164. 935 (42.11.07.03)	18.5	19	29-08-1996	110	138	1255	0.41	Svendborg, bivej nord for byen, GRUMO, vandkemi?
13.11.16.03	13.8	14.3	04-09-2000	305	370	1213	0.23	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO

DGU nr. / GRUMO nr.	Indtag top (m u.t.)	Indtag bund (m u.t.)	Prøve-tagnings-dato	Bromid (µg/l)	Klorid (mg/l)	Cl/Br forhold	Na/Cl Ionbyt forhold	Bemærkninger
24. 785 (80.12.16.02)	17	19	10-09-1996	180	216	1200	0.56	Skerping, Hanherred, GRUMO, A29, Cl 200-300 mg/l, +BAM, CFC alder 30 år
13.11.18.02	8	9	21-09-2000	939	1070	1140	0.69	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO
201. 3791 (13.11.05.02)	17	18	05-11-1996	250	270	1080	0.68	Nørrebro Bycenter, GRUMO, +TCE, Cl varierer 400-1200 mg/l,
188. 920 (20.14.03.01)	7.2	7.7	03-10-2000	122	129	1057	0.82	Nyrup,. Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, CFC alder 30 år, Cl 110-170 mg/l sulfat moderat, ingen pesticider e.l.,
200. 3438 (15.13.06.02)	29.5	30.2	17-03-1992	180	170	944	0.78	Gladsaxe, ring 3, Cl 150-260 mg/l, CFC alder på 50 år, +benzinrester, +pesticid, +org. opl.
37. 1039 (76.13.01.03)	9.65	11.65	30-09-1991	170	159	935	0.76	Nykøbing Mors, GRUMO, A26, Cl på 70-200 mg/l - faldende?, + atraziner, Sulfat faldende
37. 1039 (76.13.01.03)	6.65	8.45	21-11-1994	310	275	887	0.62	Nykøbing Mors, GRUMO, A26, Cl på 70-200 mg/l - faldende?, + atraziner, Sulfat faldende
163.160	7		30-04-2001	270	232	859	0.93	Faaborg, i byen, lige ved vandet, cl konstant høj, ingen forurening
135. 1103 (42.13.02.05)	11.2	11.7	08-09-1993	240	202	842	0.50	Harndrup, Fyn, bivej ved rute 303, Cl 100-200 mg/l, sulfat moderat til høj, +pesticider, CFC alder 10 år
201. 4795-f1 (13.11.18.01)	12.2	13.2	08-05-1996	320	244	763	0.43	Vanløse, ved ring O2 og Flintholm st., Kø-benhavn/Frederiksberg komm., GRUMO, SO4 høj, Cl ca. 250 mg/l,
13.11.11.01	15.6	22.2	30-08-2000	171.1	130	760	0.28	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO
33.419	32.5	80	12-09-2001	200	149	745	0.72	Solbakken, Nibe, villakvarter ved Limfjorden, +BAM, Cl 50-140 mg/l, SO4 ca. 40 mg/l
201. 4795-f1 (13.11.18.01)	12.2	13.2	31-08-2000	326	236	724	0.47	Vanløse, ved O2 og Flintholm st., GRUMO, SO4 høj, Cl ca. 250 mg/l,
