

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



Forkortelser og parametere:

FGE – Frozen Ground Engineering (Andersland og Landanyi)

KOSTRA – Kommune-Stat-Rapportering

KANEW – Beregning av tiltaksprognose (tiltaksomfang)

LEYP – Linear extention of the Youle prognosis

RV 2010-2020 – Rehabiliteringsplan Vannledningsnettet 2010-2020

VAV Oslo – Vann- og avløpsetaten Oslo kommune

UMB – Universitetet for Miljø- og Biovitenskap

IMT – Institutt for matematiske realfag og teknologi

NGU – Norges Geologiske Undersøkelser

Takk til:

Vann- og Avløpsetaten Oslo Kommune v/ Morten Syrrist, Kjartan Reksten, Jack Ruud, Mads

Furuholt-Aulie, John Johansen

Oddvar G. Lindholm

Graham Gilbert

Innhold

| | |
|--|----|
| Innledning | 5 |
| Del 1. Generelle beskrivelser | 8 |
| Teorigrunnlag | 8 |
| Periodisk frossen grunn (tele)..... | 8 |
| Massetetthet (ρ) | 8 |
| Vanninnhold (w)..... | 8 |
| Vann som væske i frossen grunn (w_u) | 9 |
| Porøsitet (n) | 9 |
| Temperaturgradient (GF)..... | 10 |
| Varmeledningsevne (k)..... | 10 |
| Varmekapasitet (C)..... | 11 |
| Temperaturutvidelse | 11 |
| Latent fusjonsvarme (L) | 12 |
| Frostindeks (I_{sf})..... | 12 |
| Overflateindeks (n-faktor for jord (n_f))..... | 13 |
| Frostpenetrering..... | 13 |
| Stefans likning | 14 |
| Modifisert Berggren likning | 15 |
| Frosthevning (h) | 15 |
| Differensiell frosthevning..... | 17 |
| Separasjonspotensiale (SP)..... | 19 |
| Korrosjon..... | 19 |
| Jordlaster | 20 |
| Frostlaster | 21 |
| Andre laster | 23 |
| Jordtyper | 24 |
| Kuldeproblematikk med vanninnhold i jord..... | 25 |
| Brudd | 25 |
| Tverrbrudd (tangentielle brudd) | 28 |
| Langsgående brudd (aksialbrudd)..... | 30 |
| Lekkasjesøknig..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Rørmaterialer og rørteknikk | 32 |
| Asbestsement | 32 |
| Støpejern..... | 33 |
| Grått støpejern (SJG)..... | 33 |
| Duktile støpejernsrør (SJK)..... | 34 |
| Overgangstemperatur..... | 34 |
| Stål (MST)..... | 35 |
| Termoplaster..... | 35 |
| Polyetylen (PE)..... | 36 |
| Polyvinylklorid (PVC)..... | 37 |
| Glassfiberarmert umettet polyester (GRP/GUP) | 37 |
| Isolering av rør | 38 |
| Is i rørnettet..... | 39 |
| Del 2. Konkrete undersøkelser av lekkasjer på drikkevannsnettet i Oslo | 43 |
| Geologiske undersøkelser | 43 |
| Forsøksoppsett..... | 43 |
| Resultater | 46 |
| Feilkilder ved gjennomføring | 49 |
| Lekkasjer i Oslo - et statistisk eksempel..... | 52 |
| Datagrunnlag | 52 |
| Frostindeks | 54 |
| Snødekke | 55 |
| Lekkasjer fordelt på bruddtype..... | 56 |
| Lekkasjer og materiale..... | 59 |
| Lekkasjer fordelt på månedene | 61 |
| Lekkasjer fordelt på rørlengde..... | 62 |
| Lekkasjer fordelt på rørdiameter: | 63 |
| Lekkasjer fordelt på leggeår | 63 |
| Sammenheng mellom kulde og lekkasjer | 67 |
| Effekten av snødybde | 69 |
| Modifisering av datasettet | 70 |
| Alternative responsvariable | 72 |

| | |
|--|-----|
| En undersøkelse av outliers-ene | 72 |
| Konklusjon | 79 |
| Et sammensatt problem..... | 80 |
| Forslag til senere forsøksarbeid med gjennomføring..... | 81 |
| Undersøkelse av varmeledningsevne..... | 81 |
| Betydningen av temperatur på elektrokjemisk korrosjon | 82 |
| Kilder | 83 |
| Appendiks | 87 |
| Appendiks A – Figurer | 87 |
| A.1 – Figur for korreksjonskoeffesienten i den modifiserte Berggren likningen | 87 |
| A.2 – Varmeledningsevne for silt og leire | 88 |
| A.3 – Varmeledningsevne for sand | 89 |
| A.4 – Varmeledningsevne for grus | 90 |
| Appendiks A.5 – Jordtyping etter ”Department of the Navy” | 91 |
| Appendiks B – Statistikk | 92 |
| Appendiks B.1 - Regression Analysis: Lekkasje versus If(dag) | 92 |
| Appendiks B.2 - Regression Analysis: Lekkasje versus If(Måned) | 93 |
| Appendiks B.3 - Regression Analysis: Lekkasje versus If(dag); Snødybde | 94 |
| Appendiks B.4 - Regression Analysis: Lekkasje (modifisert) versus If(dag) | 95 |
| Appendiks B.5 - Regression Analysis: Lekkasje (modifisert) versus If(dag); Snødybde | 96 |
| Appendiks B.6 - Regression Analysis: Lekkasje pr Lengde (km) versus If(dag)..... | 97 |
| Appendiks B.7 - Regression Analysis: Lekkasje pr volum (mill m ³) versus If(dag) | 98 |
| Appendiks C – Datagrunnlag..... | 100 |
| Appendiks C.1 – Frostindeks og snødybde | 100 |
| Appendiks C.2 – Lekkasje, nettlengde, vannproduksjon | 102 |
| Appendiks C.3 – Resultater jordprøver | 104 |

Innledning

Norge har i følge tall fra statistisk sentralbyrå en lekkasje prosent på det kommunale drikkevannsnettet på omtrent 32 % (KOSTRA 2011). Denne lekkasje prosent er ikke målt og baserer seg på data som kommunene oppgir til Vannverksregisteret. I det nyeste fagverket for VA-bransjen skrevet i 2012 ("Vann- og Avløpsteknikk" – Ødegaard, m.fl) er det ved et enkelt overslag basert på produsert mengde og forventet forbruk kommet fram til en lekkasje prosent på ca 44 %. Dette er svært høyt i forhold til andre land i Europa hvor de fleste landene ligger med en lekkasje prosent på mellom 8 og 20 (selv om det i Europa også er unntak med lekkasje prosent over 40 %).

Norge har i forhold til mange andre europeiske land et høyt antall km ledningsnett pr person, svært god tilgang på drikkevann og et kaldt klima. Store deler av Norge ligger i den boreale klimasonen, samt en del tundra og temperert sone. De andre landene i Europa med lignende klima er nord i Sverige, Finland og store deler av Russland.

I Sverige er 84 % av vannuttaket i temperert sone. Statistikk fra det "Svenska statistiska centralbyråen" viser et tap i ledningsnettet på ca 18 %. For Finland som stort sett ligger i den boreale klimasonen ligger tapet i ledningsnettet på ca 15 %. Russland har ingen tall over drikkevannstap. Dette viser at det også for Norge burde være mulig å oppnå en langt lavere lekkasje prosent.

I Norge ligger gjennomsnittsalderen på ledningsnettet på et sted mellom 31 og 33 år. Vi har en gjennomsnittlig utskiftningsrate på 0,6 % og en forventet gjennomsnittlig levetid på ca 100 år. Mye av ressursene har historisk sett blitt brukt til å bygge ut drikkevannsnettet, både grunnet urbanisering og generell befolkningsvekst. Dette minsker den gjennomsnittlige alderen på ledningsnettet, men vi har fremdeles en stor andel av ledningsnettet som er lagt mellom 1946 og 1964. Rørene lagt i denne perioden er i all hovedsak støpejernsrør som har vist seg å ha dårlig kvalitet i kombinasjon med mye dårlige grunnarbeider. Med den utskiftningsraten som er i dag vil det ta 160 år å skifte ut hele ledningsnettet, forutsatt at det ikke er noe nylegging. Som vi ser er det hele 60 års forskjell på forventet levetid og den levetiden vi tilegger rørene med dagens utskiftningsrate. Om dette ikke endres vil lekkasje prosent gå opp.

Med et stadig større og eldre ledningsnett har vann – og avløpssektoren fått en stadig økende rehabiliteringssektor i forhold til nybygging. Dette har økt viktigheten av å redusere antall lekkasjer til et lavere nivå, både for å kunne bruke ressursene på mer langsiktig rehabilitering og fornyelse, men også for å hindre de store lekkasjemengdene fra drikkevannsnettet som ikke bare lager skader og økonomiske tap, men også bidrar til unødvendig rensing av både drikke- og avløpsvann (da vann som renner ut fra drikkevannsledninger med lekkasjer renner inn i de trykkløse avløpsledningene med skader/hull). Foruten de økonomiske tapene og den unødvendige rensingen er den høye lekkasjestatistikken en direkte fare for drikkevannskvaliteten.

Etter utbruddet av giardia i Bergen i 2004 har det blitt stadig bedre og mer avanserte rensaneanlegg for drikkevann. Drikkevannsforskriften sier at vannverket er pålagt å levere ”tilfredsstillende mengde av tilfredsstillende kvalitet, herunder at drikkevannet ikke inneholder helseskadelig forurensing av noe slag og for øvrig er helsemessig betryggende” (§1 Drikkevannsforskriften).

Store økonomiske midler har blitt brukt og brukes fremdeles på at vannet renses til en god kvalitet. Målet med innføring av 2 hygieniske barrierer er en realitet ved mange av de største vannverkene i Norge. Drikkevannet skal i følge lovverket ”være hygienisk betryggende, klart og uten framtreddende lukt, smak eller farge. Det skal ikke inneholde fysiske, kjemiske eller biologiske komponenter som kan medføre fare for helseskade i vanlig bruk.” (§12 Drikkevannsforskriften) Dette er et krav til kvalitet som stilles når det hentes ut hos forbrukerne og ikke bare når vannet sendes ut fra vannverket.

Problemet med den store andelen lekkasjer på ledningsnettet er at det gir mangelfull kontroll over det vannet som forbrukeren faktisk får i springen. Det gjøres stikkprøver på ledningsnettet og kundene vil oppdage eventuelle forskjeller i farge, smak og lukt. Men det er med det store antallet brudd høy sannsynlighet for at ledningsnettet kan dra inn uønskede bakterier, virus og protozoer som kan føre til sykdom og at det vannet som vannverket har brukt penger på å desinfisere ikke er i henhold til forskriften.

Oslo kommune Vann og Avløpsetaten (VAV Oslo) ferdigstilte i 2008 ”rehabiliteringsplan vannledningsnett 2010-2020 – bruddprognose” (RV 2010-2020). Denne planen hadde som mål å vurdere kriterier som ligger til grunn for brudd som har oppstått og å lage modeller som kan vurdere hvilke faktorer som er relevante for brudd i fremtiden. I dette arbeidet har VAV Oslo engasjert Cemagref instituttet i Bordeaux for å beregne en bruddprognose basert på den statistiske modellen LEYP (Linear Extension of the Youle Process).

Beregningene er basert på de samme grunnlagsdata som er benyttet av Baur og Kropp i beregningene av tiltaksprognose (KANEW). Hvor forskjellen er at tiltaksprognosen angir hvor mange meter ledning som bør rehabiliteres per år og bruddprognosen vurderer sannsynligheten for brudd i alle ledningene og rangerer de etter sannsynlighet for brudd. Prognosen er relevant for å vurdere hvilke rørstrekninger som skal rehabiliteres, men har svakheter i form av mangel på faktorer som kan forklare brudd.

Denne oppgaven ser på årsaker for brudd på drikkevannsledninger som kan knyttes til kulde med målsetning å foreslå ytterligere faktorer som må vurderes i nye modeller for tiltaks- og bruddprognoser som skal utarbeides. Oppgaven tar utgangspunkt i tall fra Oslo kommune vann- og avløpsetaten som en detaljstudie i omfang av skader på drikkevannsnettet. Beskrivelser og forklaringer har som mål å kunne anvendes i alle områder der det er tale i løpet av året.

Del 1. Generelle beskrivelser

Teorigrunnlag

Periodisk frossen grunn (tele)

Periodisk frossen grunn er et fenomen der bakken deler av året har temperaturer under null grader celsius. Dette skjer som regel i vintersesongen, men kan også opptre i kortere eller lengre perioder både høst og vår. Når bakken når temperaturer under null grader vil vannet som befinner seg i porene i grunnen fryse til is.

Massetetthet (ρ)

Massetetthet er forholdet mellom massen (M) og volumet (V) til et legeme. Det beskriver tyngden til et materiale pr volumenhet.

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Vanninnhold (w)

Vanninnhold i jord er beskrevet som forholdet mellom massen av vann (M_v) og den tørre massen (M_s). I de fleste tilfeller er vanninnholdet i jord mindre enn 100%, men det kan i enkelte tilfeller være opp mot 500% i jord med høyt organisk innhold eller i leire.

$$w = \frac{M_v}{M_s} (100)$$

Vanninnhold kan deles opp i tre elementer som alle vil finne sted: gass, væske og solid form (is). Mengden av vannet i gassform som til en hver tid finnes i en jordprøve er vist å ha svært lav innvirkning på totalen. Vanninnholdet deles derfor opp i vann som væske (w_u) og is (w_i).

$$w = w_u + w_i$$

For vanninnhold kan det i utgangspunktet velges eksempelverdier for en del jordarter. Dette vil gi noen grad av riktighet. Oppgaven vil i all hovedsak bruke innhentede data om vanninnhold og tilhørende gjennomsnittsverdi fordelt på jordtype til å videre analysere frostpenetrering og frostheving. Verdier for bakkens sammensetning og en gjennomsnittlig varmeledningsevne er en klar utfordring med tanke på alle de parametere som er med på å styre dette.

Vann som væske i frossen grunn (w_u)

I jorden vil det ved de fleste temperaturer under 0 grader celsius fremdeles være en liten mengde vann som væske. Data hentet fra Anderson og Tice (1972) viser at noe av det totale vannet i en frossen jordprøve vil være i væskeform som tynne lag på overflaten av partiklene. Sammen med Banin lagde Anderson og Tice en eksperimentell formel som viser hvordan det ufrosne vanninnholdet kan beskrives som en funksjon av to jordparametere α og β samt θ som er absoluttverdien til den negative temperaturen.

$$w_u = \alpha \theta^\beta$$

Porøsitet (n)

Porøsitet er målet på hvor mye av en jordprøve som består av åpninger eller tomrom. Faktoren for porøsitet er beskrevet som forholdet mellom volumet av tomrommet (V_v) og det totale volumet i jordprøven (V).

$$n = \frac{V_v}{V} (100)$$

Temperaturgradient (GF)

Temperaturgradienten er målet på endringen i temperatur med økende dybde i bakken. Regnes ut som forholdet mellom temperaturforandring (ΔT) og dybdeforandring (ΔX).

$$GF = \frac{\delta T}{\delta X}$$

Varmeledningsevne (k)

Varmeledningsevne er et materials evne til å lede varme gjennom konduksjon fra varme molekyler i den ene enden av materiale til kaldere molekyler i den andre enden. Den energien som kreves per areal og temperaturforandring for å forflytte seg en distanse dx.

$$Q = -k_u * A * \frac{\delta T}{\delta x}$$

Varmeledningsevnen til noen de mest brukte rørmaterialene i Norge er gitt under:

| Materiale | Varmeledningsevne |
|--------------|--|
| PE | 0,4 W/m ⁰ C ¹ |
| PVC | 0,16 W/m ⁰ C ¹ |
| PP | 0,2 W/m ⁰ C ¹ |
| Asbestsement | 0,65 W/m ⁰ C ² |
| Støpejern | 50 W/m ⁰ C ² |
| Stål | 43 W/m ⁰ C ² |
| GRP | 0,3-0,35 W/m ⁰ C ³ |

Utover dette er varmeledningsevnen til vann og is relevante faktorer:

| Materiale | Varmeledningsevne |
|-----------|--------------------------------------|
| Vann | 0,58 W/m ⁰ C ² |
| Is | 2,21 W/m ⁰ C ² |

¹ Hentet fra NPG Norge sitt kunnskapsarkiv

² Hentet fra Cold Regions Utilities Monograph

³ Oppgitt av APS Norge etter forespørsel pr mail

Eksempler for varmeledningsevne i jord er tilgjengelig i [Appendiks A.1](#).

Varmekapasitet (C)

Den energien som kreves for å endre temperaturen i et materiale med en grad celsius. Måles enten som C i et spesifikt materiale, som varmekapasitet pr masse (c_v) eller som varmekapasitet pr volum (c_v).

Varmekapasiteten til noen av de mest brukte rørmaterialene i Norge er gitt under:

| Materiale | Varmekapasitet |
|--------------|---|
| PE | 2,26 kJ/kg ⁰ C ² |
| PVC | 1,05 kJ/kg ⁰ C ² |
| PP | 1,7-2 kJ/kg ⁰ C ⁴ |
| Asbestsement | 1,05 kJ/kg ⁰ C ⁵ |
| Støpejern | 0,46 kJ/kg ⁰ C ⁶ |
| Stål | 0,5 kJ/kg ⁰ C ² |
| GRP | 1,05 kJ/kg ⁰ C ³ |

Utover dette er varmekapasiteten til vann og is relevante faktorer:

| Materiale | Varmeledningsevne |
|-----------|--|
| Vann | 4,19 kJ/kg ⁰ C ² |
| Is | 2,09 kJ/kg ⁰ C ² |

² Hentet fra Cold Regions Utilities Monograph

³ Oppgitt av APS Norge etter forespørsel pr mail

⁴ Hentet fra PAR Group UK,

<http://www.par-group.co.uk/UserDocs/Plastics%20-%20Technical/Polypropylene.pdf>

⁵ Hentet fra: Climate Responsive Architecture: A Design Handbook for Energy Efficient Buildings - Arvind Krishan (2001)

⁶ Hentet fra Ductile Iron Society, <http://www.ductile.org/didata/Section3/3part2.htm>

Temperaturutvidelse

Alle materialer vil endre volum når temperaturen endres. Dette skyldes hvordan molekylene sitter sammen innad i materialet, avstanden mellom dem og den tilgjengelige potensielle energien i materialet. Samtlige materialer som brukes i rørteknologi vil utvide seg med økt temperatur og da tilsvarende trekke seg sammen med synkende temperatur. Denne formen for termisk volumendring vil endre kraften som virker på materialet når det er festet slik at det ikke har anledning til å motvirke volumendringen med forflytning.

Lavere temperatur vil på et rør føre til at det trekker seg sammen slik at det skapes en strekkraft over røret i lengderetning dersom det ikke kan forflytte seg. Tilsvarende høyere temperatur vil føre til en bøyepening i røret eller en trykkraft. Konstanten for denne temperaturutvidelsen viser hvordan materialet endrer struktur pr endring i temperatur.

| Materiale | Temperaturutvidelseskoeffisient |
|--------------|---|
| PE | 0,18 mm/m/ ⁰ C ¹ |
| PVC | 0,08 mm/m/ ⁰ C ¹ |
| PP | 0,12 mm/m/ ⁰ C ¹ |
| Asbestsement | 0,01 mm/m/ ⁰ C ² |
| Støpejern | 0,01 mm/m/ ⁰ C ³ |
| Stål | 0,014 mm/m/ ⁰ C ⁴ |
| GRP | 0,03 mm/m/ ⁰ C ¹ |

¹ Hentet fra Strategi for valg av ledningsmateriell for spillvanns- og overvannsledninger – SINTEF 14-09-2007

² Hentet fra rørkatalogen til Basal, www.basal.no/ror

³ Hentet fra SAINT-GOBAIN PAM, <http://www.pam-cast-iron.com/pipe-activity>

⁴ Hentet fra UK National Physical Laboratory, http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_3/2_3_5.html

Latent fusjonsvarme (L)

Latent fusjonsvarme er den mengden energi i form a varme som slippes fri eller kreves for at et materiale skal bytte fase fra væske til solid form. For jord vil denne faktoren være sterkt preget av mengden is som skal tine/fryse samt massetettheten til jorden uten vann.

$$L = \rho_d * L' * \left(\frac{w - w_u}{100}\right)$$

$$\text{For vann er } L' = 333,7 \text{ kJ/kg}$$

Frostindeks (I_{sf})

Bakken er utsatt for store temperaturforandringer, både gjennom året men også fra dag til dag i de enkelte årstidene gjennom for eksempel vindhastighet, luftfuktighet, nedbør, strålingsvarme fra sola og lufttemperatur. Dette har i mange sammenhenger blitt vist gjennom konseptet med produktet av grader og dager (⁰C*dager). Frostindeks er summen av gjennomsnittstemperaturer pr dag under null grader celsius for en vintersesong. Om data for

dagstemperaturer ikke er tilgjengelig kan man bruke summen av månedlig gjennomsnittstemperatur ganger antall dager i måneden med et tillegg for måneder med både positive og negative temperaturer som beskrevet av Boyd (1976). Formelen for overgangsmånedene er gitt ved.

$$Y^2 - NTY = N^2k^2$$

Der Y er en variabel som viser frostindeks for den aktuelle måneden, N er antall dager i måneden, T er gjennomsnittstemperaturen i måneden og *k er en kostnant satt lik 1,4.*

Overflateindeks (n-faktor for jord (n_f))

Det er ut ifra metrologiske data relativt enkelt å hente inn frostindeks for luft, men denne kan ikke brukes direkte på jord da det er faktorer som påvirker hvordan lufttemperaturen overføres til bakken. Faktorer som påvirker dette er vegetasjon, snødekke, strålingsvarme, jordas termiske egenskaper og drenering. Overflateindeksen er kalkulert ved hjelp av den empirisk utledete n-faktoren, definert som forholdet mellom frostindeksen for jord og forstindeksen for luft (R. J. E. Brown 1963).