15.13.04.01	38	38.7	04-11-1996	180	130	722	0.27	Nørrebro
141. 929 (50.12.08.03)	26	27	31-08-1993	180	130	722	0.50	Rødding, i byen og ved rute 449, CFC alder 20 år, CL 90-200 mg/l, sulfat høj
55. 854 (76.12.07.01)	37	40	12-12-1990	199	140	704	0.57	Skive, GRUMO, Kaserne og A26, Cl på 30-140 mg/l - faldende, +BAM, +olierester,
37. 1039 (76.13.01.03)	6.65	8.45	23-08-1999	350	237	677	0.00	Nykøbing Mors, GRUMO, A26, Cl på 70-200 mg/l - faldende?, +atraziner, Sulfat faldende
201. 3795 (15.13.04.01)	38	38.7	08-11-1999	224	150	670	0.30	Søborg, GRUMO ved Ring 3, CFC alder p å30 år, Cl 50-170 mg/l og stigende
33.245	25.2	68	12-09-2001	190	126	663	0.86	Nibe Nord, +olierester, Cl konstant siden 1990-erne.
135. 1103 (42.13.02.05)	6.2	6.7	08-09-1993	240	155	646	0.26	Hamdrup, Fyn, bivej ved rute 303, Cl 26-300 mg/l, sulfat moderat, ingen miljøfremmede
34. 2067 (80.02.11.01)	18	22	14-08-2001	210	135	643	0.50	Støvring, ved rute 180, +phenol, CL 110-140 mg/l sulfat moderat til høj,
200. 3704 (15.11.11.02)	54	56	15-11-1994	260	165	635	0.26	Værløse by, GRUMO, villakvarter,
13.11.17.01	20.3	23.3	08-05-1995	230	144	626	0.90	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO, Cl 20-160 og varierende
13.11.14.02	13.9	14.4	06-09-2000	526	318	605	0.50	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO
13.11.14.01	23.5	24	06-09-2000	546	330	604	0.37	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO
13.11.14.02	13.9	14.4	03-05-1995	340	198	582	0.64	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO
37. 1039 (76.13.01.03)	9.65	11.65	21-11-1994	250	145	580	0.82	Nykøbing Mors, GRUMO, A26, Cl på 70-200 mg/l - faldende?, + atraziner, Sulfat faldende
13.11.03.01	12	12.5	20-09-1993	390	224	574	0.47	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO
13.11.14.01	23.5	24	03-05-1995	480	275	573	0.75	Frederiksberg/Kbh kommune, GRUMO
15.13.04.02	31	31.7	08-11-1999	280	160	571	0.24	Gladsaxe, GRUMO
200. 3438 (15.13.06.02)	15.5	16.2	17-06-1991	620	353	569	0.41	Gladsaxe, ring 3, Cl 110-360 mg/l, CFC alder på 40 år, +benzinrester, +pesticid