Dette er en faktor som kan variere gjennom året med mengden strålingsvarme, vind og luftfuktighet. Som vist av Lunardini (1978) vil denne for asfalt ligge rundt 1. Et eksempel fra Norge ble lagt fram på den tredje internasjonale konferansen om permafrost. Her ble data fra Os kommune lagt fram med en n-faktor for asfalt på 1.02. Faktorene på denne konferansen lå gjennomgående rett rundt 1 for asfalt, selv om størsteparten lå rett under 1. Tilsvarende n-faktor har også blitt funnet for snø og grus. I kalkulering av frostdybde er n-faktor på 1 valgt da de fleste rørene vil ligge under asfalt eller snø under vinterperioden.

Frostpenetrering

Defineres som den maksimale dybden hvor det i løpet av vinteren er under 0 grader celsius. Beregninger gjøres med Stefan og modifisert Berggren.

Stefans likning

Kalkulering av varmeledning i jord er svært viktig for effekten av en kuldeperiode. Størrelsen på frostpenetrering påvirker direkte størrelsen på frostheving og eventuell frostblokkering av vann i rørsystemer. Dersom temperaturen i et medium endrer seg slik at det oppstår faseforandring vil denne ha stor betydning ikke bare på størrelsen på temperaturendringssonen men også på varmeledningsevnen og varmekapasiteten.

Vann er et viktig komponent i all jord. Når man undersøker energibalanse i jord rundt frysepunktet for vann er mengden vann og faseforandningsenergien til vann to svært viktige faktorer sett fra et ingeniørstandpunkt. Dette gjør at beregninger av varmeledning ikke skjer lineært, men må løses som et matematisk mye vanskeligere ulineært problem. Løsningen for faseforandring i et homogent materiale med signifikant størrelse er kjent som Neumann løsningen (1860).

Denne eksakte løsningen vil i de fleste ingeniørproblemer være for komplisert matematisk og inneholder mange faktorer som i et reelt problem har usikkerhetsmomenter knyttet til seg enten grunnet manglende målinger eller noe innhomogenitet i materialet. Stefan foreslo gjennom studier fra 1889 og 1891 en forenkling av den klassiske Neumann løsningen. Dette anvendte Stefan i sin forskning på vekst av pol-is. For løsninger med metaller eller stein vil Stefan sin forenkling gi for store avvik fra Neumann løsningen, men for vann har denne løsningen vist seg å ha et avvik som fra et ingeniørstandpunkt er såpass lite at det kan ignoreres.

Stefans løsning for jord med signifikant vanninnhold er gitt ved

$$X = \sqrt{\frac{2 * k_f * I_{sf}}{L}}$$

Hvor X er frostpenetrering, k_f er varmeledningsevnen, I_{sf} er negative overflatetemperaturer ganger tid, L er latent fusjonsvarme

Stefans løsning forutsetter at varmen som slippes fri ved fusjon fra vann til is etter hvert som den fryser ved dybden X og tiden t er lik konduksjonshastigheten i de overliggende massene til overflaten. Stefans løsning tar ikke hensyn til den volumetriske varmekapasiteten til bakken. Disse to manglene fører til at Stefans løsning overestimerer frostpenetrering.

Modifisert Berggren likning

Modifisert Berggren likning er en Stefans løsning hvor de to sentrale manglene er estimert som en korreksjonsverdi av den opprinnelige løsningen. Dette ble gjort av Aldrich og Paynter i 1966 med korreksjonsfaktoren λ for å ta hensynt til at jordens varmekapasitet påvirker dybden som frost kan penetrere ned i bakken og at konduksjonshastigheten ikke nødvendigvis er like stor som energien som slippes fri i faseovergangen. Modifisert Berggren likning er gitt ved:

$$X = \lambda \sqrt{\frac{2 * k_f * I_{sf}}{L}}$$

Hvor parameteren λ er funnet fra en tabell med innsetting av verdien for den termiske raten α og fusjonsparameteren μ . De to verdiene er kalkulert ved hjelp av følgende likninger:

$$\alpha = \frac{v_0}{v_s} = \frac{v_0 * t}{I_{sf}}$$

$$\mu = \frac{c_v}{L} v_s = \frac{c_v * I_{sf}}{L * t}$$

Tabellen for λ er gjengitt i [Appendiks A.1](#).

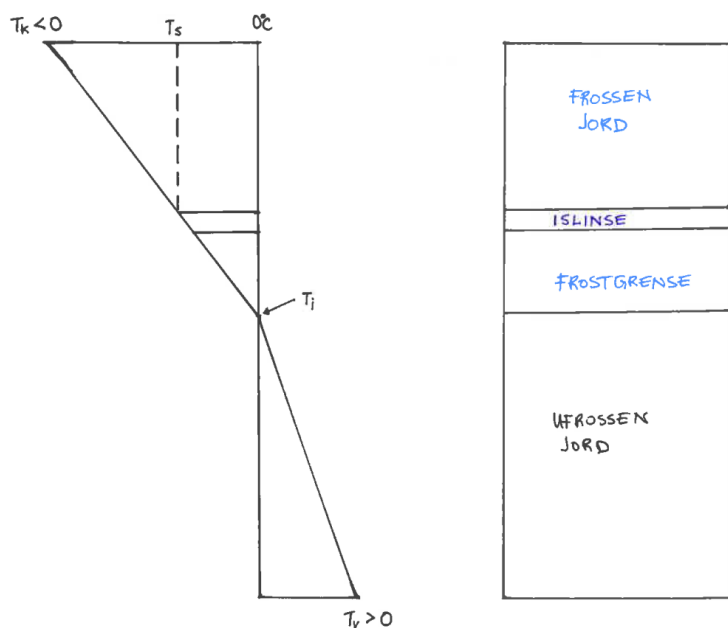
Frosthevning (h)

Som et resultat av at is har lavere massetetthet enn vann vil volumet av jord som fryser øke med en faktor i forhold til vanninnholdet. Økningen i volum fra vann til is er ca 9%. En vanlig økning i volum grunnet en faseforandring fra væske til is vil vanligvis ligge fra 0% til 6-7% avhengig av jordtype og vanninnhold. Denne volumforandringen vil kun skje i

høyderetningen da bakken fryser ovenfra og ned og det er svært små muligheter for horisontale bevegelser. Dette gir en potensiell frostheving på 6-7 cm pr meter. Utover dette vil bakken når den fryser suge til seg nytt vann som igjen kan fryse og skape økt frostheving. Denne andre faktoren bidrar i enda større grad til frostheving.

Konrad og Morgenstern foreslo gjennom tre artikler i den canadiske geotekniske journalen fra 1980, 1981 og 1982 en detaljert endimensjonal modell for frostheving. Rapportenes hovedkonsept er at etter en islinse (*figur 1*) har blitt dannet så vil ikke den frosne jorden over islinsen bidra til massetransport, men at vann blir transportert til islinsen fra den ufrosne jorden gjennom et område med delvis frossen jord kalt frostgrensen.

Vannet vil suges opp til frostgrensen grunnet en mangel på vann i porene som allerede har fryst til is og derfor blitt sugd ut av porene. Dette vannet suges inn til frostgrensen og ut derifra til islinsen hvor det fryser. Denne prosessen gjentas over en gitt periode til det ikke er mulighet for mer vannopptak enten grunnet forflytning av frostlinsen eller at det ikke er mer vann tilgjengelig. Dersom det er full tilgang på nytt vann vil frostheving grunnet vannoppsuging kunne bidra til frostheving 9 til 10 ganger så stor som frostheving grunnet vannet i jorden.



Figur 1; Islinse i jord med nødvendige temperaturforhold

$T_v = \text{Temperatur varm}, T_k = \text{Temperatur kald}$

Modellen som Konrad og Morgenstern bruker tar utgangspunkt i at Clausius-Clapeyron likningen er gyldig, at vannstrømningen er kontinuerlig over frostgrensen, at frostgrensen kan be karakterisert med en gjennomsnittlig permeabilitet k_{f0} , og at temperaturen over forstgrensen varierer lineært mellom separasjonsfrysetemperaturen T_s ved islinsen og frysetemperaturen T_i ved bunnen av frostgrensen.

De foreslår følgende modell for total frosthevning dersom det er full tilgjengelighet av ufrosset vann i grunnen under frostgrensen. Dette tallet vil i mange tilfeller bli alt for høyt i forhold til reel frosthevning, men vil fremdeles kunne gi en pekepinn på hvor mye frosthevning som er mulig.

$$h = h_s + h_i$$

$$h_s = 1,09 * SP * GF$$

$$h_i = 0,09 * X * n$$

h_s er frosthevning grunnet oppsuging av vann, SP er segrasjonspotensiale,

GF er temperaturgradienten fra overflaten til frostgrensen

X er frostpenetrering, n er porøsitet

Differensiell frosthevning

Foruten å generelt heve jorden har frosthevning en ekstra effekt på objekter. I arktiske strøk med permafrost kan finner man store områder med sortering av massene. Denne typen fordeling skjer også i områder hvor det kun er tele, men mengden sortering er mindre enn i områder med permafrost.

Som bevist av Corte (1963) vil fine materialer bevege seg foran frostgrensen som gir en vertikal sortering av massene under frosthevning. Den største sorteringseffekten kommer fra forflytning av store objekter (for eksempel steiner). Fenomenet fører til at en stein etter mange

perioder med tele kan dukke opp av jorden og havne på overflaten. To teorier om hvorfor dette skjer har blitt lagt fram blant annet av Lunardini (1981).

Frostdragning beskriver fenomenet hvor objekter fryser fast i de fine overliggende massene som drar steinen opp som et resultat av volumøkningen når vannet fryser. Når bakken tiner igjen vil objektet holdes fast i den underliggende frosne massen når den overliggende tinede massen konsoliderer, se [figur 2](#). Effekten er en heving av objektet i forhold til de omliggende massene. Som et bidrag til frostdragning vil det også oppstå et hulrom under objektet som heves, dette vil kunne fylles med fine masser som hindrer at objektet kan falle tilbake mot den opprinnelige posisjonen.

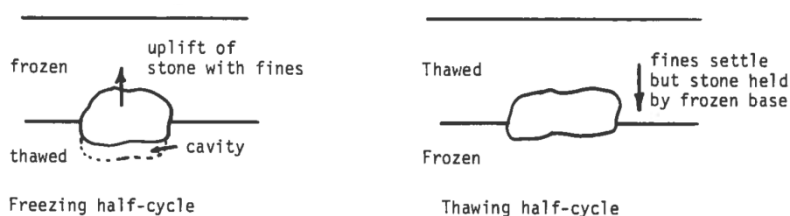


Fig. 5.2. Frost-Pull Mechanism.

Figur 2; Frostdragning (Lunardini 1981)

Frostdytting beskriver differensiert kuldepenetrering grunnet ulik varmeledningsevne for objekter og de omliggende massene. I all hovedsak vil en stein ha høyere varmeledningsevne enn de omliggende massene. Kuldepenetrering i bakken vil derfor gå raskere gjennom en stein enn de omliggende massene. Dette skaper en frostlinse rundt steinen som vil kunne dytte vekk massene over etter hvert som steinens midtpunkt flyttes oppover av økningen i volum fra is. Denne effekten er særlig stor dersom de omliggende massene har høyt vanninnhold, både grunnet økt migrasjon av vannet mot steinen, men også grunnet muligheten for plastisk deformasjon i den frosne grunnen. Isen i bunnen av steinen vil når jorden tines holde seg frossen lenger grunnet den latente fusjonsvarmen, dette selv om varmen går raskere gjennom steinen enn de omliggende massene. Dette gir massene rundt steinen muligheten til å konsolidere som ved frostdragning, se [figur 3](#).

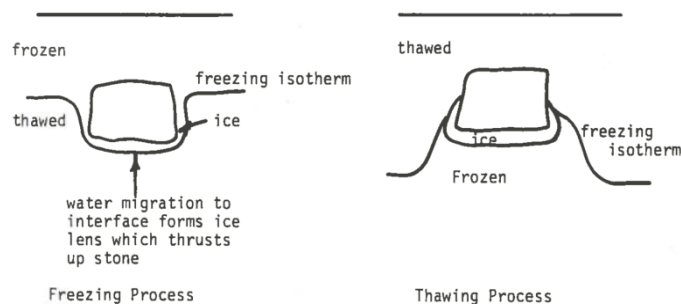


Fig. 5.3. Frost-Push Mechanism.

Figur 3; Frostdytting (Lunardini 1981)

Separasjonspotensiale (SP)

Faktoren foreslått av Konrad og Morgenstern i deres formel for frostheving.

Separasjonspotensiale er en faktor som kan beskrives som frosthevningspotensiale, dvs. en jordprøve sin mottakelighet for frostheving. Separasjonspotensialet til en gitt jordprøve vil minke når den utsettes for et økende trykk. Konrad og Morgenstern foreslo i 1984 en empirisk lov som beskriver størrelsen av separasjonspotensialet.

$$SP = SP_0 \exp(-ap_e)$$

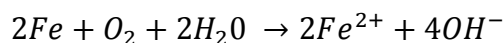
Hvor SP_0 er separasjonspotensialet med trykk lik 0. p_e er trykket som jorden er utsatt for og a er en spesifikk jordkonstant.

Korrosjon

Korrosjon er nedbrytning av et materiale grunnet reaksjoner med det omliggende medium. Det gjøres vanligvis en inndeling av korrosjon med bakgrunn i hva som er grunnen til denne nedbrytningen. De tre hovedtypene korrosjon er elektrokjemisk korrosjon, sementkorrosjon og bakteriell korrosjon. Felles for alle typene er at de enten alene kan føre til brudd gjennom tæring eller at de fører til en så stor nedbrytning av rørets struktur at det ikke lenger kan bære lastene og får brudd.

Elektrokjemisk korrosjon er beskrevet som summen av to delreaksjoner, en anodereaksjon og en katodereaksjon. Oksidasjon av metaller skjer i anodereaksjonen hvor metallet går til

metallioner og løse elektroner. En totalreaksjon fra elektrokjemisk korrosjon kan beskrives med følgende formel (i dette eksempelet jern):



Det var i LEYP analysen fra 2008 funnet en sammenheng mellom skinnegående trafikk og bruddrate. Dette kan skyldes brudd grunnet overlasten, men da de også er funnet tilsvarende høy andel korrosjonsrelaterte brudd under og i umiddelbar nærhet til skinnegående trafikk vil det være naturlig å anta at strøm fra tog, trikk eller t-bane øker korrosjonshastigheten under rørene.

Sementkorrosjon er utvasking og oppløsning av elementer i sementen. Deles vanlig vis inn i to undergrupper; oppløsning av kalsium og andre mineraler grunnet vann med lav pH og lav alkalitet, kjemiske angrep fra aggressive ioner som sulfat og klorid.

Bakteriell korrosjon består av bakterier som tilrettelegger for og øker korrosjon, i mange tilfeller gjennom akselerasjon av redoksreaksjonen. Sulfatreduserende, metanproduserende, nitratreduserende og jernbakterier er de mest vanlige bakterietypene som forårsaker bakteriell korrosjon.

Jordlaster

Massen av de overliggende materialene er det statiske trykket som virker på et nedgravd rør. Utover dette vil et nedgravd rør påvirkes av laster som påføres i kortere eller lengre perioder. Vintersesongen fører med seg de økte lastene grunnet tele da det økte volumet av frossent vann skaper en økt kompresjon av underliggende masser. Da de fleste rør legges under veier må det beregnes inn trafikklaster. Tilsvarende gjelder også dersom et rør går under t-banen eller toget. Det statiske trykket påført av de overliggende materialene vil tilsvare dybden røret er lagt på og massetettheten av de overliggende materialene.

En god modell for beregning av overlast for et rør er gitt ved:

For stive rør

$$Q_j = \gamma d_y^2 \left(\frac{1,642h_0}{d_y} - 0,690 \right), \text{ uten sidestøtte}$$

$$Q_j = \gamma d_y^2 \left(\frac{1,157h_0}{d_y} - 0,477 \right), \text{ med sidestøtte}$$

For fleksible rør

$$Q_j = N_a \gamma d_y h_0$$

Q_j er belastning fra overfyllingsmasser (kN/m), γ er egenvekt for omfyllingsmasser (kN/m^3), h_0 er avstanden fra topp av røret til overflaten (m), d_y er ytre diameter (m)

Formler hentet fra Sægrov (2009)

Frostlaster

Statistisk arbeid som påviser sammenhengen mellom kuldesesong og antall brudd har vært gjort av flere ulike forskere. Lackington og Large (1980), Kazemi (1989), Ciottoi (1985) Dennin (1991), Goulter og Habibian (1994), har alle påvist sammenhengen mellom årstid og antall brudd og størrelsen på vinterkulden og antall brudd.

Lignende arbeid har også vært gjort på gassledninger av Needham og Howe (1981), Lochabaum (1993) med en tilsvarende konklusjon som påviser sammenhengen mellom årstid og bruddrate.

Morris (1967) og Ciottoni (1983, 1985) har gjennom sitt arbeid funnet data som viser en bruddrate som er minst dobbelt så stor om vinteren enn om sommeren. Sundal (1996) viste gjennom et forsøk med 5 drikkevannsnettverk i Sverige en sammenheng mellom lufttemperatur og bruddrate. Wengström (1993) viste i sitt arbeid en høyere bruddrate for

duktilt jernrør om sommeren og en høyere bruddrate for grått støpejern om vinteren. Røstum (1997) fant i sitt arbeid med utgangspunkt i Trondheim en større andel innrapporterte brudd om sommeren, men dette ble forklart med økt lekkasjesøking om sommeren som avdekket korrosjon på ubehandlede støpejernsrør. Sægrov (1999) observerte på sitt arbeid i Storbritannia både en økt bruddrate på sommeren og på vinteren. Her ble den økte bruddraten på sommeren forklart med inntørking og krymping av leiere. I tillegg var det funnet en sammenheng mellom gjennomsnittstemperatur, nedbør og bruddrate for en periode på 10 år.

Tilsvarende forskning var gjort på rør i asbestsement av Hu og Hubble (2007) uten en statistisk modell for korrelasjon. De konkluderte likevel med at en sterk tendens mellom forstindeks og bruddraten fra 1980 til 2004.

Beregning av frostlaster er en utfordring. Størrelsene som er med å beregne frostlastene har alle store usikkerhetsmomenter. I første omgang er vanninnhold viktig for den økte frostlasten. Vanninnhold ligger innenfor nivåer for ulike jordtyper så en undersøkelse av en jordtype burde kunne gi en ide om gjennomsnittlig vanninnhold. Problemet som oppstår med påføring av frost er at det ikke bare er det eksisterende vanninnholdet som lager frostlasten, det er også det vannet som suges opp når bakken fryser til is, som beskrevet grundig i kapitlet om frosthevning. Edil og Bahmanyar (1983) beskriver hvordan lasten økes radikalt med tilgang til grunnvann.

Som vist av Brown (1994) kan selv små volumøkninger på så lite som 3 % potensielt skade enkle konstruksjoner med grunne fundamenteringer. En volumøkning i grunnen vil virke i to hovedretninger. Mot overflaten vil det lages et trykk som må motvirkes av overliggende masse bundet fast i ankere. I byer vil slike ankere typisk være bygninger som har grunnmur langt under overflaten og ofte er fundamentert direkte på fjell. Volumøkningen vil tilsvarende også føre til et økt trykk under frostgrensen som fører til en sammenpresning av massene. Dette har blant annet blitt forklart gjennom arbeidet til Monie og Clark (1974), Moser (1990) og gjennom arbeidet til Rajani og Zhan (1996) som kvantifiserer to metoder for estimering av frostlaster.

I noen tilfeller kan denne volumøkningen også føre til et sidetrykk grunnet differensiering av massene. En masse som har lav porøsitet vil sammentrykkes av omliggende masser med høy

porøsitet og vanninnhold. Rajani og Zhan (1997) beskriver og kvantifiserer gjennom sitt forskningsarbeid estimatet for frostlaster i grøfter med det overnevnte sidetykket grunnet heterogene masser.

Andre viktige konklusjoner fra tidligere arbeid av Monie og Clark (1974), Smith (1976), Molin (1985) beskriver hvordan frostlaster er estimert til å være 2 til 3 ganger så store som de opprinnelige jordlastene. Videre beskriver også Molin (1985) hvordan frostlastene er langt høyere på rør av stive materialer enn for rør av fleksible materialer.

Størrelsen på frostlastene er i denne oppgaven ikke beregnet. Den beste modellen å bruke ville vært den eksplisitte for estimering av frostlaster i grøfter, men det foreligger alt for lite informasjon om grøftene og massene som ligger i og omkring til at denne kan anvendes annet enn i enkelttilfeller. Et større forskningsarbeid for å vurdere størrelsen på frostlastene ville kunne fortelle noe om de reelle kreftene som virker på ledningsnettet med vinterkulda.

Det er med tidligere arbeid innenfor feltet funnet en signifikant økning i lastene som virker på nedgravde rør fra volumøkning med frostpenetrering og en tilsvarende signifikant sammenheng mellom størrelsen på denne kraften og frostpenetreringsdybden. Det er også i tidligere arbeid funnet signifikant sammenheng mellom størrelsen på lastøkning og total frosthevning. Det vil videre bli undersøkt sammenhengen mellom brudd og potensiell frosthevning og frostpenetrering for enkelte år med høy frostindeks.

Andre laster

Andre laster som er viktige for å undersøke maksimal styrke som røret må ha før det oppstår brudd kommer i all hovedsak fra trafikk. Dette kan være generell trafikk under en vei i form av kjøretøy, men også trikk, t-bane og tog. Størrelsen på lastene fra trafikk er vanskelig å vurdere, særlig når man vet at fordelingen av lastene avtar med dybde og at måling av trafikklaster har usikkerhetsmomenter. Antall passerende biler pr døgn kan være en faktor, men det tar ikke hensyn til at ulik vekt lager ulik last slik at en tungt lastet lastebil vil ha langt større effekt på et rør enn en personbil. For rør under sporgående transport vil antallet belastninger være lettere å beregne ut i fra rutetabeller og informasjon fra jernbaneverket. Hvordan lastene sprer seg i bakken er fremdeles ikke lett å beregne. Det var fra LEYP

analysen gjort i 2008 ikke funnet noen sammenheng mellom trafikk på vei og antall brudd, men derimot en sammenheng mellom skinnegående trafikk og brudd.

Jordtyper

Sammensetningen av massene er svært interessant for å kunne bestemme lastpåføring, vanninnhold og potensiell frosthevning. Ulike jordtyper har også andre kjemiske og biologiske egenskaper som vil påvirke omgivelsene, for eksempel i form av økt korrosjon eller ingen korrosjon. Norsk geologisk undersøkelse (NGU) har laget oversikt over Norge med de forskjellige grunnforholdene som eksisterer. Dette er en grov oversikt og tar for seg både grunnfjellet og løsmassene. Nøyaktigheten av kartet er dessverre ikke høy nok til at det i et mindre område kan brukes til å beskrive de faktiske massene, spesielt ikke i urbane områder hvor flytting av løsmasser har vært utbredt. For rørkonstruksjoner er det i all hovedsak interessant å se på løsmassene da de aller fleste rørledninger vil ligge i enten en eksisterende løsmasse eller en etterfylt løsmasse. Inndelingen som gjelder løsmassekartet er gitt i *figur 4*.



Figur 4; Løsmasser anvendt på kart fra NGU

Kuldeproblematikk med vanninnhold i jord

Den største utfordringen med kulde er vanninnhold. Et økt vanninnhold gir en lavere frostpenetrering. Men samtidig vil et større vanninnhold gi en økt frosthevning. Vanninnhold kan i stor grad styres av massene som ligger i grøften.

En leiremasse vil ha høyt vanninnhold, lav frostpenetrering grunnet høy varmekapasitet, men også høyere varmeledningsevne med høyere innhold av is i topplaget. Leiremasse vil også være utsatt for en større frosthevning og i noen tilfeller et totalt sammenbrudd av strukturen ved tining. Med eksisterende masser vil dette ha skjedd før og massen vil kunne betraktes som stabil. Med flytting av leiremasse vil leiere som ikke før har vært utsatt for frost nå kunne bli utsatt for det og får en langt større konsolidering av massene en først forventet.

En masse bestående av grus eller liknende vil ha lavt vanninnhold grunnet god drenering og lav eller ingen mulighet for å holde på vannet. Men en slik masse vil ha høy frostpenetrering grunnet lav varmekapasitet. En masse bestående av grus eller en liknende masse med god vanntransport vil gi lav eller ingen frosthevning. Men her kan det oppstå problemer med tanke på at frostpenetreringen når dypere enn ledningen. For ledninger med høy vannføring vil dette ikke føre til noen problemer. For stikkledninger med lav eller i perioder stillestående vannføring og liten vannmengde kan dette i de mest kritiske tilfellene føre til blokkering av rør og eventuelt skader som en konsekvens av frostsprengning.

Brudd

Brudd er resultatet av at spenningene som røret utsettes for overgår tillatt spenning. Tillatt spenning er en materialkonstant som er funnet av produsentene gjennom testet på feilfrie rør etter produksjon. Den virkelige bruddspenningen vil ofte ligge i størrelsesorden 1,5 ganger dimensjonert spenning grunnet sikkerhetsfaktorer. Denne bruddspenningen vil synke drastisk dersom rørets strukturelle integritet svekkes av korrosjon, med utviklingen av sprekker eller riss, påføring av treksial belastning og raske lastvariasjoner.

Utover dette er det vanlig å inndele brudd i to undergrupper, svikt i rørets strukturelle integritet grunnet spenning og svikt grunnet sprekkvekst. Inndelingen er gjort ut ifra hvor

raskt et stort brudd oppstår. En svikt i røret grunnet for høy spenning vil gi et stort brudd på en kort tidsperiode. En sprekkvekst er et brudd fra den første sprekken, men rørets struktur er beholdt. Denne sprekken vil så over tid utvikle seg til størrelsen på sprekken gjør at røret ikke lenger klarer å beholde sin struktur og vi får et åpent brudd.

Svikt i rørets strukturelle integritet vil si at den lasten som påføres er så stor at røret ikke kan bære lasten, dette vil ofte være grunnet store endringer i lastpåføringen eller en punktlast. Denne typen brudd betegnes av at det har et svært kort tidsaspekt fra det har strukturell integritet til det har oppstått brudd. Fra et ingeniørstandpunkt er dette en type brudd som ikke skal oppstå. I en planprosess kalkuleres den styrken et materiale må ha for å unngå denne typen brudd med en sikkerhetsfaktor, ofte også med valg av en dimensjon som øker sikkerhetsfaktoren ytterligere om man skulle være i tvil. Typiske sikkerhetsfaktorer vil ligge i området 1,3 til 1,5.

Brudd grunnet sprekkvekst er et kjent og veldokumentert fenomen i materialteknikken og er ofte beskrevet som utmatting. Denne typen brudd oppstår når gjentatte eller varige laster skaper en sakte svikt i materialet og er med mindre man langt overdimensjonerer styrken vanskelige å unngå. Brudd grunnet sprekkvekst beskrives gjennom stressintensitetsfaktoren K (SIF) som er en skaleringsfaktor for belastningen på sprekkeåpningen. Denne faktoren kan brukes for å beregne maksimal belastning når størrelsen på sprekken er kjent og for å beregne den kritiske sprekkstørrelsen når belastningen er kjent.

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a}$$

*σ er størrelsen på belastningen, Y er en geometrisk faktor,
 a er lengden av sprekken for ytre sprekker og halvparten av lengden for
 indre sprekker.*

Stressintensitetsfaktoren er den beregnende faktoren for sprø brudd, selv om deler av bruddsonen kan ha plastisk oppførsel er den plastiske sonen så liten i forhold til størrelsen på sprekken at den utløsende faktoren for brudd beskrives av et sprøtt brudd. Dette er også kjent som linjert elastisk bruddmekanikk (LEFM).

I tilfeller med de fleste metaller og kompositter/plastmaterialer som brukes i dagens teknologi er ikke den elastiske bruddmekanikken dekkende. Dette fordi den gjenværende plastiske sonen er signifikant i forhold til størrelsen på sprekken. Her vil ikke sprekken øke lineært, men få en elastisk-plastisk oppførsel som gir en ulineær sprekkvekst. Dette er i materialteknikken beskrevet som elastisk-plastisk bruddmekanikk (EPFM). Denne beskrives gjennom hvordan åpningen på bruddet flytter seg over tid, sprekkeåpningens forflytning (CTOD). Den begrensende faktor er da fremdeles kritisk sprekkstørrelse.

I noen tilfeller vil den plastiske sonen være like stor som det gjenværende materialet, typisk for enkelte komposittmaterialer. Her vil sprekkdannelsen finne sted til det gjenværende materialet ikke lenger har nok styrke til å bære den påførte lasten. Dersom den plastiske sonen er like stor som det gjenværende materialet vil tiden til brudd beregnes som en funksjon der gjenværende materialstyrke minker med sprekkeåpningens forflytning (CTOD) til et kritisk punkt.

Fra produsentene bør stressintensitetsfaktoren alltid være oppgitt sammen med maksimal materialstyrke, dessverre er det ikke slik at denne type data er tilgjengelig fra alle produsentene og de har generelt på oppfordring kun oppgitt at rørene er sterke nok.

For å forstå hvordan man skal unngå lekkasjer trenger å forstå hvorfor brudd oppstår. Årsaken til brudd kan i korte trekk beskrives som en mangel på styrke i røret i forhold til de kreftene røret utsettes for. Dette kan skyldes manglende styrke når røret legges, men dette er svært uvanlig og vil da stort sett skyldes produksjonsfeil som har svekket den opprinnelige styrken. Feilprosjektering kan også være en grunn til brudd i et nytt rør, men dette kan ikke tilegnes noen signifikans i det totale regnestykket.

En faktor som er med å forklare brudd på nye rør er skader når røret legges, enten i form av en mekanisk slitasje fra massene rundt eller som en skade fra et objekt eller i sammenheng med skjøting av rørlengder.

En stor andel av brudd kan knyttes til strukturelle svakheter i røret grunnet korrosjon. Her kan både innvendig korrosjon fra vannet og utvendig korrosjon fra grunnen bidra til en svekkelse av rørets styrke. Minst like viktig er det at korrosjon lager et svakt punkt hvor kreftene samles

slik at man ikke bare får et svakere rør men en annen fordeling av påførte krefter og eventuelt nye momentkrefter.

Mekanisk slitasje kan også oppstå når røret ligger nedgravd, dette da ofte i form av en stein som trykker mot røret. Diskutert i detalj i oppgaven er skader som oppstår grunnet frosthevning og konsolidering av masser når telen smelter. Denne frosthevningen gir også en god forklaring på hvordan steiner kan lage mekanisk slitasje på et rør.

Endring i laster er den siste store grunnen til brudd. Dette kan være endringer i trykket inne i røret eller endringer i lasten som påføres røret. Brudd som skyldes sprekkdannelse vil ofte kunne settes i sammenheng med store laster som påføres i kortere tidsrom, som for eksempel trafikk, tog og t-bane. Frostlaster kan gi sprekkdannelse når det er en stor last som påføres over et kortere tidsrom og også svikt i rørets strukturelle integritet grunnet spenning økt spenning.

I den opprinnelige rapporten fra 2008 har man sett på brudd som en helhet når det gjelder den statistiske analysen. Oppdeling i type brudd har kun vært gjort som en prosentandel av totale brudd og er ikke brukt i den videre analysen. I senere gjennomføringer vil det være av stor interesse å skille de ulike bruddtypene i hver sin klasse og teste parameterens signifikans i modellen mot bruddtype, ikke bare mot brudd i seg selv. De ulike bruddene har forskjellige tiltak som må igangsettes ved reparasjon. En årsakssammenheng for de ulike bruddtypene kan derfor være med på å vurdere om kriteriene for de ulike bruddene kan skilles fra hverandre eller om parameterne som forklarer bruddet er de samme uavhengig av bruddtype.

Tverrbrudd (tangentielle brudd)

SINTEF sin ”Modell for tid til brudd og gjennomtæring for ledninger av støpejern” (Sægrov, Fiksdal, Lange 2000) oppdeler tangentielle belastninger i 4 grupper; Jordtrykk, trafikklast, belastning pga massen til vannet i røret og andre jevnt fordelte belastninger. Summen av den tangentielle belastningen skal overgå rørets ringstyrke for at det skal oppstå et tverrbrudd. Denne oppgaven legger til en kategori for frostlaster i vintersesongen. SINTEF sin artikkel foreslår en anvendelse av Ekback & Hedman (1983) sin empiriske formel som sier at momentet som virker på røret er gitt ved:

$$M = 0,0844 Q d_y$$

Hvor M er moment i $\frac{kNm}{m}$, Q er summen av de tangentielle belastningene

d_y er rørets ytre diameter

Separate laster er foreslått blant annet i SINTEF sin rapport (Sægrov, Fiksdal, Lange 2000).

Dersom lasten er konsentrert i en linje langs bunn og topp endres denne til:

$$M = 0,159 Q d_y$$

Momentene gir som vist i blant annet SINTEF sin rapport (Sægrov, Fiksdal, Lange 2000) opphav til spenninger i ringretningen i rørveggen, som på grunn av rørtverrsnittets krumning gjør at strekkspenningene i innerkant er noe større enn trykkspenningene i ytterkant:

$$\sigma_i = \left(\frac{6M}{s^2}\right) \left(1 - \frac{s}{rd}\right) / \left(1 - \frac{s}{d}\right)$$

$$\sigma_y = \left(\frac{6M}{s^2}\right) \left(1 + \frac{s}{rd}\right) / \left(1 + \frac{s}{d}\right)$$

der σ_i og σ_y er henholdsvis innvendig strekk – og utvendig trykkspenning

$\left(\frac{kN}{m^2}\right)$, s er godstykkelse (m) og d er rørets midlere diameter (m)

Indre vanntrykk i ledningen vil gi spenninger i ringretning som gitt ved ligning fra Den Hartog (1949) (Hentet fra SINTEF sin rapport (Sægrov, Fiksdal, Lange 2000):

$$\sigma_t = \frac{p D}{2s}$$

Der p er innvendig vanntrykk, D er innvendig diameter og s er rørtets veggtykkelse

Minimum veggtykkelse kan da i følge SINTEF sin rapport beregnes med følgende uttrykk:

$$s = \left(\frac{6M}{\sigma}\right)^{0,5}$$

*Der σ er dimensjonerende strekkspenning i rørveggen, M er summen av momenter
 σ er summen av strekkspenningen gitt ved summen av den indre eller ytre
 spenningen pluss spenningen fra innvendig vanntrykk*

Da et tangentielt brudd er et brudd i ringretning vil et slikt brudd ikke kunne oppstå dersom det allerede har vært et brudd i aksialretning som dermed har ødelagt ringretningen.

Langsgående brudd (aksialbrudd)

Brudd i lengderetning er forårsaket enten av en utvendig kraft som presser sammen røret slik at veggene ryker eller at det indre trykket presser ut røret slik at veggene ryker. Ved legging av rør i dag fokuseres det på sidestøtte for å unngå det andre problemet, men dette har ikke vært gjort på eldre rør.

De ytre kreftene har i SINTEF sin rapport (Sægrov, Fiksdal, Lange 2000) blitt inndelt i jordlast og trafikklast, oppgaven legger til kategorier for andre jevnt fordelte laster og frostlaster i vintersesongen. Et langsgående brudd vil oppstå dersom summen av påført last overgår rørets styrke i aksialretningen.

Spenningen i aksialretningen kan beregnes med formel hentet fra Ekback & Hedman (1983):

$$\sigma_a = \frac{32 * M_{tot} * d_y}{\pi(d_y^4 - d_i^4)}$$

*Der σ_a er spenningen i aksialretningen, M_{tot} er summen av aksiale momenter,
 d_y er utvendig rørdiameter og d_i er indre rørdiameter*

Separate momenter for jordlast og trafikklast er foreslått av blant annet i SINTEF sin rapport (Sægrov, Fiksdal, Lange 2000).

Ut over påførte laster vil det også være påførte belastninger grunnet temperaturforskjeller. Denne spenningen er gjengitt blant annet i SINTEF sin modell (Sægrov, Fiksdal, Lange 2000):

$$\sigma_T = \alpha * \Delta T * E$$

*der σ_T er aksialspenninger grunnet temperaturforandringer,
 α er temperaturutvidelseskoeffesienten, ΔT er temperaturendringen i grader
 Celcius eller Kelvin og E er elastisitesmodulen*

Et eventuelt aksialbrudd kan deretter beregnes med enten Von Miseses eller Trescas ettergivningsvilkår.

Lekkasjesøkning

Hvor mange brudd som oppstår i løpet av et år er ikke nødvendig vis det samme antallet brudd som oppdages. Mengden brudd som lokaliseres ved hjelp av lekkasjesøking vil sammen med store brudd være antallet brudd som registres i løpet av et år. Gjennom lekkasjesøking kan man oppdage brudd som potensielt kan ha vært et brudd i flere år. Det er også slik at mannskap til å utføre lekkasjesøking er en begrensende ressurs for alle Vann- og Avløpsetater. Antall brudd som registreres har klar sammenheng med antall timer med gjennomført lekkasjesøking.

Det er i Oslo kommune rapportert at ca 40% av alle lekkasjene stammer fra ordinær lekkasjesøking og de resterende 60% fra innrapporterte hendelser fra abonnenter og andre i etaten. Den ordinære lekkasjesøkingen består av lytting på ledningsnettet på nattetid (for å unngå forstyrrelser) etter et rutenett som skal dekke hele byen i løpet av et år. Inkludert i den ordinære lekkasjesøkingen er også lytting på spesielt utsatte strekninger utover den oppsatte tidsplanen. De resterende lekkasjene rapporteres inn som bekymringsmeldinger som undersøkes og hvor en eventuell lekkasje lyttes fram.

Denne lyttingen gjøres elektronisk ved at lydbølger sendes ut fra to kilder i hver ende av ledningsstrekket og man ser etter forstyrrelser i den reflekterte lydbølgen. Det lyttes også manuelt med en metallstang mot røret som settes mot øret samt med et stetoskop med to metallobjekter i enden som legges mot bakken over ledningsstrekket. Alle lekkasjer vil ikke nødvendigvis fanges opp av søkemetodene, men treffsikkerheten på når det rapporteres lekkasje fra lytting og faktiske lekkasjer er i Oslo 100%.

Det er fra gruppen for lekkasjesøking hos VAV Oslo rapportert om at søking på rør av termoplaster gir omtrent halvparten så godt utslag som metaller eller GRP. Dette betyr at

lekkasjer på termoplast er langt vanskeligere å oppdage ved ordinær lekkasjesøking. Gruppen for lekkasjesøking ser klare sammenhenger mellom antall lekkasjer i starten på telesesongen og tilsvarende når telen tiner på våren.

Rørmaterialer og rørteknikk

Tall fra KOSTRA (2011) oppgir følgende fordeling av materialer for det kommunale røرنettet i Norge.

| Rørtype | Lengde (m) | Prosentandel av totalnett |
|------------------|------------|---------------------------|
| Asbest Sement | 2.198.741 | 4,9 % |
| Jern Stål | 14.359.458 | 32 % |
| PVC | 15.907.698 | 35,5 % |
| PE | 10.094.407 | 22,5 % |
| GUP | 98.693 | 0,2 % |
| Annet | 1.078.673 | 2,4 % |
| Ukjent Materiale | 1.073.705 | 2,4 % |

Tabell 1; Det totale ledningsnett i Norge, fordelt på materialer

Asbestsement

Asbestsement er armerte betongrør hvor asbestfibre fungerer som armering. Rørene stammer opprinnelig fra Italia og ble lagt i Norge fra rundt 1964 med oppstart av produksjon i Varberg i Sverige. Asbestsement er et elastisk materiale og vil både kunne ta laster som ren styrke men også med mindre elastiske deformasjoner.

Den største utfordringen til asbestsement er korrosjon, både innvendig og utvendig.

Asbestsement vil dersom det brukes som drikkevannsledning for bløtt og surt vann kunne få en rask nedbrytning av kalk og kalsiumsilikathydrater. Dette skjer i form av sulfatkorrosjon hvor sulfater som reagerer med spesielt med kalsiumsilikathydrater og lager et nytt stoff med betydelig mindre styrke enn utgangspunktet. Denne korrosjonen kan også skje utvendig i røret dersom grunnen inneholder sulfatreduserende bakterier. Det er spesielt leire og alunskifer som er kjente for å være sterkt korroderende på asbestsement. Sulfater kan også reagere med andre mineraler i asbestsement for å danne sulfatmineraler med større volum som gir en ”opphovning” av røret og en nedbrytning av rørets struktur.

Som vist av Hu og Hubble (2007) kan et svært lite antall brudd knyttes direkte til korrosjon (kun 0,7 %), dette vil da framtre som hull. Korrosjon vil kunne føre til en svekkelse av styrken i røret som kan gi brudd både i lengeretning og horisontalt. Asbestsement har i følge den samme artikkelen en synkende bruddrate med økende diameter, noe som knyttes direkte til den økte veggtykkelsen til den større diameteren som gir et prosentvis mindre tap av styrke grunnet korrosjon. (Korrosjonshastigheten vil være tilnærmet lik for alle rør av asbestsement så lenge grunnforhold og vannkvalitet er relativt konstant.)

Støpejern

Støpejern er fasongforming av jernlegering med et innhold av karbon på minst 2,1 % og silikon med et innhold mellom 1 og 3 %. For støping av rør vil dette gjøres enten i sandformer eller med spinnstøping.

Grått støpejern (SJG)

Grått støpejern er ikke et materiale som brukes i dag, men stort sett alle rør lagt før 1964 var av dette materialet. Grått støpejern er jern tilsatt grafitt støpt i sandformer og senere også spinnstøpt i sentrifuger. Som korrosjonsbeskyttelse av de eldre rørene var steinkulltjære og senere bitumen brukt, ingen av dem er særlig effektive. Men når det fremdeles ligger 100 år gamle rør i bakken som har liten eller ingen korrosjon eller skader forteller dette at støpejern er et særs holdbart materiale. Selv om mange brudd er påvist i grått støpejern, særlig de lagt mellom 1930 og 1964 skyldes dette nok i all hovedsak kvaliteten både på materialet og på grunnarbeidene. Tilsvarende rør lagt før 1930 har historisk hatt en bedre holdbarhet.

Overgangen fra støping i sandformer til spinnstøpte rør ga mye billigere rør, men senket samtidig kvaliteten betraktelig. Spinnstøpte rør har også en betydelig lavere veggtykkelse enn grå jernrør støpt i sandformer.

Navnet grått støpejern kommer av fargen på røret som oppstår grunnet tilsetning av grafitt. Denne ligger i grå støpejernsrør som flak i jernstrukturen og skaper mulige bruddlinjer. Brudd

i denne typen rør vil ofte forekomme som tverrbrudd og utsprengte flak som skyldes svakheten til jernet.