DGU nr. / GRUMO nr.	Indtag top (m u.t.)	Indtag bund (m u.t.)	Prøve-tagnings-dato	Bromid (µg/l)	Klorid (mg/l)	Cl/Br forhold	Na/Cl Ionbyt forhold	Bemærkninger
201. 3796 (15.13.05.02)	17	18	09-11-1999	230	130	565	0.24	Gladsaxe, Ring 3, Cl 60-300 mg/l, CFC alder p å30 år, +benzinrester,

Appendiks B

Geologi, vandkemiske karakteristika samt kommenterer til de 79 vandanalyser som har et klorid-bromidforhold på >550 samt omvendt ionbytning (Na/Cl<0,75) i JUPITER databasen. Datasættet er udtrukket 7. oktober 2008. Se afsnit 5.4 for yderligere om analysen.

DGU nr. / GRUMO nr.	Prøve-tagnings-dato	Bromid (µg/l)	Klorid (mg/l)	Cl/Br forhold	Na/Cl Ionbyt forhold	Bemærkninger
102. 725	24-10-1994	49	34	694	0,73	Østtarp, Ølgod, GRUMO boring med filter >50 m u.t., landbrugsområde
104. 1994	30-08-2000	32	25.1	784	0,67	Brande, GRUMO boring i udkanten af Brande by og lige ved A18, Cl p å25-45 mg/l, +pesticider
114. 1421	08-11-1993	50	31	620	0,70	Grindsted, GRUMO boring lige ved A30, Cl p å25-65 mg/l, højest i toppen, +pesticider
114. 1442	02-11-1992	42	36	857	0,60	Grindsted, GRUMO boring ca. 400 m fra A30, Cl ca. 20 mg/l
114. 1443	02-11-1992	10	41	4100	0,45	Grindsted, GRUMO boring ca. 400 m fra A30, Cl ca. 20 mg/l, CFC alder på 10 år, +pesticider
114. 1444	02-11-1992	10	41	4100	0,56	Grindsted, GRUMO boring ca. 400 m fra A30, Cl ca. 10 mg/l, CFC alder på 7 år, +pesticider
114. 1457	03-11-1992	10	24	2400	0,71	Grindsted, GRUMO boring ca. 300 m fra A30, Cl ca. 20 mg/l, +pesticider
121. 956	21-10-1992	36	33	917	0,45	Varde, Sdr. Plantage, mellem A11 og A12, GRUMO, Cl på 20-30 mg/l, CFC alder på 20 år
123. 804	06-11-2001	53	34.5	651	0,59	Bække ved Ribe, i landsbyen ved rute 417, Cl på 20-40 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
123. 870	03-09-1991	30	27	900	0,69	Vorbasse, GRUMO, ved rute 469, Cl på 20-170 mg/l, ungt vand, +pesticider
123. 876	06-12-1995	28	24	857	0,64	Vorbasse, GRUMO, ved boldbaner og rute 469, Cl på 15-30 mg/l, CFC alder på 13 år, ingen pesticider
125. 707	14-03-2001	66	85	1288	0,62	Fredericia by, ca. 90 m u.t., boring fra 1960-erne i byen og lige ved Lillebæltskysten, Cl på 80-130 mg/l, +pesticider
125. 1012	28-10-2008	120	67	558	0,71	Fredericia by, ca. 30 m u.t., boring fra 1970-erne i byen og lige ved Lillebæltskysten, Cl på 20-100 mg/l, +pesticider
125. 1756	08-06-2000	73	81	1110	0,53	Børkop, ved A28 og i udkanten af byen, Cl på 40-80 mg/l, +pesticider
132. 314	03-01-2001	23	35	1522	0,75	Holsted, I Holdsted by og ved rute 425, Cl på 25-35 mg/l, +pesticider og olierester
132. 565	13-03-2002	68	39	574	0,67	ved Vejen, ca. 400 fra rute 191, CL p å40 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
135. 1078	29-08-2000	76	47	618	0,72	Staurby, udenfor Middelfart tæt ved Lillebælt, ingen større veje i nærheden, +pesticider
135. 1206	05-02-2003	13	52	4000	0,68	Sventrup, udenfor Middelfart, mellem rute 161 og E20, CL på 50 mg/l, +pesticider
145. 690	12-03-2001	33	40.8	1236	0,60	Odense S, ved E20, Cl på 20-40 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
18. 243	25-09-2002	140	96.2	687	0,43	Præstbro, Vendsyssel, GRUMO, tæt ved bivej, men ingen større veje, Cl på 30-100 mg/l, CFC på 12 år, ingen miljøfremmede stoffer, dybere filtre har lavere kloridindhold
18. 244	30-09-2002	150	92.8	619	0,75	Præstbro, Vendsyssel, GRUMO, tæt ved bivej, men ingen større veje, Cl på 40-110 mg/l, CFC på 22 år, +pesticider
186. 534	23-08-1995	64	36	563	0,69	Tisvilde hegn, GRUMO, Cl på 30-40 mg/l, ingen veje og ingen miljø-fremmede stoffer, CFC alder på >60 år
186. 712	02-10-2000	98	69	704	0,67	Tisvilde hegn, GRUMO, Cl på 15-100 mg/l, ingen veje og ingen miljø-fremmede stoffer, CFC alder på >60 år
188. 917	29-08-1995	45	41	911	0,71	Nyrup, Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, Cl på 35-70 mg/l og højest i øvre filtre
188. 919	25-09-2000	151	275	1821	0,67	Nyrup, Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, CFC alder 20 år, Cl 25-450 mg/l sulfat moderat, ingen pesticider e.l.,
188. 920	28-05-1991	96	161	1677	0,65	Nyrup,. Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, CFC alder 30 år, Cl 110-170 mg/l sulfat moderat, ingen pesticider e.l.,
188. 921	12-06-1991	39	29	744	0,64	Nyrup, Espergærde, GRUMO tæt ved E47 og A6, 20-30 mg/l klorid,