Duktile støpejernsrør (SJK)

Fra 1964 er stort sett alle støpejernsrør lagt i Norge duktile støpejernsrør. Duktile støpejernsrør består hovedsakelig av samme materialer som de grå støpejernsrørene, med den viktige forskjellen at det inneholder magnesium. Dette gjør at grafittflakene i støpejernet danner runde kuler i stedet for flak. Den runde former på grafitten gjør at det ikke dannes klare bruddflater i jernet og man får et mer seigt materiale som i langt større grad får deformasjoner i stedet for brudd.

Duktile støpejernsrør var i den første perioden uten innvendig korrosjonsbeskyttelse. Dette ble senere etterfulgt av korrosjonsbeskyttelse med Portland sement. Ingen av dem gav tilstrekkelig sikkerhet mot korrosjon. Dette har i senere tid blitt byttet ut med aluminol og flyveaskesement som inneholder aske fra brenning av kull. Den aluminale sementen er pr i dag ikke lenger aktuell som korrosjonsbeskyttelse grunnet krav til maksimalt aluminiumsinnhold i drikkevannet.

Overgangstemperatur

Overgangen mellom duktil og sprø atferd for metaller er svært viktig for å vurdere hvordan et rør vil kunne bære laster. Kraften som kreves for at metall skal gi etter øker med synkende temperatur. Dette vil med ulike materialer gi et temperaturområde hvor overgangen mellom duktil og sprø atferd, heretter kalt overgangstemperaturen. Denne teorien var opprinnelig satt fram av Davidenkov og Wittman (1937) og forklares med hvordan temperaturforandringer i metaller endrer motstandsdyktigheten mot skjærkrefter og kløyving. Forholdet mellom de to verdiene er avgjørende for om et metall får duktile eller sprø brudd.

Duktile materialer er viktige fordi de istedenfor å ha et brudd som fører til total ødeleggelse enten får små deformasjoner i strukturen eller et brudd med en plastisk sone som gir et tidsperspektiv til hvor lang tid det tar til bruddet er kritisk. Selv om et materiale vil få økt

styrke med lavere temperatur vil en overstigning av denne styrken føre til et kritisk brudd, hvor hele materialet kan bli ødelagt. En overstigning av materialstyrken i den duktile sonen vil kunne føre til varige deformasjoner, men vil ikke nødvendigvis føre til tap av struktur.

Stål (MST)

Stål er materiale med hovedandel jern og mindre enn 2,1 % karbon. Det meste av stålet som lages inneholder kun jern og karbon. Tilsetning av 1,5 % magnesium er en vanlig måte å øke styrken i materialet for en mindre økning i produksjonskostnadene. Stål er som duktile støpejernsrør et mykt materiale uten bruddflater og vil ha en tendens til plastisk utvidelse av sprekker og deformasjon framfor rene brudd. Stål har høyere styrke enn duktilt jern, noe som fører til at man kan redusere veggtykkelsen i rør.

Rustfritt stål er en legering av jern, mindre enn 2,1 % karbon og minst 11 % krom. Dette motvirker korrosjon under normale omstendigheter, men navnet rustfritt er noe missledende da det i virkeligheten kun er sterkt motstandsdyktig mot korrosjon. Dette fungerer ved at innholdet av krom er høyt nok til at det lages et tynt lag av kromoksid som beskytter mot videre korrosjon. Dette da kromoksid til forskjell fra oksidert jern har relativt lik struktur som utgangspunktet og lager gode bånd med det opprinnelige materialet og ikke vil flake av.

Termoplaster

Termoplaster er viskoelastiske materialer, det vil si at de ikke følger Young's modulus som jern eller stål, men at det under konstant spenning vil oppleve små permanente deformasjoner fram til slutten av levetiden. Termoplaster produseres med en sikkerhetsfaktor med bakgrunn i forventet levetid fram til deformasjonene er blitt så store at materialet går i stykker. Dette krever at termoplasten har muligheten til å deformeres. Denne viskoelastisiteten kan best sammenlignes med en brøddeig som når den ligger på en flate vil minske i høyde og øke grunnarealet.

Termoplaster leder ikke elektrisitet og er derfor naturlig beskyttet mot denne typen korrosjon. Det er derimot eksempler på at også termoplaster kan være utsatt for kjemisk korrosjon.

Termoplaster har utviklet seg mye siden de ble tilfeldig oppdaget tidlig på 1900-tallet, dette er i dag et materiale med høy styrke i forhold til egenvekt og pris. Historisk sett har den største utfordringen med termoplaster vært skader som har oppstått under legging og sjøting.

Av termoplaster som brukes i rørledninger er det særlig Polyetylen (PE) og Polyvinylklorid (PVC) samt noe Polypropylen (PP). Opprinnelig var PE et mer seigt materiale og PVC mer sprøtt, men de har med teknologiske nyvinninger nærmet seg hverandre i fysiske egenskaper.

Polyetylen (PE)

Polyetylen er det mest brukte syntetiske polymeren. Den framstilles ved polymerisering av etylen. PE i sin opprinnelige form er svært utsatt for UV stråling som gir rask nedbrytning av materialet, det har også siden begynnelsen av 70-tallet vært tilsatt antioksidanter for å hindre oksidering. Produksjon av Polyetylen gjøres under ulike temperatur og trykkforhold som gir ulik krystallisasjonsgrad og dermed ulike egenskaper.

Det deles stort sett inn i tre typer PE-rør som brukes i vann- og avløpsbransjen, dette er polyetylen med lav tetthet (PEL), polyetylen med middels tetthet (PEM) og polyetylen med høy tetthet (PEH). Med økende tetthet kommer det økende E-modul (elastisitetsmodul; beskriver et materiales motstandsevne mot elastisk deformasjon). Økende E-modul fører også med seg lavere potensiell plastisk deformasjon og dermed høyere sjanse for sprø brudd.

Sammenkobling av polyetylenrør skjer stort sett ved hjelp av sveising (speilsveising, elektromuffesveising), men mekaniske strekkfaste koblinger brukes også. Legging og skjøting av PE-rør har hatt store utfordringer med at det har oppstått skader, dette har skyldes både manglende kunnskap om sveising, skader på rør under transport og legging og skader på rør som trekkes inn under no-dig. Dette har bedret seg både med økt kunnskap om PE sveising og med kapper av polypropylen som beskyttelse.

Polyvinylklorid (PVC)

Polyvinylklorid er en av de mest brukte plastene i verden, en stor del av dette skyldes bruk til drikke- og avløpsledninger. PVC er laget gjennom polymerisering av vinylklorid, en gass framstilt fra etylen og klorgass. Klorgass er lett tilgjengelig gjennom elektrolyse av sjøvann. Etylen er framstilt av nafta, en gruppe hydrokarboner som har kokepunkt fra 70 til 140 grader celsius. Polyvinylklorid deles opp i to undergrupper PVC-U og PVC-P, hvor den første kun er PVC og den andre er tilsatt en plastiseringsmiddel som øker de plastiske og eller viskøse egenskapene. Dette gir PVC en større mulighet til å bøyes under kaldere forhold, men minsker muligheten for å bære statiske laster eller gir større deformasjoner under statiske laster. Det mest brukte plastiseringsmiddelet er ftalater, en ester av ftalsyre.

De fleste rør som lages av PVC er uten plastiseringsmiddel (PVC-U) for at de skal kunne bære statiske laster fra jordmasser. Rør av PVC skjøtes vanlig vis sammen med ferdig integrerte muffeskjøter. Skjøtene er ikke strekkfaste, noe som gir økte krav til gjennomføring ved legging. PVC er et stivere materiale enn PE og er derfor langt mer utsatt for sprø tverrbrudd, et brudd som ofte gir total stopp i transporten. De sprø egenskapene til PVC knyttes opp mot glassovergangene (glassovergangene er temperaturer hvor herdeplaster får en mer sprø materialstruktur), spesiell interessant er den sekundære som finner sted mellom -10°C og -25°C .

Glassfiberarmert umettet polyester (GRP/GUP)

Glassfiberarmert polyester er et materiale som dukket opp rett før andre verdenskrig i USA. Materialet kom til Norge på 50-tallet da hovedsakelig brukt som materiale i skroget på fritidsbåter. Materialet regnes som en herdeplast og kan ikke som termoplastene omformes etter støping. Dette skyldes den kryssbundete molekylstrukturen som materialet består av, til forskjell fra termoplastene som består av ubundete molekylkjeder. Denne molekylstrukturen gjør blant annet at GRP ikke har en nedre glassovergang som termoplaster.

Glassfibertrådene ligger som et skjellet i hele rørstrukturen og støpes inn i polyester, ofte blandet inn med andre materialer for å oppnå en ønsket egenskap. Et svært vanlig fyllstoff er sand. Det er flere typer estere som kan anvendes i konstruksjonene av GRP rør, men til rør

brukt i VA er ortoftalsyrepolyester den mest brukte. Materialet har svært høy styrke og lav termisk utvidelse, men er noe tyngre enn termoplastene. Det har også relativt høy produksjonskostnad for rør av mindre dimensjoner, som har gjort materialet mindre utbredt i Norge. Prisen er i dag mer og mer konkurransedyktig, spesielt for større dimensjoner. Sett i sammenheng med fordelene av et materiale som ikke korroderer vil dette være et svært interessant valg for rør som legges i dag.

Isolering av rør

Isolering er å legge inn et materiale med svært lav varmeledningsevne mellom røret og overflaten med mål om å blokkere store deler av varmemestrømmen ut av bakken.

Minimumstemperaturen ved et valgt punkt under overflaten vil styres av varmebalansen med tilført varme fra den naturlige jordvarmen og varmetransporten fra punktet til den kalde overflaten. Hastigheten på denne varmetransporten er styrt av varmeledningsevnen mellom punktet og overflaten.

I et eksempel med en asfaltert vei vil denne varmetransporten kunne deles inn i lag med ulike varmeledningsevner. Innføring av isolasjon er innføringen av et lag med lav varmeledningsevne som vil redusere hastigheten varme forlater bakken og føre til en lavere frostpenetrering. Størrelsen på isolasjonen er avhengig av isolasjonsmateriale, mengden og type overfylling og mengden og størrelsen på temperaturer under null grader i løpet av en vinter. Isolering vil gi en lavere minimal temperatur ved et punkt under overflaten enn dersom det ikke var isolert.

Varmestrømmen kan også forsinkes med innførsel av et materiale med høy varmekapasitet, særlig om det har et høyt vanninnhold. Dette da en del av varmen som forsvinner fra bakken må brukes til faseforandringen mellom vann og is. Effekten av dette vil være sammenlignbar som bruk av isolerende materialer. Ulempen med dette er at varmeledningsevnen til is er svært høy og et høyt innhold av vann vil gi et høyt innhold av is og dermed en høy total varmeledningsevne.

Is i rørnett

Som en konsekvens av ekstreme vintertemperaturer eller rør med manglende beskyttelse mot kulde kan røreledningene få indre dannelse av is og i verste fall fryse helt. For å bedre kunne forstå hvordan man unngår dette må man først forstå de fysiske forutsetningene som skal til for at det dannes is og spesifikt is i rørsystemer.

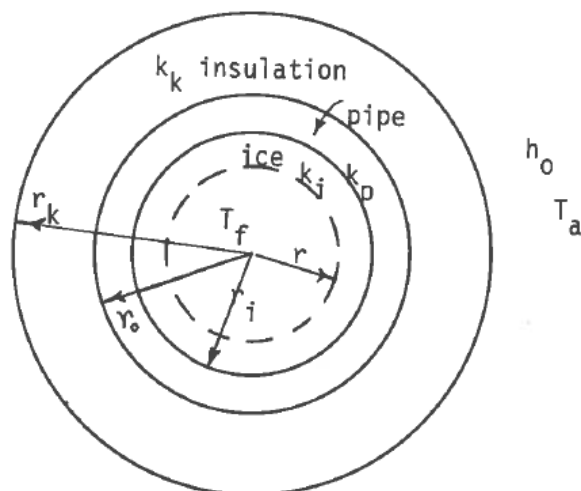
Is er som kjent den faste formen av vann som oppstår når vann ved normalt trykk er under eller lik 0 grader celsius. Dannelsen av is styres gjennom energifrigjørelse fra vannmolekylene til omgivelsene som et resultat av termodynamiske lover som vil prøve å utjevne temperaturforskjeller. Vann går da over i den faste formen med en gitterstruktur, svært høy styrke og et ca 9% høyere volum.

For at dette skal skje i et rør med svært lav eller ingen strømning handler det i utgangspunktet bare om en lav nok temperatur rundt røret. Men for rør med normal gjennomstrømning blir problemet et spørsmål om forholdet mellom temperatur, tid og volumstrøm. Et stillestående rør skal kun ha lav nok temperatur over en lang nok periode for at vannet fryser.

En fremstilling av hvordan denne prosessen skjer i et rør er gitt av blant andre Lunardini (1981).

$$t_f = \frac{L}{K_i(T_f - T_a)} \frac{r_i^2}{2} \left[\frac{1}{2} + S \right]$$

$$\text{hvor } S = k_i \left\{ \frac{1}{k_p} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{k_k} \ln \frac{r_k}{r_o} + \frac{1}{r_k h_o} \right\}$$



Figur 5; Vekst av is i et rør, hentet fra s610 "Heat transfer in cold climates" Lunardini 1981

Dette gjelder for rør uten væskestrømning, med innføring av væskestrøm vil problemet bli ytterligere komplisert med følgende likning.

$$T_{wom} = \frac{R_1}{R_T - R_1} (32 - T_a) + 32$$

$$\dot{m}_m = \frac{L/c_w R_T}{\ln \left[\frac{R_T - R_1}{R_T} \frac{T_{wi} - T_a}{32 - T_a} \right]}$$

Dette er formler laget med det amerikanske enhetssystemet, en omsetning til SI enhetene kan gjøres ved en utbytting av temperaturene i grader Fahrenheit til grader celsius. Videre også utbytting av andre amerikanske enheter til SI enheter.

$$\text{Temperatur (Fahtenheit)} = \text{Temperatur (Celsius)} * \frac{9}{5} + 32$$

Dette gir følgende formler for frysning av rør med stillestående vann og med vanntransport.

$$t_f = \frac{5L}{9K_i(T_f - T_a)} \frac{r_i^2}{2} \left[\frac{1}{2} + S \right]$$

$$\text{hvor } S = k_i \left\{ \frac{1}{k_p} \ln \frac{r_o}{r_i} + \frac{1}{r_k h_o} \right\}$$

$$T_{wom} = \frac{5R_1 T_a}{9(R_T - R_1)} + 32$$

$$\dot{Q}_{min} = \frac{L/c_w R_T}{\ln \left[\frac{R_T - R_1}{R_T} \frac{T_{wi} - T_a}{-T_a} \right]}$$

Da det stort sett ikke er vanlig å legge rør med isolasjon, spesielt ikke i Sør-Norge, vil deler av ligningen med S falle ut i null. Rørene legges også stort sett i bakken slik at h_0 blir varmeledningsevnen til bakken og ikke til luften.

R_T er den totale termiske resistansen mot varmestrømning.

$$\text{Denne er gitt som } R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

Hvor R_1 er den innvendige konvektive resistansen gitt ved

$$R_1 = \frac{1}{2\pi r_i h_i}$$

R_2 er konduksjonsresistansen til røret gitt ved

$$R_2 = \frac{1}{2\pi k_p} \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)$$

R_3 er konduksjonsresistansen til isolasjonen, gitt ved

$$R_3 = \frac{1}{2\pi k_k} \ln \left(\frac{r_k}{r_o} \right)$$

R_4 er opprinnelig den utvendige konvektive og strålings resistansen

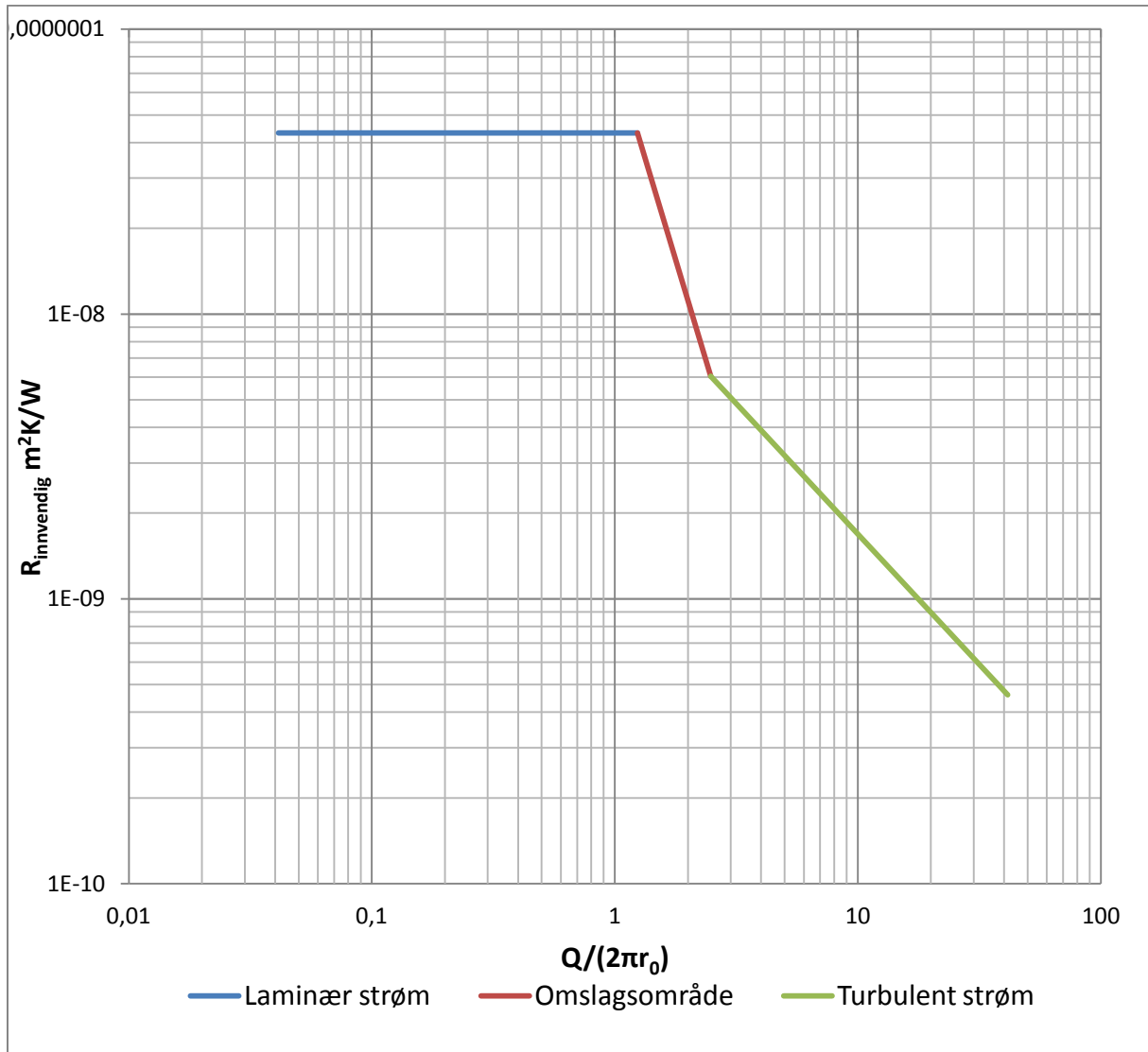
Da ligningen anvendes på nedgravde rør erstattes denne med

Konduksjonsresistansen til bakken gitt ved

$$R_4 = \frac{1}{2\pi r_o h_0}$$

R_3 er i videre undersøkelser satt til å være 0

Den innvendige konvektive resistansen er gitt ut i fra [figur 6](#).



Figur 6; Sammenheng mellom strømning, diameter og konvektiv resistans (Omsetning til SI-enheter av tilsvarende figur med amerikanske enheter fra Lunardini (1981))

Del 2. Konkrete undersøkelser av lekkasjer på drikkevannsnettet i Oslo

Geologiske undersøkelser

Forsøksoppsett

Det er fra vinteren 2012-2013 hentet inn jordprøver fra massene over ledningene der det utføres arbeid etter en lekkasje. Prøvene er hentet inn av ansatte ved gravelaget til driftsstasjonen til Vann- og Avløpsetaten i Oslo. Følgende kriterier er lagt til grunn for innhenting av prøvene:

Uthenting av jordprøver (oversendt driftsavdelingen til VAV Oslo)

Hver prøve krever 2 plastposer med låsmekanisme, den første til jordprøven og den andre for å sikre at innholdet i pose nummer en ikke degraderes før undersøkelsene er gjort. Den første posen fylles opp med jord slik at den er relativt full, den lukkes og legges i pose nummer to som også lukkes.

Jordprøvene skal hentes ut midt i grøften dersom fyllmassen er relativt homogen. Om fyllmassen er inhomogen skal det mest signifikante fyllmaterialet velges. I tilfeller hvor det ikke er en andel av fyllmassen som har en signifikant andel av den totale massen skal jordprøven gjenspeile heterogeniteten i fyllmassen.

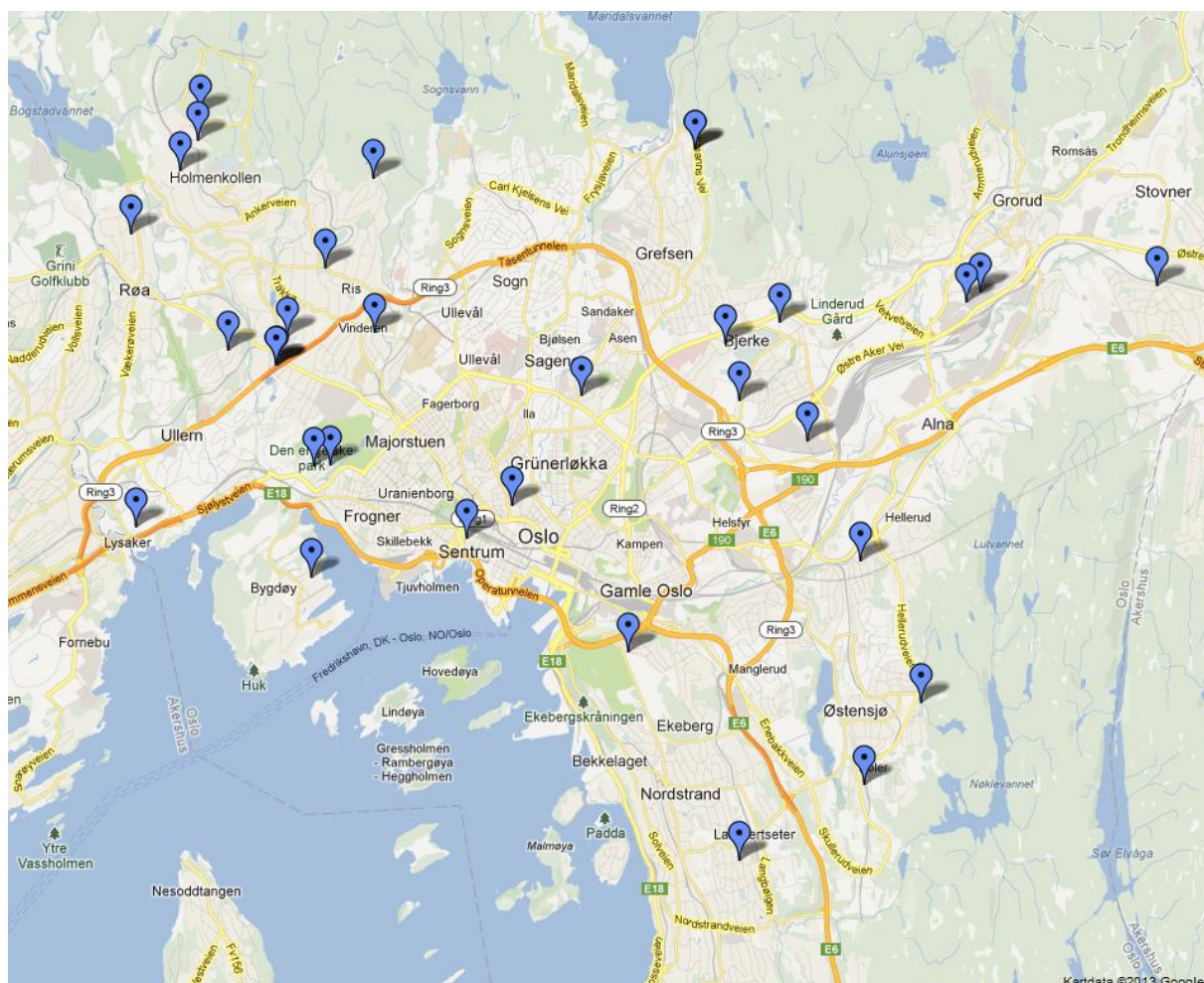
Store steiner skal ignoreres, men dersom massen består av mange mindre steiner ønskes det jordprøver som gjenspeiler dette.

Prøvene skal merkes med dato og geografisk plassering.

Utover dette ble det avtalt på møte med VAV Oslo at prøvene også skulle merkes med dybden til vannrøret.

Prøvene stammer fra et utvalg av steder i Oslo, som vist i [figur 7](#). Det er ikke hentet inn prøver fra alle innrapporterte lekkasjer i denne perioden, men et tilfeldig utvalg avhengig av når ansatte ved gravelaget har hatt anledning til å hente ut prøver. Det er videre ikke hentet

inn jordprøver fra knuste masser som i de fleste tilfellene vil være 8/12 grus, dette da de ikke vil kunne holde på vann og kan regnes som homogene masser. Det er også hentet ut noen prøver der det av andre grunner er gjort gravearbeider.



Figur 7; Oversikt over geografisk plassering for jordprøver hentet ut av VAV Oslo

Gjennomføring av jordprøveanalyse er gjort ved vannlaben i fløy V ved Institutt for Matematiske realfag og Teknologi (IMT) ved Universitetet for Miljø- og Biovitenskap (UMB). Prøvene som er hentet inn er på mellom 2-3 liter, av dette har det blitt valgt ut en vekt rundt 600g for videre testing. Denne mengden er valgt av rent praktiske grunner både grunnet kapasitetsproblemer med tørkeovn, men også da denne mengden er velegnet for å gjøre en jordtypeklassifisering basert på kornstørrelsesfordeling. I tilfeller hvor den opprinnelige prøven inneholdt en stor stein som ville ødelagt homogeniteten i prøven er denne valgt bort, ellers er det forsøkt å velge en testprøve som er representativ for hele den innhentede prøven.

Prøvene er tørket i laboratoriumovn fra Termaks på 105 grader i minst 18 timer. Dette er valgt for å sikre at prøvene er helt uten vanninnhold og igjen også ut i fra et praktisk ståsted slik at det er skapt kontinuitet i gjennomføringen av de geologiske undersøkelsene. Etter tørking er prøvene silt gjennom siler med spalteåpning på 19mm, 4mm, 2mm, 0,42mm og 0,076mm. Dette er valgt etter jordprøveklassifisering funnet i «Frozen Ground Engineering (2004)» som igjen har hentet fordelingsinndelingen fra «Department of the Navy (1982)», denne finnes i [appendiks A.5](#). To unntak til denne inndelingen er gjort. Klassifiseringen av fin grus er valgt som området mellom 4mm og 19mm samt at klassifiseringen av grov sand er valgt som området mellom 2mm og 4mm (kilden bruker 4,76mm som grense i stedet for 4mm, endringen er gjort ut i fra manglende tilgjengelighet på en sil med 4,76mm spalteåpning).

I gjennomføringen av silingen er det på prøvene tilført vann i silingsprosessen for å sørge for at alle masser er oppløst og ført i riktig kornstørrelsesgruppe. Ideelt sett skulle dette vært tilført destillert vann for å sørge for at det ikke skjer noen ionisering av jordprøven. Med omfanget av antall prøver og størrelsen på disse har det etter samtaler med Line Tau Strand (Jordfag - UMB) vurdert som en uvesentlig feilkilde å benytte seg av vanlig drikkevann fra spring, dette er derfor benyttet i siling av prøvene.

Prøvene er etter siling tørket nye 18 timer i ovn og deretter veid i de ulike kornstørrelsesfraksjonene. Den manglende massen fra den tørkede prøven trukket fra de 5 fraksjonene er satt som masseandelen med en kornstørrelse under 0,074mm. For hver prøve er det så gjort en vurdering av type masse fra tabellen funnet i [appendiks A.5](#).

Resultater

| Prøve | Sted | Dato | Dybde [m] | Diameter VL [mm] | Materiale | Bruddtype |
|-------|-----------------------|------------|-----------|------------------|-----------|----------------|
| 1 | Melkeveien 60 | 14.12.2012 | 1.8 | 150 | SJG | B02 |
| 2 | Madserud Alle | 18.12.2012 | 1.85 | 125 | SJG | B06 |
| 3 | Bakkerudveien 10 | 20.11.2012 | 2 | 100 | SJG | B02 |
| 4 | Refstadsvingen 11 | 16.01.2013 | 1.75 | 150 | SJG | B02 |
| 5 | Hospitsveien 5 | 22.01.2013 | 3.5 | 150 | SJG | B02 |
| 6 | Myrerskogveien 47 | 15.11.2012 | 2 | 150 | SJG | B19 |
| 7 | Stamhusveien 13 | 24.01.2013 | 1.7 | 150 | SJG | Ukjent |
| 8 | Voksenkollveien 30 | 10.12.2012 | 1.8 | 150 | SJG | B02 |
| 9 | Akersgata 60 | 26.11.2012 | 1.8 | 180 | PE | Andre arbeider |
| 10 | Sollerudveien 5b | 30.11.2012 | 1.9 | 150 | SJG | B06 |
| 11 | Ullernchauseen 8 | 03.12.2012 | 1.9 | 150 | SJG | B02 |
| 12 | Østmarkveien 71 | 08.11.2012 | 2 | 150 | SJG | B02 |
| 13 | Rosenlundgata | 04.01.2013 | 2.2 | 125 | SJG | B02 |
| 14 | Ivar Aasens vei 1 | 07.12.2012 | 1.9 | 125 | SJG | SBV |
| 15 | Økern Torgvei 3 | 19.11.2012 | 1.85 | 150 | SJG | B02 |
| 16 | Måltrostveien 23 | 20.11.2012 | 2.1 | 150 | SJG | B02 |
| 17 | Haraldrudveien 29 | 11.01.2013 | 2.2 | 200 | SJG | B02 |
| 18 | Stordamsnaret 5 | 03.01.2013 | 1.95 | 150 | SJG | B02 |
| 19 | Risalleen 40 | 29.11.2012 | 2 | 175 | SJG | B04 |
| 20 | Stålfjæra 11 | 31.01.2013 | 1.8 | 200 | SJG | SBV |
| 21 | Myrerskogveien 47 | 16.11.2012 | 2.8 | 150 | SJG | B19 |
| 22 | Thunes vei 17 | 31.01.2013 | | 125 | SJG | B01 |
| 23 | Holmenveien 62 | 05.01.1900 | 2.2 | 150 | SJG | Ukjent |
| 24 | Stålfæra 1 | 29.01.2013 | 2.5 | 200 | SJG | B03 |
| 25 | Marting Linges vei 43 | 13.12.2012 | 3 | 250 | SJG | B02 |
| 26 | Haugmansveien BIT | 05.11.2012 | 2.2 | 300 | SJK | Rørscanning |
| 27 | Hellerudveien 142 | 12.11.2012 | 2 | 300 | SJG | B01 |
| 28 | Telesvingen | 04.01.2013 | 2 | 125 | SJG | B02 |
| 29 | Dronninghavnveien 6 | 10.01.2013 | 2.2 | 100 | SJG | B02 |
| 30 | Linjeveien 46 | 01.11.2012 | 1.8 | 150 | SJG | Ukjent |
| 31 | Røahellinga 24 | 08.11.2012 | 1.9 | 125 | SJG | B09 |
| 32 | Ullernchauseen 8 | 18.12.2012 | 1.9 | 150 | SJK | B06 |
| 33 | Ullernchauseen 6 | 14.12.2012 | 1.9 | 150 | SJK | B04 |
| 34 | Olav V's Gate | 05.12.2012 | 1.8 | 150 | SJG | B02 |

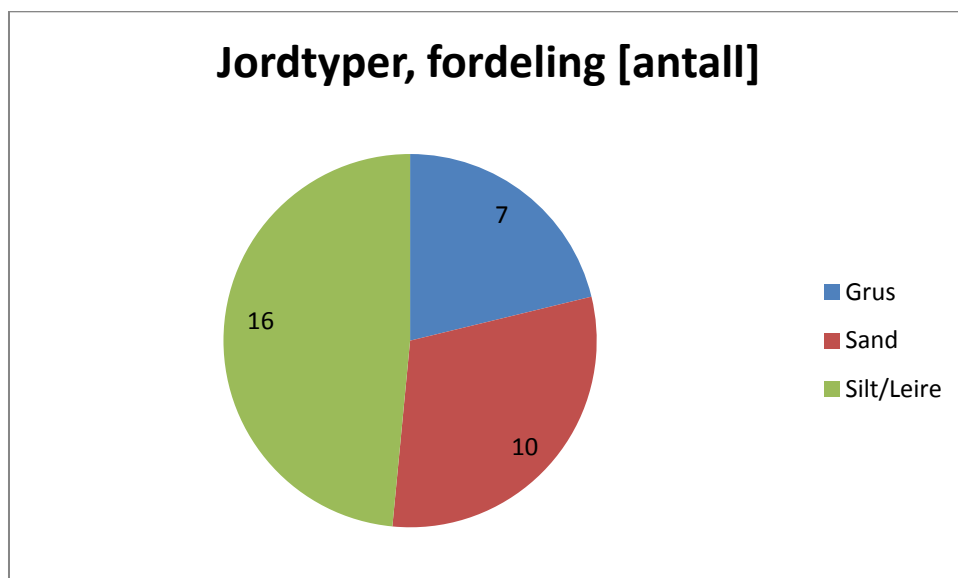
Tabell 2; Oversikt over jordprøver med dato for hentet prøve, rørdybde, diameter på vannledning, rørmateriale og bruddtype (evt. type arbeid)

| Prøve | Vanninnhold | Fraksjon [%] med en størrelse mindre enn | | | | | | Jordtype |
|-------|-------------|--|----------|---------|---------|---------|----------|------------|
| | | 40 mm | 19 mm | 4 mm | 2 mm | 0.42 mm | 0.074 mm | |
| 1 | 11.48 % | 100.00 % | 93.68 % | 59.61 % | 52.35 % | 36.47 % | 23.87 % | Sand |
| 2 | 8.27 % | 100.00 % | 81.04 % | 68.32 % | 63.65 % | 40.42 % | 23.85 % | Sand |
| 3 | 15.34 % | 100.00 % | 100.00 % | 96.39 % | 93.90 % | 86.52 % | 82.59 % | Silt/Leire |
| 4 | 12.77 % | 100.00 % | 100.00 % | 93.68 % | 92.65 % | 90.30 % | 87.11 % | Silt/Leire |
| 5 | 9.97 % | 100.00 % | 77.84 % | 55.71 % | 46.85 % | 31.46 % | 24.49 % | Grus |
| 6 | 8.86 % | 100.00 % | 84.66 % | 77.04 % | 72.69 % | 59.07 % | 48.39 % | Silt/Leire |
| 7 | 13.65 % | 100.00 % | 100.00 % | 95.60 % | 92.37 % | 79.60 % | 66.34 % | Silt/Leire |
| 8 | 6.62 % | 100.00 % | 75.76 % | 58.87 % | 54.65 % | 40.00 % | 9.40 % | Sand |
| 9 | 14.36 % | 100.00 % | 97.86 % | 61.05 % | 52.07 % | 34.82 % | 26.69 % | Sand |
| 10 | 13.54 % | 100.00 % | 100.00 % | 95.23 % | 93.40 % | 89.02 % | 83.05 % | Silt/Leire |
| 11 | 3.17 % | 100.00 % | 92.02 % | 56.83 % | 49.69 % | 32.20 % | 21.91 % | Grus |
| 12 | 13.86 % | 100.00 % | 100.00 % | 97.85 % | 95.92 % | 90.88 % | 81.31 % | Silt/Leire |
| 13 | 7.15 % | 100.00 % | 82.44 % | 68.04 % | 64.18 % | 44.43 % | 19.30 % | Sand |
| 14 | 18.05 % | 100.00 % | 80.58 % | 55.60 % | 50.66 % | 37.96 % | 26.48 % | Sand |
| 15 | 6.25 % | 100.00 % | 97.01 % | 78.67 % | 72.72 % | 52.26 % | 26.44 % | Silt/Leire |
| 16 | 14.49 % | 100.00 % | 100.00 % | 88.14 % | 84.89 % | 77.07 % | 70.96 % | Silt/Leire |
| 17 | 15.07 % | 100.00 % | 100.00 % | 99.75 % | 99.26 % | 95.06 % | 93.23 % | Silt/Leire |
| 18 | 14.64 % | 100.00 % | 100.00 % | 98.55 % | 97.56 % | 93.09 % | 88.75 % | Silt/Leire |
| 19 | 12.81 % | 100.00 % | 98.26 % | 88.39 % | 82.38 % | 63.01 % | 55.04 % | Silt/Leire |
| 20 | 13.85 % | 100.00 % | 100.00 % | 97.17 % | 96.42 % | 92.49 % | 90.39 % | Silt/Leire |
| 21 | -1.09 % | 100.00 % | 88.92 % | 47.26 % | 39.11 % | 20.95 % | 11.52 % | Grus |
| 22 | 12.94 % | 100.00 % | 98.90 % | 97.46 % | 96.33 % | 94.66 % | 92.02 % | Silt/Leire |
| 23 | 3.26 % | 100.00 % | 83.09 % | 39.62 % | 31.89 % | 19.03 % | 12.67 % | Grus |
| 24 | 11.46 % | 100.00 % | 89.20 % | 81.44 % | 79.42 % | 73.20 % | 67.18 % | Silt/Leire |
| 25 | 10.19 % | 100.00 % | 81.52 % | 56.51 % | 53.15 % | 45.87 % | 39.77 % | Sand |
| 26 | 1.94 % | 100.00 % | 93.05 % | 55.57 % | 47.04 % | 31.74 % | 22.14 % | Grus |
| 27 | 10.33 % | 100.00 % | 94.88 % | 79.52 % | 74.70 % | 56.77 % | 38.96 % | Silt/Leire |
| 28 | 2.51 % | 100.00 % | 87.31 % | 37.37 % | 31.48 % | 23.70 % | 20.49 % | Grus |
| 29 | 1.29 % | 100.00 % | 83.06 % | 62.36 % | 57.18 % | 38.13 % | 23.09 % | Sand |
| 30 | 5.30 % | 100.00 % | 83.83 % | 60.59 % | 53.66 % | 29.91 % | 16.03 % | Sand |
| 31 | 8.67 % | 100.00 % | 100.00 % | 78.65 % | 73.39 % | 66.40 % | 63.86 % | Silt/Leire |
| 32 | 3.10 % | 100.00 % | 61.66 % | 51.43 % | 48.80 % | 42.07 % | 37.19 % | Grus |
| 33 | 9.14 % | | | | | | | |
| 34 | 2.95 % | 100.00 % | 87.97 % | 58.81 % | 53.71 % | 38.58 % | 22.70 % | Sand |

Tabell 3; Oversikt over jordprøver med vanninnhold, fraksjonsfordeling og jordtype

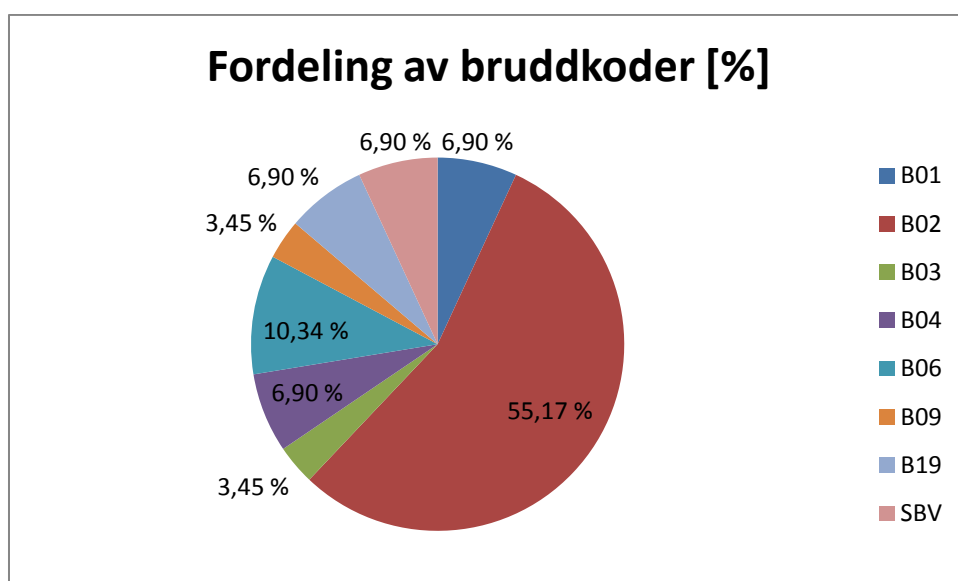
Prøvene er i tabellene sortert etter gjennomføring og ikke etter uthenting/arbeidstidspunkt. Av det totale prøveantallet på 34 er det 2 prøver som har blitt skadet. Prøve nummer 21 fra Myrerskogveien har fått feil vekt før tørking og har derfor fått et negativt vanninnhold. Prøve nummer 33 fra Ullernchauseen 6 har manglende data på fraksjonsinndeling grunnet tap av en fraksjon.

Vist i *tabell 2* er hovedklassen for jordtype etter ”Department of the Navy (1982)” (*appendiks A.5*), en mer nøyaktig klassifisering innenfor hovedtype er gjort og tilgjengelig i *appendiks C.3*.



Figur 8; Fordeling av jordprøver i jordtyper

Totalt av de 33 prøvene som har fått en fraksjonsdeling er det 16 prøver (48,5 %) som er blitt klassifisert som silt/leire, 10 prøver (30,3 %) som har blitt klassifisert som sand og 7 prøver (21,2 %) som har blitt klassifisert som grus.



Figur 9; Fordeling av bruddkoder for de jordprøvene som er hentet ut i forbindelse med lekkasjer

Av de jordprøvene som har vært hentet ut ved arbeider knyttet til lekkasjer er det 55,17 % (16 stykk) som er grunnet bruddkoden B02 (tverrbrudd). Det er også to lekkasjer som ikke har fått noen bruddkode knyttet opp til hendeles, disse er markert med bruddkode SBV. Fordelt på materiale er det 2 tilfeller med lekkasjer på duktilt støpejern (SJK) og 27 lekkasjer på grått støpejern.

Detaljer fra hele forsøket finnes i [appendiks C.3](#).

Feilkilder ved gjennomføring

I gjennomføringen av jordprøveanalyse har det blitt gjort en god del valg som har fått konsekvenser i form av manglende resultater og som i seg selv er et usikkerhetsmoment i videre analyse. Det er likevel gjort et valg om å analysere de resultatene som er funnet og heller kommentere usikkerheten slik at det er mulig å gjøre en bedre analyse ved en senere anledning.