DGU nr. / GRUMO nr.	Prøve-tagnings-dato	Bromid (µg/l)	Klorid (mg/l)	Cl/Br forhold	Na/Cl Ionbyt forhold	Bemærkninger
188. 922	27-09-2000	118	267	2263	0,29	Nyrup, Espergærde, GRUMO tæt A6, Cl på 70-770 mg/l, højest i øverste filter,
192. 817	18-09-2002	62	35	565	0,53	Syndbylille, boring ved vandværket i udkanten af byen, Cl på 30-40 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
192. 909	28-06-2002	69	42	609	0,66	Slangerup, boring i byen, Cl på ca. 40 mg/l, +pesticider, CFC ?
193. 1383	11-09-2000	48	30	625	0,51	Nr. Herlev, GRUMO i udkanten af byen og tæt ved rute 233, Cl på 10-70 mg/l, CFC alder >60 år, +pesticider
193. 1442	26-09-2000	99	70	707	0,29	Kollerød, GRUMO i landsbyen og ved A16 (Hillerødmotorvejen), Cl på 25-80 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer, CFC alder på >60 år
199. 818	14-08-1995	130	73	562	0,44	Skuldelev, GRUMO i byen, Cl på 25-90 mg/l, CFC alder på 15 år, +pesticider
199. 1007	19-09-2000	111	205	1847	0,23	Skibby, GRUMO lige ved A53, Cl på 20-100 mg/l, +olierester og pesticider
199. 1008	22-08-1995	49	45	918	0,41	Skibby, GRUMO lige ved A53, Cl på 40-120 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
200. 242F	18-03-1998	185	170	919	0,55	Bagsværd ved Ring 4, Cl på 70-170 mg/l, +pesticider og organiske opløsningsmidler
200. 242M	18-03-1998	110.9	68	613	0,45	Bagsværd ved Ring 4, Cl på 30-70 mg/l, +pesticider og organiske opløsningsmidler
206. 1172	21-08-1996	120	112	933	0,41	Osted, GRUMO ved A14 og i udkanten af byen, Cl på 80-140 mg/l, CFC alder på 50 år, ingen miljøfremmede stoffer
206. 1173	11-08-1998	38	25	658	0,74	Osted Hestehave, GRUMO ved A14, Cl på 15-30 mg/l, CFC alder på 40 år, ingen miljøfremmede stoffer
212. 639	23-08-1995	140	80	571	0,64	Køge, GRUMO ved E20 og E55/E47 sammenfletning, Cl på 25-80 mg/l, +olierester, organiske opløsningsmidler og pesticider,
212. 988	07-09-2000	119	122	1025	0,62	Køge, GRUMO ved E20 og E55/E47 sammenfletning, Cl på 50-150 mg/l, CFC alder på 25 år, ingen miljøfremmede stoffer
212. 1060	13-05-1991	80	48	600	0,64	Salmose, GRUMO ca. 1km fra E20 og E55/47 sammenfletning, CL på 40-60 mg/l, CFC alder på 30 år, ingen miljøfremmede stoffer
228. 62	18-12-2007	13	24	1846	0,64	Klintholm, Møn, ved rute 287, Cl på 15-25 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
24. 214	01-09-1998	110	71	645	0,43	Skerping, Hanherred, GRUMO ved A29, Cl 50-70 mg/l, +BAM, CFC alder 30 år
24. 785	08-09-1997	150	189	1260	0,52	Skerping, Hanherred, GRUMO ved A29, Cl 200-300 mg/l, +BAM, CFC alder 30 år
247. 367	21-05-2008	49	39	796	0,38	Grønnedal ved Østermarie på Bornholm, skov og landbrugsområde, Cl på 20-40 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
25. 314	27-09-2006	300	170	567	0,73	Ved Brovst, Hanherred, landsområde, Cl på 90-170 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
30. 933	10-09-1991	40	34	850	0,73	Vester Vandet, Thy, GRUMO boring i landbrugsområde, Cl 30-60 og stigende med dybden, ingen miljøfremmede stoffer
30. 936	20-09-1994	86	48	558	0,71	Vester Vandet, Thy, GRUMO boring i skovområde, Cl 30-50 og faldende med dybden, ingen miljøfremmede stoffer
33. 419	12-09-2001	200	149	745	0,72	Nibe, villakvarter tæt ved Limfjorden, +bakterier, +BAM, Cl varierer 50-140 mg/l
34. 1647	25-08-1997	140	93	664	0,59	Drastup ved Aalborg, GRUMO i udkanten af landsbyen, Cl på 90-125 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
34. 1740	22-08-1995	20	38	1900	0,58	Drastup ved Aalborg, GRUMO ved rute 187, Cl på 30-50 mg/l, CFC alder på 30 år, ingen miljøfremmede stoffer
34. 1745	16-08-1995	130	74	569	0,33	Drastup ved Aalborg, GRUMO i udkanten af landsbyen, Cl på 40-120 mg/l, +pesticider
37. 1039	21-11-1994	310	275	887	0,62	Nykøbing Mors, GRUMO ved A26, Cl på 70-200 mg/l - faldende?, +atraziner,
41. 375	24-05-2000	10	25	2500	0,68	Blenstrup ved Skørping, boring i udkanten af byen, Cl på 25 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
41. 395	24-05-2000	10	25	2500	0,68	Blenstrup ved Skørping, boring i udkanten af byen, Cl på 25 mg/l, +pesticider