I uthenting av jordprøver har det blitt hentet ut prøver av ansatte ved driftsstasjonen til VAV Oslo på Helfyr. I denne uthenting har det ikke vært ført noen kontroll med hvordan prøvene er hentet ut, utover den opprinnelige instruksjonen, i oppgaven er det derfor lagt til grunn at de opplysningene som prøvene er merket med stemmer over ens med det reelle forholdet. Det vil selvfølgelig ikke være i VAV Oslo sin interesse å oppgi feil informasjon, men at det kan ha oppstått avvik fra instruksjonen må anses som en reell mulighet. Videre må det også ansees som en reell mulighet at noen av prøvene ikke er representative for fyllmassen i grøftene, enten fordi uthenting ikke har skjedd i henhold til instruksjon eller at punktet for uthenting ikke er representativt for resten av området.

Prøvene har en relativt stor variasjon i volum slik at bare omtrent halvparten av prøvene bestod av det ønskede volumet på ca 3 liter. Det største utslaget av dette er at en mindre prøve gir lavere sikkerhet for at den andelen av prøven som igjen tørkes og siles er representativ for jordforholdene på prøvepunktet.

Det er for måling av vanninnhold i jordprøven nødvendig at lagring av prøvene har skjedd på riktig måte, hvor hovedfokuset er at alle prøvene faktisk er holdt tette fra uthenting til analyse.

I to tilfeller var ikke prøvene lagret med to poser, om dette har fått noen konsekvenser er vanskelig å si. Det var også tilfeller hvor den innerste posen var delvis revnet av skarpe steiner. Om posene ikke er holdt tette vil dette gi en tørking i mellomlagringen som i resultatene ikke er tatt hensyn til.

I enkelte av prøvene har det etter siling blitt funnet mindre biter av organisk materiale (hovedsakelig røtter og rester av trevirke), dette har for større biter blitt fjernet da de over tid vil råtne og danne organisk finkornet materiale. Mindre biter av organisk materiale har ikke blitt fjernet fra silene da dette ikke ble ansett som en signifikant andel. Det har også i noen prøver blitt funnet mindre biter av glass. De har i videre analyse blitt behandlet som å tilhøre den kornstørrelsen de ble silt ut som da de har vært få og ikke i nærheten av noen signifikant andel. Ett unntak til dette eksisterer i prøver fra Ivar Aasens vei 1 hvor en glassbit på 6,46 gram ble fanget opp av silen med en åpning på 4mm. Denne er fjernet fra den totale vekten til prøven (både før og etter tørking).

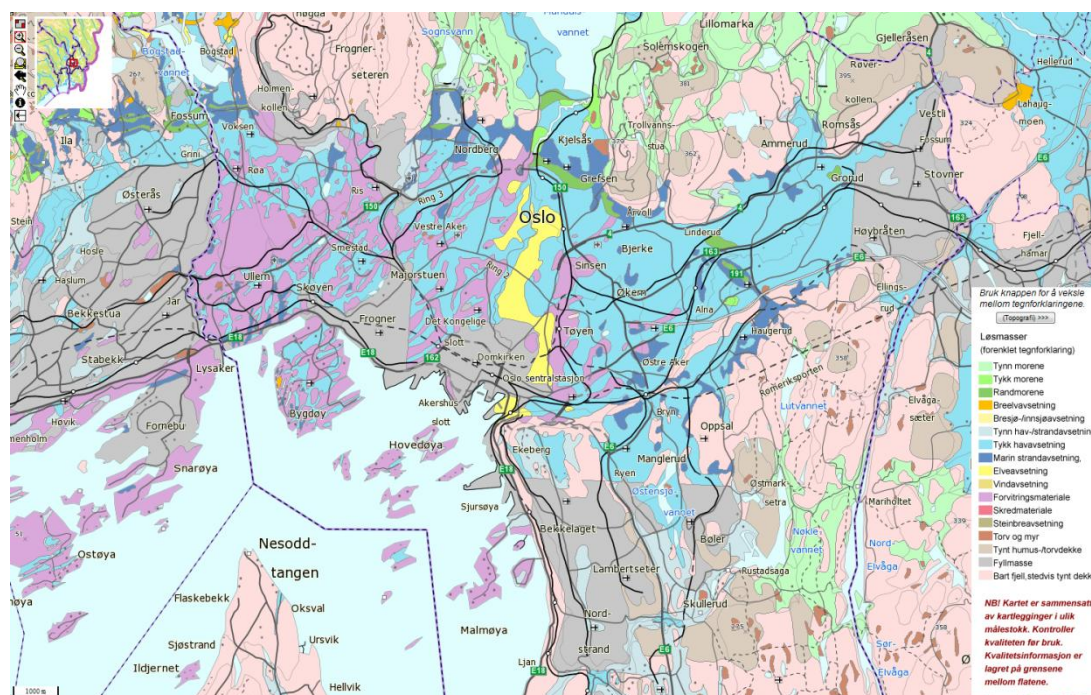
I en stor andel av prøvene har det blitt funnet en andel med bitumen i form av asfaltrester. Disse er ansett som en del av kornfordelingen og ikke videre separat analysert. I prøven fra Linjeveien 46 er det funnet to biter av jerntråder tvunnet sammen. Begge i silen med en åpning på 4mm. Dette er i likhet med den store glassbiten fjernet fra den totale vekten til prøven (både før og etter tørking).

En utfordring i gjennomføringen av jordprøvene har vært siling av prøver med høyt innhold av leire. Det vil i disse prøvene være leire/silt som er så hardpakket at de selv etter oppbløtning og siling framstår som korn. Det har vært en målsetning å oppløse disse, men det må likevel antas at noe av vekten til de større kornene i jordprøver med høyt innhold av leire/silt er leire/silt som ikke har latt seg oppløse.

For å sørge for at prøvene faktisk gjenspeiler jorden rundt rørledningen vil det til en eventuell senere analyse anbefales at det hentes ut to prøver fra samme fyllmasse og at hver av disse igjen analyseres som to prøver til tørking og siling. Dette vil for det første minske eventuelle sjanser for at prøvene ikke er representative og videre sørge for at en lokal variasjon ikke får samme utslag som den kan få med kun en prøve.

En deling av hver prøve i to lot seg i denne omgang ikke gjennomføre både grunnet manglende masse i en del av prøvene men også grunnet kapasitetsproblemer med tørkeovn og mange prøver med høyt innhold av leire som etter tørking ikke ville være mulig å tørresikte (noe som hadde økt effektiviteten betraktelig, selv om det hadde gitt noe mindre eksakte resultater).

En senere analyse burde også inneholde siling i flere kornstørrelser for å øke sikkerheten av kornstørrelsesanalysen og beregnede trendlinjer for fordelingen med tilhørende verdier for d10, d50 og d60. Fjerning av resterende organisk materiale kan gjøres med forbrenning, effekter av en eventuell forbrenning på jordprøven må da først undersøkes nøye. En større sammenligning av fyllmasse rundt rør og løsmassekartet til NGU er av stor interesse.



Lekkasjer i Oslo - et statistisk eksempel

Datagrunnlag

For å vise sammenhengen mellom kulde og lekkasjer er det hentet inn data fra VAV Oslo. Datamengden som har vært tilgjengelig har kommet som utskrift fra Gemini VA og inneholder lekkasjer fra 1975 til 2012. Som grunnlag for analysen er data fra vinteren 1996-1977 brukt som første år. Som nevnt i oppgaven er lekkasjeåret forskjøvet slik at det går fra 1. november til 30. oktober. Dette er gjort for å lage år som ser på frosts sesonger. Det siste året med fullstendig data er lekkasjeåret 2011 (som da går fra 1. november 2010 til 30. oktober 2011). Dette er valgt da 2012 ikke var komplett ved uthenting av data. Det har ikke vært funnet tilgjengelig data fra før 1975 og relevansen til et eventuelt enda større datasett er usikker.

I datasettet som opprinnelig inneholdt 7860 rader har det vært gjort en gjennomgang for å sikre at hver rad er en separat lekkasje. Dette har ført til at det opprinnelige datagrunnlaget har blitt 7292 lekkasjer hvor 62 lekkasjer tilhører det ufullstendige lekkasjeåret 1975 og 100 lekkasjer tilhører det ufullstendige lekkasjeåret 2012. 16 rader ble fjernet grunnet manglende informasjon om dato (dette gjelder lekkasjer med årstall 1939 og 2099) og er ikke en del av de 7292 lekkasjene.

Datasettet er ikke vedlagt oppgaven da størrelsen ikke ansees som håndterlig i en skriftlig oppgave. Datasettet består hentet ut fra Gemini AV 21 kolonner med informasjon. Det har i databehandlingen vært utvidet med 7 ekstra kolonner i hovedsettet og 3 kolonner i et modifisert datasett. Et eksempel på celledata finnes i [tabell 4](#) og [tabell 5](#). Datasettet vil kunne presenteres på oppfordring.

| FCODE | STATUS | LENGTH | DIM | SONE | FROMSID | TOSID |
|-------|--------|--------|-----|------|---------|--------|
| VL | X | 49.03 | 150 | 150 | 221290 | 221328 |

| OLDMATERIAL | OLDDIM | OLDYEAR | LSID | MATERIAL | YEAR | Dagbok_CC CODE |
|-------------|--------|---------|--------|----------|------|----------------|
| | | | 229601 | SJK | 1965 | DBR |

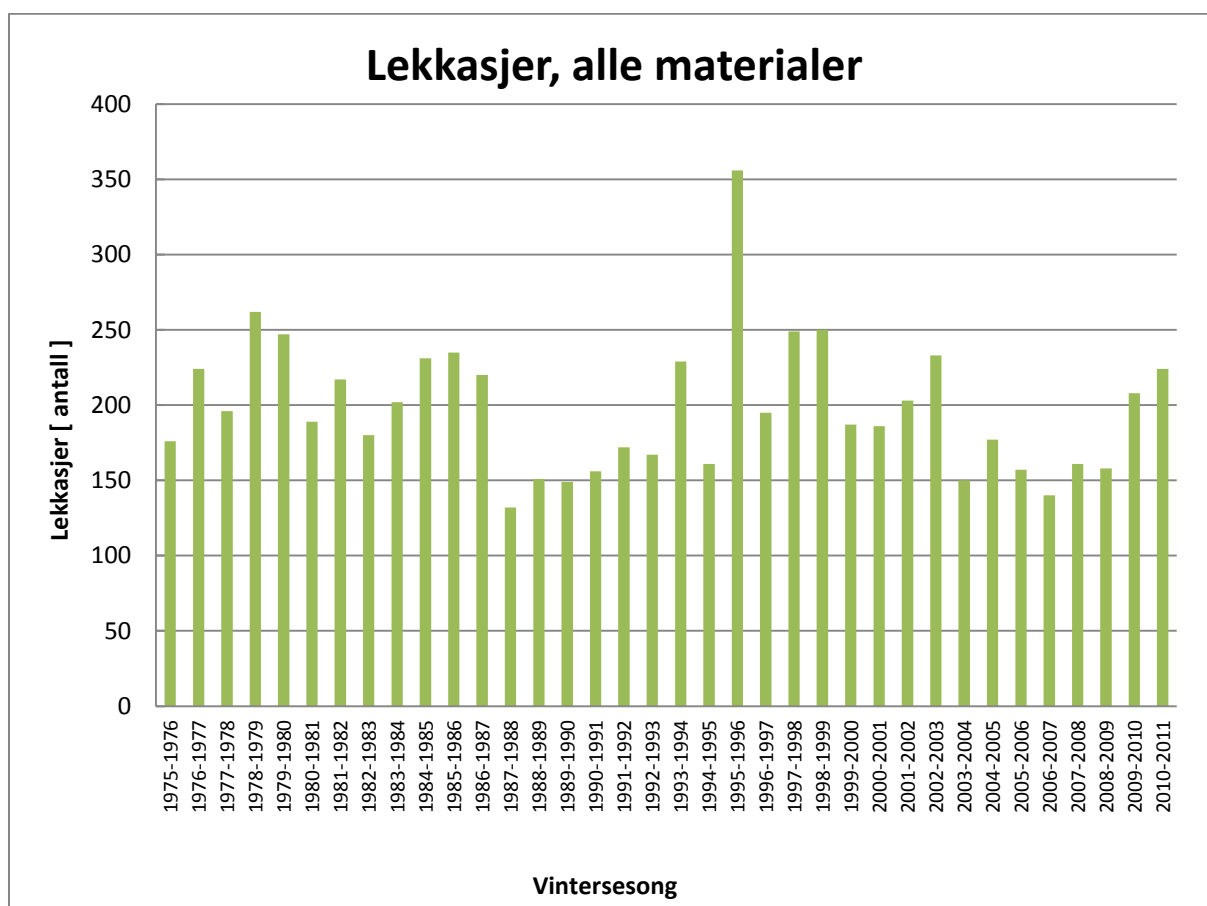
| Meldt dato | Utført dato | Distanse | Dagboksdetalj_CC CODE | Duplikat | Tekst |
|------------|-------------|----------|-----------------------|----------|------------------|
| 01.01.1975 | 01.01.1975 | 0 | B02 | 0 | DBR - 01.01.1975 |

Tabell 4; Eksempel på celledata, Hovedsett

| Materiale | Dimensjon | Leggear | Mod Dato | Bruddår | Årstid | Måned |
|-----------|-----------|---------|------------|---------|--------|-------|
| SJK | 150 | 1965 | 03.03.1975 | 1975 | Vinter | 1 |

| Lengdeklasse | Dimensjonsklasse | Rørklasse |
|--------------|------------------|-----------|
| L4 | D2 | R4 |

Tabell 5; Eksempel på celledata; Tilegg



Figur 11; Antall lekkasjer fordelt på lekkasjeåret (november-oktober)

Frostindeks

Frostindeks er kalkulert med data fra målestasjonen på Blindern, alle data er hentet fra Metrologisk Institutt. Kalkuleringen av indeksen er gjort på 2 måter.

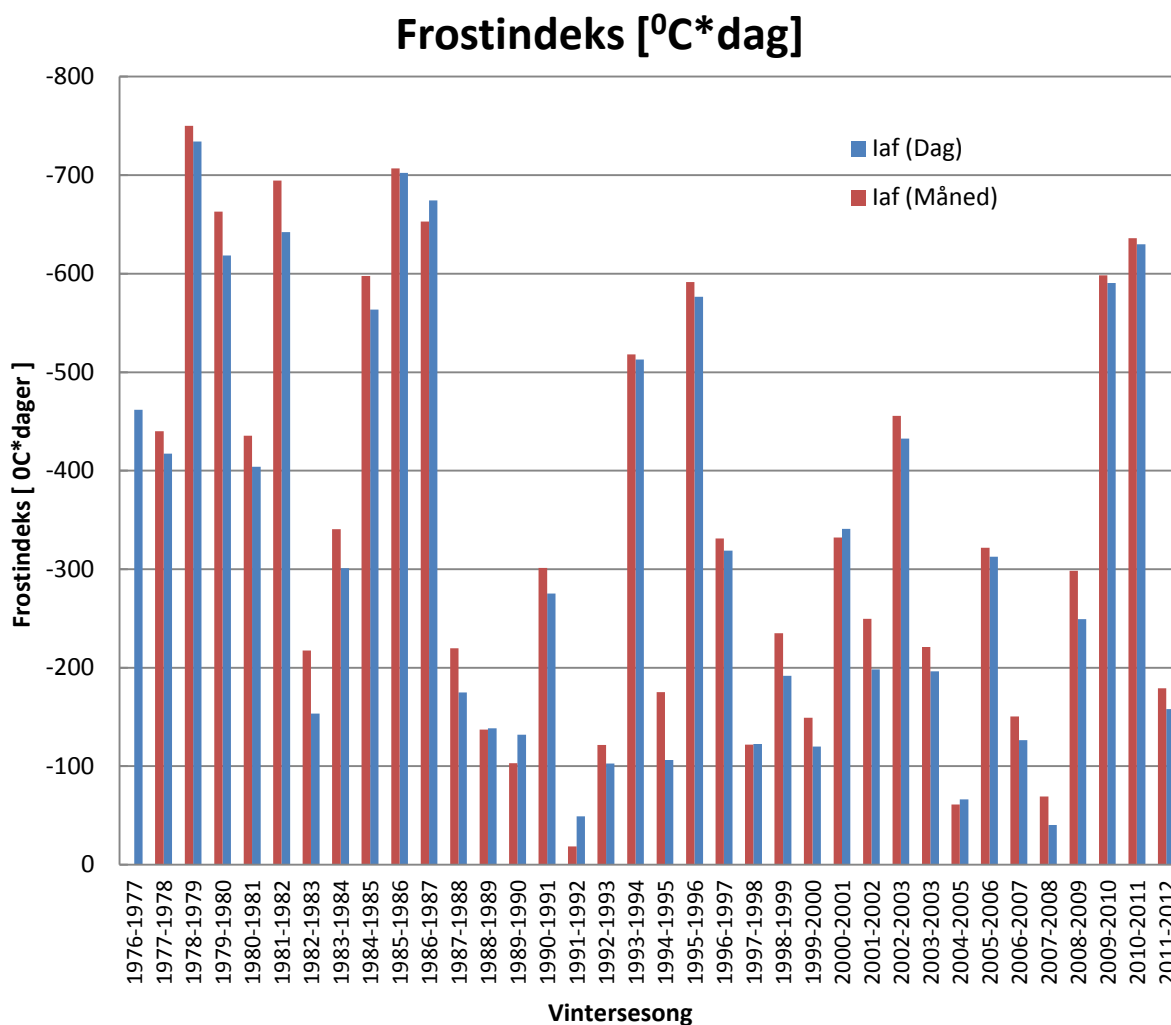
Den første ved å summere antall dager med negative temperaturer fra 1. november i år x til 31. mars i år $x+1$. Her er det gjort en tilnærming slik at første verdi som er valgt er den første negative temperaturen hvor summen av de neste fem verdiene er negativ. Dette er summert fram til og ikke med første positive temperatur hvor summen av de neste fem temperaturverdiene er positive og det er mindre enn ti dager med temperaturer under null grader i resten av den sesongen.

Denne tilnærmingen er gjort for å sikre et mest mulig reelt tall for frostindeks. Enkeltdager med temperaturer under null grader tidlig i sesongen vil ikke ha en påvirkning på total frostdybde. Underveis i kuldeperioden vil temperaturer over null grader dersom de varer noen få dager ha liten innvirkning på maksimal frostdybde, men de er tatt med i summen for å sikre mot overestimering. Slutt punktet for summeringen er valgt med de overskrevne kravene for å sikre at vintersesongen er over og at det ikke er en kort periode med temperaturer rett over null grader.

Et unntak fra denne metodikken er 2007-2008 hvor de siste dagene med temperaturer under null grader i mars har blitt utelatt fra summen grunnet en svært lang periode med positive temperaturer før dette.

Den andre analysen er gjort med summering av gjennomsnittlig månedstemperatur for måneder med temperaturer under null grader celsius multiplisert med antall dager i måneden. For måneden som kommer før og den som kommer etter kuldeperioden (før eller etter måneder med gjennomsnittstemperaturer under null grader, men som ikke har negative gjennomsnittsgader) er det anvendt Boyd's formel som beskrevet i teoridelen om frostindeks.

For videre analyse er frostindeks basert på døgndata valgt både som en sikkerhet mot overestimering av frostindeks, men også fordi det reflekterer den reelle kuldeperioden på en mer riktig måte. Begge datasett er vist i *figur 12*.



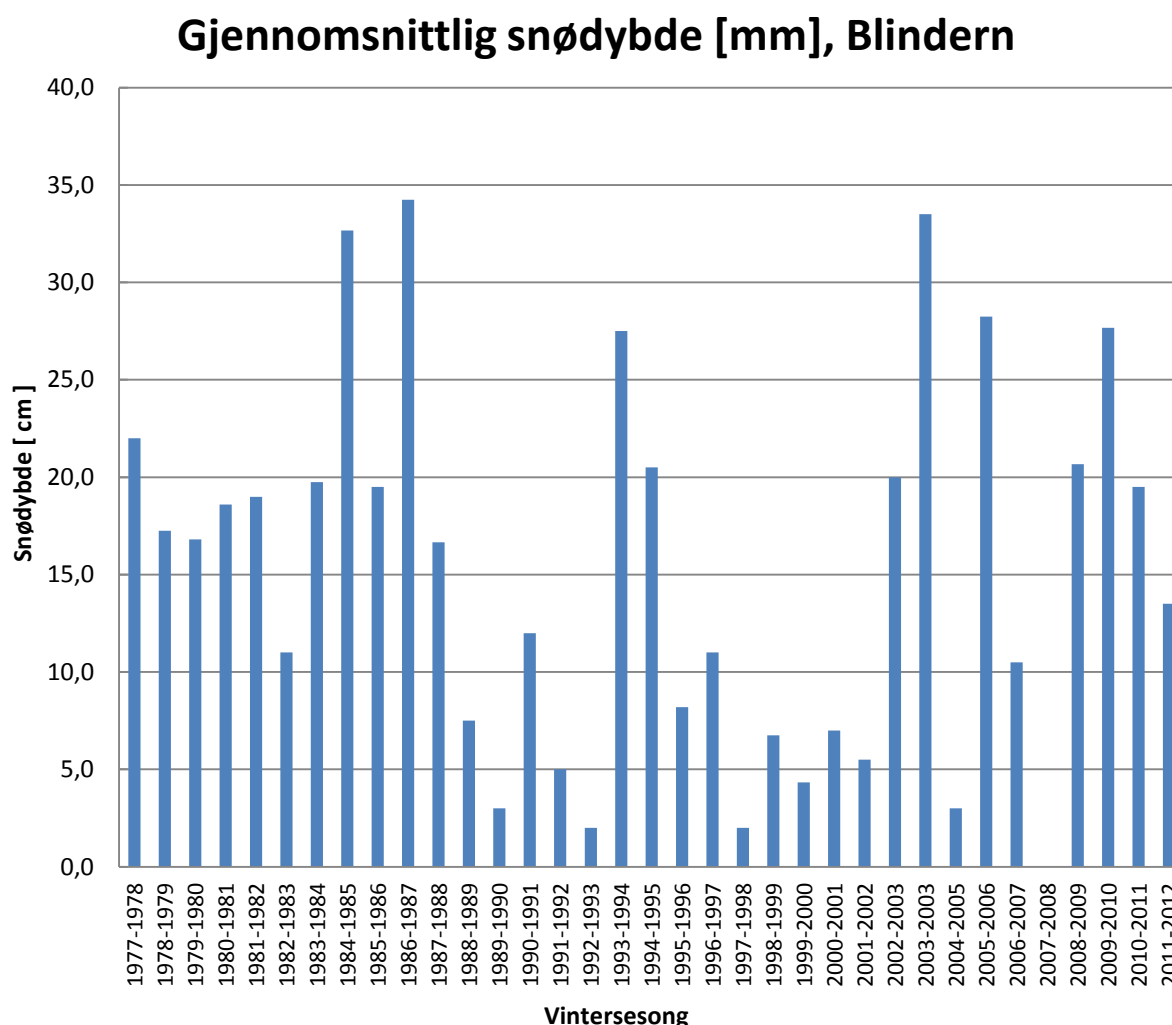
Figur 12; Frostindeks basert på døgndata og månedsdata for vintersesongen (november-april) i lekkesjårene (november-oktober)

Snødekke

Data om snødekke er hentet fra Norsk Metrologisk institutt. Verdiene som er brukt er gjennomsnittlige verdier for vintermånedene. Vintermånedene er satt som de samme månedene som var valgt i utregning av frostindeks. Gjennomsnittlig snødybde for en vintersesong er funnet som gjennomsnittlig snødybde for de månedene med negative temperaturer, se [figur 13](#).

Snødekke er valgt som faktor for å vurdere størrelsen på frostpenetreringen i områder der det ikke brøytes om vinteren. For rør lagt i Oslo vil dette i all hovedsak gjelde rør som ikke ligger

under vei. Snø vil fungere som et isolerende lag slik at et større snødekke vil føre til en lavere kuldepenetrering ned i jordlaget.



Figur 13; Gjennomsnittlig snødybde (gjennomsnittlig snødybde fordelt på måneder med negative gjennomsnittstemperaturer) for vintersesongen i lekkasjeårene

Lekkasjer fordelt på bruddtype

Det var i det opprinnelige datasettet mange punkter som hadde flere typer lekkasjer samtidig. Bruddkodene til VAV Oslo fordeler seg på følgende vis:

B01 = Sprukket rør på langs

B02 = Sprukket rør på tvers

B03 = Utsprunget flak

B04 = Hull pga tæring

B05 = Slitasje innvendig i rør
B06 = Tetning skadet
B07 = Utglidd rør
B08 = Utglidd bend
B09 = Anboringsarmatur skadet
B10 = Hydrant skadet
B11 = Stengeventil skadet
B12 = Annet
B13 = Tilstopping inne i ledning
B14 = Tilstopping i kum
B15 = Tilstopping i bekkeinntak m/rist
B16 = Tilstopping i bekkeinntak u/rist
B17 = Tilstopping i sluk
B18 = Tilstopping i sandfang
B19 = Muffe sprukket

B15, B16, B17 og B18 er koder som brukes i avløp og har derfor ingen oppføringer.

I de tilfellene hvor det for en lekkasje eksisterer flere bruddkoder har den mest alvorlige bruddkoden blitt valgt. Dette gjelder særlig ulike typer for korrosjon som har blitt satt inn samtidig, for eksempel både B03 (utsprunget flak) og B04 (Hull pga tæring). De laveste kodene har i tilfeller med flere bruddkoder blitt valgt, for eksempel slik at B03 er blitt stående når den har stått sammen med B04. Et unntak fra denne metoden er dersom B01 (langsgående brudd) og B02 (tverrbrudd) er samtidig. Her er tverrbruddet blitt stående da et langsgående brudd (grunnet manglende veggstyrke) kan oppstå etter et tverrbrudd (manglende ringstivhet) men ikke motsatt.

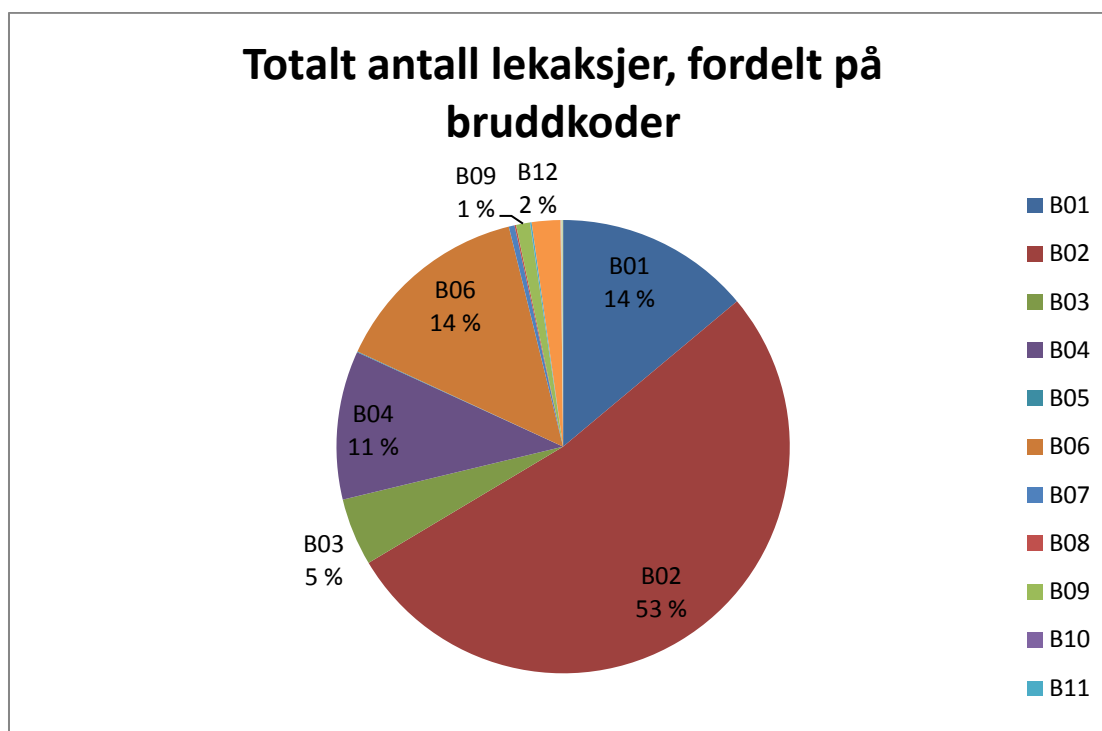
Korrosjon vil i mange tilfeller være en viktig grunn til at det oppstår et brudd. Røret vil være svekket av korrosjon over tid som har ført til lavere styrke. Problemet er at det i registreringsprosessen utøves en stor grad av skjønn. Noe korrosjon må regnes med i løpet av livstiden til jern, i andre tilfeller vil det kunne være en større korrosjon en forventet. Å måle mengden korrosjon i ulike jordtyper vil kunne bidra til å hindre dette, men dette er et svært sammensatt problem. En sammenheng mellom registrering av korrosjon og langsgående og tverrbrudd er av stor interesse, men datagrunnlaget for dette er for usikkert til at det kan trekkes noen konklusjoner.

Det totale datasettet har da følgende fordeling av lekkasjer:

| Bruddkode | Antall | % Totalt | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|-----------|--------|----------|--------|--------|----------|----------|
| B01 | 1015 | 13.92 % | 523 | 492 | 12.25 % | 16.29 % |
| B02 | 3829 | 52.51 % | 2592 | 1237 | 60.69 % | 40.95 % |
| B03 | 351 | 4.81 % | 193 | 158 | 4.52 % | 5.23 % |
| B04 | 773 | 10.60 % | 363 | 410 | 8.50 % | 13.57 % |
| B05 | 4 | 0.05 % | 1 | 3 | 0.02 % | 0.10 % |
| B06 | 1039 | 14.25 % | 467 | 572 | 10.93 % | 18.93 % |
| B07 | 30 | 0.41 % | 12 | 18 | 0.28 % | 0.60 % |
| B08 | 8 | 0.11 % | 4 | 4 | 0.09 % | 0.13 % |
| B09 | 72 | 0.99 % | 34 | 38 | 0.80 % | 1.26 % |
| B10 | 1 | 0.01 % | 0 | 1 | 0.00 % | 0.03 % |
| B11 | 8 | 0.11 % | 4 | 4 | 0.09 % | 0.13 % |
| B12 | 149 | 2.04 % | 70 | 79 | 1.64 % | 2.62 % |
| B13 | 1 | 0.01 % | 1 | 0 | 0.02 % | 0.00 % |
| B14 | 3 | 0.04 % | 3 | 0 | 0.07 % | 0.00 % |
| B19 | 9 | 0.12 % | 4 | 5 | 0.09 % | 0.17 % |
| Totalt | 7292 | | 4271 | 3021 | 58.57% | 41.43% |

Tabell 6; Totalt fordeling av lekkasjer på bruddkoder

Året er i dette tilfellet delt inn i sommer og vinter etter en tilsvarende modell som lekkasjeåret. Sommer er satt som mai til og med oktober, vinter er satt som november til og med april. Det som umiddelbart viser seg er hvordan denne delingen i for de aller fleste bruddkodene fører til et antall som tilsvarer omtrent halvparten av totalen. B04 (brudd pga tæring) og B06 (tetning skadet) har et noe høyere antall på sommeren, med en økning på henholdsvis 47 og 95 tilfeller. Den store forskjellen ligger i bruddklasse B02 (tverrbrudd) hvor det i vinterhalvåret er 1355 flere tverrbrudd enn på sommeren, dette betyr at antall tilfeller av B02 er over det dobbelte i vinterhalvåret sammenlignet med sommerhalvåret.



Figur 14; Fordeling av bruddkoder i datasettet (gitt som prosent av totalt antall lekkasjer)

I det totale datasettet er det da en del av bruddkodene som har en andel på under 0,5% og har derfor ikke fått egen tekst- og verdiforklaring. Den klart største andelen brudd er fra gruppen B02 (tverrbrudd) med 53 % av bruddene.

Lekkasjer og materiale

Fordelingen av rørmaterialer for det totale kommunale rørnettet (se side 31) er ikke representativ for Oslo, som har en liten andel av termoplaster og en stor andel av grått støpejern. Fordelingen for Oslo er hentet fra ”Rehabiliteringsplan vannledningsnettet 2010-2020 – Bruddprognose” og finnes i *tabell 7*.

| Rørtype | Lengde (m) | Prosentandel av totalnett |
|-------------------------|------------|---------------------------|
| Grått støpejern (SJG) | 915.200 | 59,2 % |
| Duktilt støpejern (SJK) | 532.300 | 34,4 % |
| Stålrør (MST) | 51.100 | 3,3 % |
| Plastrør | 47.700 | 3,1 % |
| Andre | 700 | - |
| Totalt | 1547 | 100 % |

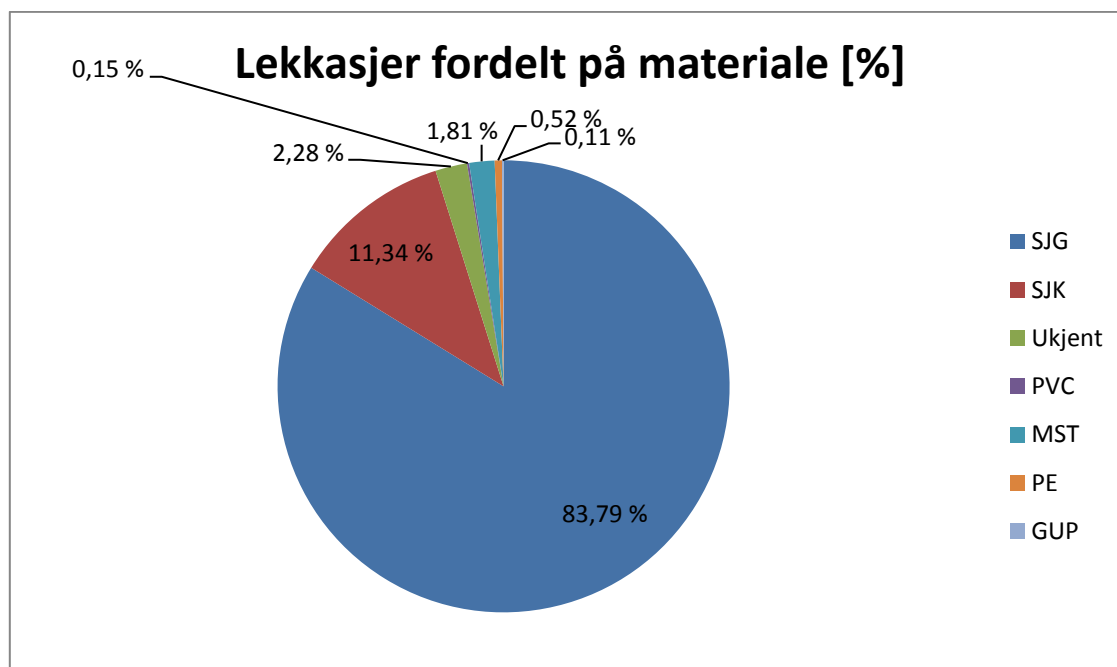
Tabell 7; Fordeling av rørmaterialer for ledningsnettet i Oslo

Fordelingen av brudd på materiale er gjort med den informasjonen som har vært tilgjengelig fra VAV Oslo og har fått noen flere klasser med rørmaterialer enn fordelingstabellen for hele nettet i Oslo.

| Materiale | Antall | % Totalt | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|-----------|--------|----------|--------|--------|----------|----------|
| SJG | 6110 | 83.79 % | 3659 | 2451 | 85.67 % | 81.13 % |
| SJK | 827 | 11.34 % | 433 | 394 | 10.14 % | 13.04 % |
| Ukjent | 166 | 2.28 % | 92 | 74 | 2.15 % | 2.45 % |
| PVC | 11 | 0.15 % | 5 | 6 | 0.12 % | 0.20 % |
| MST | 132 | 1.81 % | 63 | 69 | 1.48 % | 2.28 % |
| PE | 38 | 0.52 % | 18 | 20 | 0.42 % | 0.66 % |
| GUP | 8 | 0.11 % | 1 | 7 | 0.02 % | 0.23 % |
| Totalt | 7292 | | 4271 | 3021 | 58.57% | 41.34% |

Tabell 8; Totalt antall lekkasjer fordelt på materiale og sesong

Som vi ser av *tabell 8* er det klart flest lekkasjer på de grå støpejernsrørene, som har 83,79 % av lekkasjer siden 1975. Tabellen viser også liten forskjell i fordelingen mellom materialer for sesongene vinter og sommer (som tidligere er delingen gjort med vinter fra november til og med april og sommer som mai til og med oktober). En grafisk fremstilling er vist i *figur 15*.



Figur 15; Totalt antall lekkasjer fordelt på materiale (som prosent av totalt antall lekkasjer)

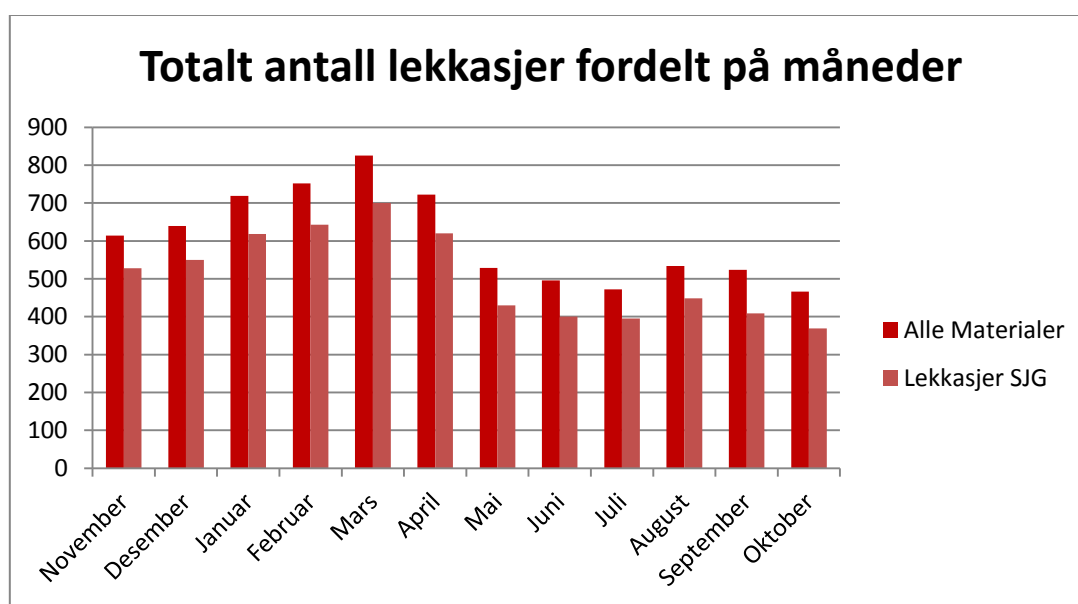
Lekkasjer fordelt på månedene

Som en kontroll er antall lekkasjer også fordelt på månedene, dette for å undersøke om det eventuelt kan være andre sesongvariasjoner som har gått tapt i inndelingen av året i sommer og vinter. Tabellen under viser denne fordelingen for alle materialer og for grått støpejern for å vurdere om det eventuelt kan være større variasjoner i brudd pr materiale fordelt over året.

| Måned | Alle materialer | % av Totalt | Lekkasjer SJG | % SJG pr måned |
|-----------|-----------------|-------------|---------------|----------------|
| November | 614 | 8.42 % | 528 | 85.99 % |
| Desember | 639 | 8.76 % | 550 | 86.07 % |
| Januar | 719 | 9.86 % | 618 | 85.95 % |
| Februar | 752 | 10.31 % | 643 | 85.51 % |
| Mars | 825 | 11.31 % | 700 | 84.85 % |
| April | 722 | 9.90 % | 620 | 85.87 % |
| Mai | 529 | 7.25 % | 430 | 81.29 % |
| Juni | 496 | 6.80 % | 400 | 80.65 % |
| Juli | 472 | 6.47 % | 395 | 83.69 % |
| August | 534 | 7.32 % | 448 | 83.90 % |
| September | 524 | 7.19 % | 409 | 78.05 % |
| Oktober | 466 | 6.39 % | 369 | 79.18 % |

Tabell 9; Totalt antall lekkasjer fordelt på månedene og antall lekkasjer for grått støpejern fordelt på månedene

Tabell 9 viser at det har vært flest lekkasjer i mars med 825 og færrest lekkasjer i juli med 472. Fordelingen er også slik at det tydelig er flere lekkasjer i januar, februar og april med verdier på over 700. De seks månedene som har blitt til sommerhalvåret (mai til oktober) har alle sammen månedlige verdier rett over og under 500 lekkasjer.



Figur 16; Totalt antall lekkasjer fordelt på månedene og antall lekkasjer for grått støpejern fordelt på månedene

Det er ut i fra *tabell 9* og *figur 16* ingen sammenheng som tyder på at brudd fordelt på materialer har ulik fordeling i løpet av året. Mindre variasjoner kan forekomme, men da grått støpejern viser liten variasjon og den utgjør en såpass stor andel av totalen vil de resterende variasjonene ikke har nok betydning til at de kan anses som signifikante. I den videre analysen er det derfor kun sett på forskjeller mellom sommer og vinter.

Lekkasjer fordelt på rørlengde

Det totale rørnett vil i alle områder bestå av flere lenger, om lengden i seg selv har noen innvirkning på antall lekkasjer kan i utgangspunktet ikke virke som noen klar sammenheng. En rørlengde er i ledningsnett definert som avstanden mellom to kummer. Gjengitt i *tabell 10* er lekkasjer fordelt på rørlengde, gruppert på tilsvarende måte som i RV 2010-2020.

| Lengdeklasse | Lekkasjer | % | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|--------------|-----------|---------|--------|--------|----------|----------|
| 0-15 | 486 | 6.66 % | 268 | 218 | 6.27 % | 7.22 % |
| 15-30 | 1022 | 14.02 % | 608 | 414 | 14.24 % | 13.70 % |
| 30-45 | 1560 | 21.39 % | 939 | 621 | 21.99 % | 20.56 % |
| 45-60 | 1740 | 23.86 % | 1054 | 686 | 24.68 % | 22.71 % |
| 60-100 | 2062 | 28.28 % | 1187 | 875 | 27.79 % | 28.96 % |
| >100 | 422 | 5.79 % | 215 | 207 | 5.03 % | 6.85 % |
| Totalt | 7292 | | 4271 | 3021 | | |

Tabell 10; Totalt antall lekkasjer fordelt på lengdeklasser og sesong

| Lengdeklasse | Total rørlengde (km) | Bruddrate (antall/km) | Bruddfrekvens (antall/km/år) |
|--------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|
| 0-15 | 52.9 | 9.19 | 0.25 |
| 15-30 | 174.5 | 5.86 | 0.16 |
| 30-45 | 300.4 | 5.19 | 0.14 |
| 45-60 | 366.7 | 4.75 | 0.13 |
| 60-100 | 494.7 | 4.17 | 0.11 |
| >100 | 158.1 | 2.67 | 0.07 |
| Totalt | 1547 | 4.71 | 0.13 |

Tabell 11; Totalt rørlengde for drikkevannsnettet i Oslo fordelt på lengdeklasser med bruddrate og bruddfrekvens

Det vi ser av *tabell 11* er en klar sammenheng mellom bruddfrekvens og de korte rørlengdene. Hvor den korteste rørklassen på under 15m har en bruddfrekvens som er 0,25 lekkasjer/km/år sammenliknet med den lengste rørklassen på over 100m som har en bruddfrekvens på 0,07 lekkasjer/km/år. Mellom klassene ser vi en synkende trend for bruddfrekvensen med økende lengde. En forklaring på dette er sammenhengen mellom høyere diametre og lengre rør slik at de kortere rørene har mindre veggykkelse og styrke. Det er ut i fra datasettet svært liten

forskjell på fordelingen av antall lekkasjer på de ulike lengdeklassene mellom sommer- og vinterhalvåret.