DGU nr. / GRUMO nr.	Prøve-tagnings-dato	Bromid (µg/l)	Klorid (mg/l)	Cl/Br forhold	Na/Cl Ionbyt forhold	Bemærkninger
41. 462	12-10-1999	74	55	743	0,73	Blenstrup ved Skørping, boring i udkanten af byen, Cl på 45-65 mg/l, +pesticider og org. Opløsningsmidler
5. 917	14-08-1995	68	44	647	0,70	Hirtshals, GRUMO boring i landbrugsområde syd for byen, ved A55 og jernbanen, Cl på 25-50 mg/l, + organisk opløsningsmiddel
5. 1763	22-11-2007	140	100	714	0,52	Hjørring by, udkanten af byen, Cl på 100 mg/l, +pesticider og olierester,
55. 425	02-06-1999	130	107	823	0,29	Dommerby, Skive, i udkanten af byen og tæt ved Limfjorden, Cl på 65-120 mg/l, CFC alder på 50 år, +org. opløsningsmidler
55. 854	12-12-1990	199	140	704	0,57	Skive, GRUMO, tæt ved kaserne og A26, Cl på 30-140 mg/l - faldende med tiden, +BAM, +olierester,
55. 859	04-11-1991	62	50	806	0,71	Skive, GRUMO, tæt ved kaserne og A26, Cl på 20-50 mg/l, +olierester,
56. 894	04-12-1991	39	105	2692	0,72	Viborg, ved rute 533, cl 70-150 mg/l CFC alder p å20 år, ingen miljø-fremmede,
63. 1037	12-12-2002	10	32	3200	0,72	Klosterhede Pl., ved skovvej i skovområde, Cl på ca. 20 i 3 filtre og 1 filter med 40 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
63. 1038	16-12-2002	10	42	4200	0,72	Klosterhede Pl., ved skovvej i skovområde, Cl på ca. 30 i 3 nederste filtre mens øverste har 50-60 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
71. 295	13-11-1991	53	43	811	0,50	Svinkær ved Grenå, GRUMO ved A16, Cl på 25-50 mg/l, +pesticider
71. 439	06-05-1998	60	42	700	0,38	Kastbjerg ved Grenå, GRUMO ved rute 547 og bivej, Cl på 15-100 mg/l, +pesticider
71. 468	12-11-1991	60	51	850	0,30	Kastbjerg ved Grenå, GRUMO ved rute 547, Cl på ca. 40 mg/l,
71. 469	12-11-1991	66	39	591	0,67	Kastbjerg ved Grenå, GRUMO ved rute 547, Cl på ca. 30-50 mg/l,
71. 522	14-04-1998	51	33	647	0,53	Emmelev ved Grenå, GRUMO ved gård og bivej, Cl på 20-70 mg/l, CFC alder på 20 år, ingen miljøfremmede stoffer
79. 772	18-11-1991	64	53	828	0,67	Kasted ved Århus, ved rute 505 og E45, Cl på 30-60 mg/l, CFC alder på 10 år, +pesticider
79. 777	04-10-1999	82	46	561	0,53	Søften ved Århus, i byudviklingsområde og noget fra rute 505, Cl på 30-50 mg/l i alle 4 filtre,
88. 704	20-02-2001	63	36	571	0,63	Sabro ved Århus, landbrugsområde, Cl på 30 mg/l, ingen miljøfremmede stoffer
94. 2516	21-09-2000	43	111	2581	0,33	Vester Herborg ved Videbæk, GRUMO ved bivej, Cl på 20-110 mg/l, CFC alder på 10 år, ingen miljøfremmede stoffer
99. 473	06-09-1993	70	47	671	0,62	Odder, GRUMO ved bivej, Cl på 25-60 mg/l, CFC alder på 10 år, ingen miljøfremmede stoffer

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) er en forsknings- og rådgivningsinstitution i Ministeriet for Klima og Energi.

ISBN 978-87-7871-264-6
WEB ISBN 978-87-7871-265-3

VURDERING AF DANSKE GRUNDVANDSMAGASINERS SÅRBARHED OVERFOR VEJSALT

Denne rapport er udarbejdet af Geologisk Institut, Aarhus Universitet, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) og Rambøl i forbindelse med et udviklingsprojekt under den Nationale Grundvandskortlægning. Rapporten er udarbejdet i samarbejde med By- og Landskabsstyrelsen, Miljøministeriet.

Årligt bruges der ca. 300.000 tons vejsalt til glatførebekæmpelse i Danmark. Samtidig viser studier i flere skandinaviske lande samt i Nordamerika, at klorid fra vejsaltning påvirker grundvandskvaliteten negativt. Disse forhold danner baggrunden for at vurdere, om salt fra glatførebekæmpelsen påvirker kvaliteten af grundvands- og drikkevandsressourcen i Danmark både på nationalt plan og i en del af Storkøbenhavn.

De Nationale Geologiske Undersøgelser
for Danmark og Grønland (GEUS)

Geological Survey of Denmark and Greenland

Øster Voldgade 10
1350 København K
Danmark

Telefon 38 14 20 00
Fax 38 14 20 50
E-post geus@geus.dk
Hjemmeside www.geus.dk