Lekkasjer fordelt på rørdiameter:

Det vil ut i fra forkunnskap være sannsynlig å anta en sammenheng mellom rørdiameter og bruddfrekvens hvor rør med lavere diameter har høyere bruddfrekvens da det er en sammenheng mellom veggtykkelsen og rørdiameter. Økende diameter fører også til økende veggtykkelse som igjen gir en høyere styrke. I *tabell 12* er totale lekkasjer fordelt på 4 rørklasser, men inndeling gjort på samme måte som i RV 2010-2020.

| Rørdiameter | Lekkasjer | % | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|-------------|-----------|---------|--------|--------|----------|----------|
| 25-125 | 1534 | 21.04 % | 857 | 677 | 20.07 % | 22.41 % |
| 140-180 | 3435 | 47.11 % | 2123 | 1312 | 49.71 % | 43.43 % |
| 200-255 | 1345 | 18.44 % | 809 | 536 | 18.94 % | 17.74 % |
| 280-2000 | 978 | 13.41 % | 482 | 496 | 11.29 % | 16.42 % |
| Totalt | 7292 | | 4271 | 3021 | | |

Tabell 12; Totalt antall lekkasjer fordelt på rørdiameter og sesong

| Rørdiameter | Total rørlengde | Bruddrate (antall/km) | Bruddfrekvens (antall/km/år) |
|-------------|-----------------|-----------------------|------------------------------|
| 25-125 | 234.2 | 6.55 | 0.18 |
| 140-180 | 581.1 | 5.91 | 0.16 |
| 200-255 | 338.6 | 3.97 | 0.11 |
| 280-2000 | 393.3 | 2.49 | 0.07 |
| Totalt | 1547 | 4.71 | 0.13 |

Tabell 13; Total rørlengde for drikkevannsnettet i Oslo fordelt på rørdiameter med bruddrate og bruddfrekvens

Av *tabell 13* vises en sammenheng mellom rørdiameter og bruddfrekvens hvor økende rørdiameter fører til synkende bruddfrekvens. Rør med diameter 125mm og mindre har en bruddfrekvens på 0,18 lekkasjer/km/år sammenliknet med rør med en diameter over 280mm som har en bruddfrekvens på 0,07 lekkasjer/km/år.

Lekkasjer fordelt på leggear

En inndeling av lekkasjer basert på leggear for ledningen kan være en noe kunstig inndeling med tanke på at det blir en sammenlikning som ikke vurderer alderen til røret på lekkasjetidspunktet, men kun når røret faktisk er lagt. Denne inndelingen har vært gjort i

tidligere rapporter fra VAV Oslo da det er funnet en sterk sammenheng mellom kvaliteten på arbeidet som er utført, kvaliteten på røret og når det er produsert. Over tid har det i Oslo blitt en stadig høyere gjennomsnittlig alder på ledningsnettet. I 1964 hadde ledningsnettet en gjennomsnittsalder på 28 år, i 1995 en gjennomsnittsalder på 45 år og i 2005 en gjennomsnittsalder på 53 år. Samtidig har antall ledninger som har reparasjoner gått opp fra 5,3 % av ledningene i 1985 til 10,5 % av ledningene i 2003.

I den opprinnelige saneringsrapporten fra 1996 er det gjort en inndeling i årstall basert på rørklasser. Denne inndelingen er gjort ut ifra forventet degradering for de ulike typer rør som var lagt i perioder. Enkelte rørtypen vil ha en jevnt svak degradering, mens andre vil holde seg svært intakte en lang periode før de får en stor degradering over et kort tidsrom.

Den viktigste faktoren for dette valget er i rapporten fra 1996 forventet tykkelse på røret avhengig av når det var lagt. Inndelingen fra 1996 baserer seg *tabell 14*.

| Dimensjon (mm) | 1858-1889 Klasse B +20% | 1890-1929 Klasse B +15% | 1930-1959 Grått støpejern Klasse B | 1960-1964 LA S70 (klasse B også benyttet) | Klasse LA |
|----------------|----------------------------|----------------------------|--|--|-----------|
| 100 | | 11,7 | 10,2 | 6 | 7,5 |
| 125 | 13,2 | 12,7 | 11 | | |
| 150 | 14,2 | 13,6 | 11,8 | 6 | 8,3 |
| 200 | 16 | 15,4 | 13,4 | 6,5 | 9,2 |
| 225 | | 16,3 | 14,2 | | |
| 250 | | 17,3 | 15 | 7 | 10 |
| 275 | | | 15,8 | | |
| 300 | 19,9 | | 16,6 | 7,6 | 10,8 |
| 375 | 21,8 | | 18,2 | | |
| 400 | | | 19,8 | 8,8 | 12,5 |

Tabell 14; Sammenhengen mellom godstykkelse og dimensjon for ulike rørklasser

Et klart skille er det fra og med 1965 med legging av duktile støpejernsrør framfor de grå støpejernsrørene som var lagt til og med 1964. Andre inndelinger skyldes endringer i hvordan de grå støpejernsrørene ble produsert. Fra vertikal støpning i sand til horisontal støpning i sand til spinnstøpning.

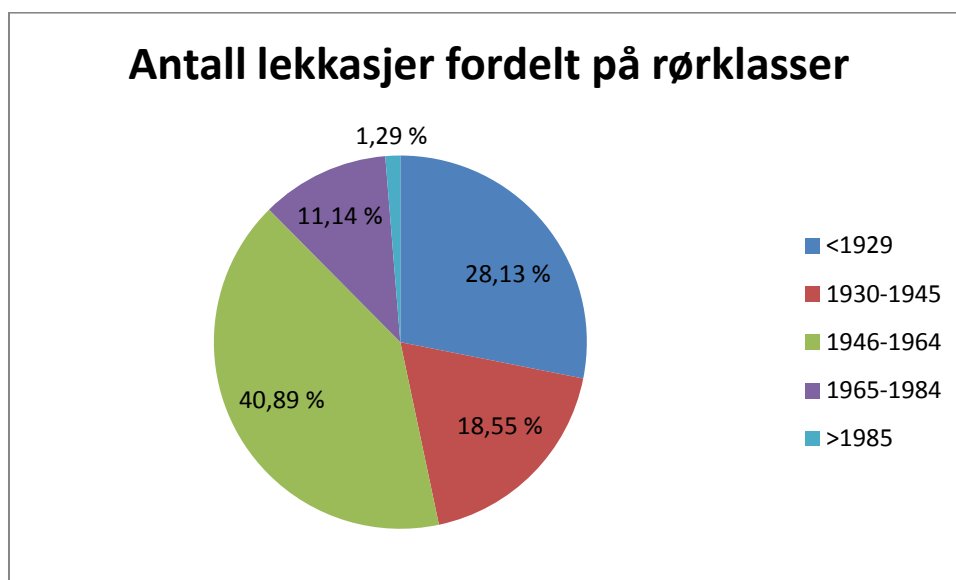
Rørklassene valgt i rapporten fra 2008 baserer seg på en noe annen inndeling. Her er rør lagt fram til 1929 valgt som en rørklasse grunnet at det var støpejern støpt i sandformer. Klassen fra 1930-1945 har spinnstøpte støpejernsrør. Det samme har klassen fra 1946-1964, men her har man sett en drastisk forverring av kvalitet i forhold til den første gruppen med spinnstøpte støpejernsrør. Like viktig for denne oppdelingen er grunnarbeidene og tanken som rådet i

etterkrigstiden om at man skulle bygge mye raskt og billig. Fra 1965 er det de duktile støpejernsrørene som har totalt dominert i forhold til type rør som er lagt. I rapporten fra 2008 er det inndelt i to grupper etter innvendig etterbehandling. Den første gruppen fra 1965 til 1984 er valgt da denne grupperingen hadde først ingen innvendig etterbehandling og så innvendig sementering med Portlandsement. Denne sementeringen har vist seg å holde dårlig mot drikkevannet som helt fram til åpningen av nye Oset hadde en litt sur pH. I mange tilfeller er dette belegget blitt helt borte og rørene oppfører seg stort sett som de ubehandlede. Fra 1985 ble aluminal sement brukt som innvendig belegg, etterfulgt av den enda mer hardføre flyveaskesementen.

Fordelingen av rørklasser på lekkasjedatene fordeler seg som vist i [tabell 15](#).

| Rørklasse | Lekkasjer | % | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|-----------|-----------|---------|--------|--------|----------|----------|
| <1929 | 2051 | 28.13 % | 1096 | 955 | 25.66 % | 31.61 % |
| 1930-1945 | 1353 | 18.55 % | 746 | 607 | 17.47 % | 20.09 % |
| 1946-1964 | 2982 | 40.89 % | 1952 | 1030 | 45.70 % | 34.09 % |
| 1965-1984 | 812 | 11.14 % | 421 | 391 | 9.86 % | 12.94 % |
| >1985 | 94 | 1.29 % | 56 | 38 | 1.31 % | 1.26 % |
| Totalt | 7292 | | 4271 | 3021 | | |

Tabell 15; Totalt antall lekkasjer fordelt på rørklasser og sesong



Figur 17; Totalt antall lekkasjer fordelt på rørklasser

| Rørklasse | Total rørlengde | Bruddrate (antall/km) | Bruddfrekvens (antall/km/år) |
|-----------|-----------------|-----------------------|------------------------------|
| <1929 | 309.3 | 6.63 | 0.18 |
| 1930-1945 | 279.1 | 4.85 | 0.13 |
| 1946-1964 | 364.9 | 8.17 | 0.22 |
| 1965-1984 | 375.8 | 2.16 | 0.06 |
| >1985 | 218.1 | 0.43 | 0.01 |
| Totalt | 1547 | 4.71 | 0.13 |

Tabell 16; Total rørlengde for drikkevannsnettet i Oslo fordelt på rørklasser med bruddrate og bruddfrekvens

Som vi ser av *tabell 15* og *figur 17* er det et klart størst antall lekkasjer på rørnettet lagt i perioden 1946 til 1964. Dette er i all hovedsak grått støpejern med relativt dårlig kvalitet som er lagt i hurtig tempo etter krigen i sammenheng med den store utbyggingen som skjedde i samme periode. Det er kun sett på fordelingen basert på dagens rørnett, dette betyr at det vil være noe avvik fra den reelle bruddraten da det over tid har skjedd en større utbytting av denne kategorien slik at en prosentvis bruddfordeling på rørklasse vil gi for lave tall for de eldre rørklassene. Et eksempel er hentet fra VAV rehabiliteringsplan vannledningsnettet 2010-2020 som sier at rørklassen 1946-1964 var 346,9 (23,6 %) av det totale nettet i antall kilometer (1547km brukt som totallengde).

Videre ser vi også av *tabell 15* at det er en relativt stor andel av bruddene i klassen 1946-1965 som skjer i vinterhalvåret, men henholdsvis 1952 lekkasjer på vinter og 1030 på sommeren. Ellers i datasettet er det utover dette ingen av de andre rørklassene som skiller seg særlig ut i fordelingen av brudd på sommer og vinter.

Sammenheng mellom kulde og lekkasjer

I den første statistiske analysen er det valgt en enkel linjær modell for lekkasjer som et resultat av frostindeks basert på døgndata, som kommentert i avsnittet om frostindeks. Et utsnitt fra regresjonsanalysen er vist under, med fullstendig data tilgjengelig i [appendiks B.1](#).

Regression Analysis: Lekkasjer versus If(dag)

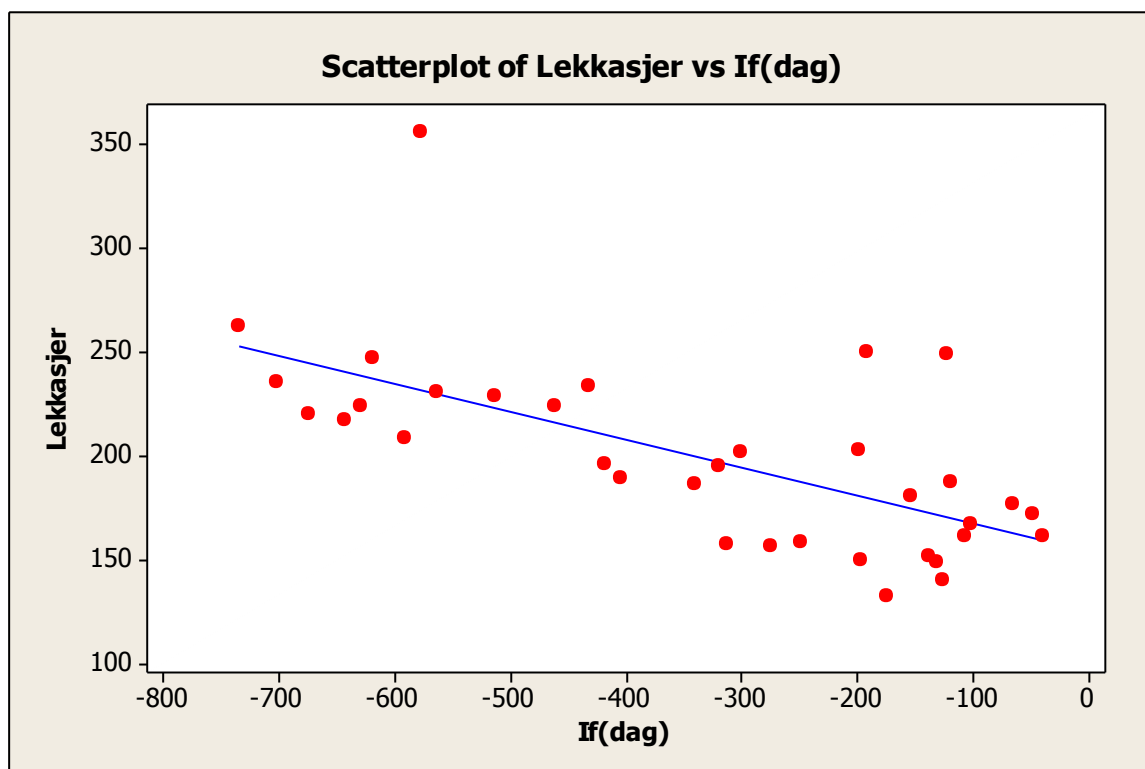
The regression equation is
 $\text{Lekkasjer} = 154 - 0.134 \text{ If(dag)}$

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|-------|-------|
| Constant | 154.01 | 10.90 | 14.13 | 0.000 |
| If(dag) | -0.13391 | 0.02749 | -4.87 | 0.000 |

S = 34.8522 R-Sq = 41.8% R-Sq(adj) = 40.1%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|
| Regression | 1 | 28825 | 28825 | 23.73 | 0.000 |
| Residual Error | 33 | 40084 | 1215 | | |
| Total | 34 | 68910 | | | |



Figur 18; Punktdiagram for sammenhengen mellom antall lekkasjer og frostindeks fra døgndata

Regresjonsanalysen viser en sammenheng mellom antall lekkasjer og frostindeks med en p-verdi på 0,000. Dette viser at sjansen for at et tilsvarende resultat skal oppstå uten at det er sammenheng mellom antall lekkasjer og frostindeks er mindre enn 0,1 %. For at denne sammenhengen skal være gyldig kreves det at residualene er normalfordelte.

Det er i regresjonsanalysen et usikkerhetsmoment som dreier seg om den lave R^2 -verdien, som viser hvor god den linjære modellen er. I denne analysen er det kun ca 40 % av variasjonen i antall lekkasjer som er forklart direkte med frostindeks. Vi ser derfor at det er et forklaringsproblem med en del av variasjonen til antall lekkasjer som ikke er forklart fra frostindeks. I punktdiagrammet ovenfor (*figur 18*) og den fullstendige regresjonsanalysen funnet i *appendiks B.1* ser vi at det er ett punkt som har en særlig stor differanse til det resterende datasettet.

Dette punktet er bruddåret 1996 (vinteren 1995-1996) med et antall lekkasjer på 356 og en frostindeks basert på døgndata på -576,6. I regresjonsanalysen har dette punktet et residual på 124,78 en verdi som er 3,7 ganger så stor som standardresidualet (som er standardavviket til residualene). Det har i samtaler med VAV Oslo både i avdelingen for vanntransport og på driftsstasjonen på Helsfyr med lekkasjesøkerne ikke kommet fram noen forklaringer til hvorfor dette året har hatt så enormt mange brudd i forhold til de andre. Det har vært gjennomført en del gravearbeider i vei, men ikke på langt nær mange nok til å forklare det store antallet lekkasjer.

To andre bruddår som også har store standardresidualer er 1998 og 1999 med henholdsvis 249 og 250 lekkasjer. Antallet lekkasjer i seg selv er ikke enormt i datasettet, men begge var relativt varme vintre med frostindeks på henholdsvis -122,5 og -191,8. Det er heller ikke her kommet fram noen økt aktivitet hos VAV Oslo som kan forklare dette.

Vi kan ut i fra denne analysen ikke gjøre en endelig konklusjon på sammenhengen mellom frostindeks og antall lekkasjer. Vi ser en klar trend mellom sammenhengen, men kan grunnet outliers (punkter med svært store residualer) og derfor en manglende normalfordeling av residualene ikke på grunnlag av datasettet alene konkludere at sammenhengen er signifikant.

Regresjonsanalyser gjort med frostindeks basert på månedsdata gir tilsvarende resultater, se [appendiks B.2](#). En interessant observasjon med tanke på at frostindeks basert på månedsdata vil kunne være lagt letter å konstruere enn frostindeks basert på døgndata.

Effekten av snødybde

Det er uten tvil en sammenheng mellom snødybde og teledybde, hvor en mye snø er med på å isolere bakken slik at de kaldeste temperaturene får en mindre relevans for maksimal teledybde. Effekten av denne snøisoleringen på drikkevannsnettet i Oslo er usikker, rett og slett fordi de fleste rørene ligger under vei som blir brøytet. Det er like vel gjort en analyse hvor effekten av snødybde er undersøkt.

Regression Analysis: Lekkasjer versus If(dag); Snødybde

The regression equation is
 Lekkasjer = 168 - 0.193 If(dag) - 2.22 Snødybde

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|-------|-------|
| Constant | 167.59 | 10.38 | 16.14 | 0.000 |
| If(dag) | -0.19278 | 0.02988 | -6.45 | 0.000 |
| Snødybde | -2.2187 | 0.6675 | -3.32 | 0.002 |

S = 30.5147 R-Sq = 56.8% R-Sq(adj) = 54.1%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|
| Regression | 2 | 39113 | 19556 | 21.00 | 0.000 |
| Residual Error | 32 | 29797 | 931 | | |
| Total | 34 | 68910 | | | |

Regresjonsanalysen viser at det er en sammenheng mellom forklaringsvariablene og antall lekkasjer med en p-verdi på 0,000. Som enkeltfaktor ser vi at snødybde har en p-verdi på 0,002 noe som tilsvarer en sikkerhet for at den har signifikans i modellen på 0,2%.

Tilsvarende som i den første modellen er det slik at en p-verdi på 0,000 viser signifikant sammenheng dersom residualene er normalfordelte.

Med introduksjonen av snødybde ser vi at R^2 -verdien stiger i forhold til den første analysen. Det er nå over 50% av den indre variasjonen i datasettet som forklares direkte ut i fra

regresjonslikningen. Som i den første analysen er det spesielt bruddåret 1996 som er det punktet som skiller seg spesielt ut og lager en manglende normalfordeling av residualene.

Det er også i denne regresjonsanalysen blitt konstruert et punkt der snødybden har fått stor innvirkning på residualet. Dette gjelder vinteren 2004 som med en frostindeks på 196,2 ikke var spesielt kald, men med en gjennomsnittlig snødybde i vintermånedene på 33,5mm har fått en stor innvirkning av snødybde.

Modellen som inkluderer snødybde gir ut i fra den statistiske analysen mer signifikante data enn modellen uten, men den reelle effekten av snødybde er for usikker til at det kan trekkes en konklusjon hvor snødybde er en direkte faktor. En videre undersøkelse av antall brudd som skjer under vei differensiert fra antall brudd som skjer under snødekke burde gjøres for å trekke noen videre konklusjon. Data om dette er delvis tilgjengelig i Gemini VA, men ikke som annet enn kart.

Modifisering av datasettet

Grunnet vinteren 1996 og det svært store residualet det har er det gjort en analyse som ser bort i fra dette punktet. En hver modifisering av datasettet kan skape et uriktig bilde av virkeligheten og residualet til vinteren 1996 kan godt ha en forklarende faktor som ikke kommer frem i denne analysen. Da det i den teoretiske delen av oppgaven er funnet signifikant sammenheng mellom kulde og antall lekkasjer er dette punktet i denne analysen ansett som en outlier uten relevans i datasettet. Bruddårene 1998 og 1999 er også fjernet med den samme begrunnelsen slik at regresjonen nå kun ser på den delen av datasettet som i den første regresjonen hadde en linjær sammenheng.

Regression Analysis: Lekkasjer (modifisert) versus If(dag)

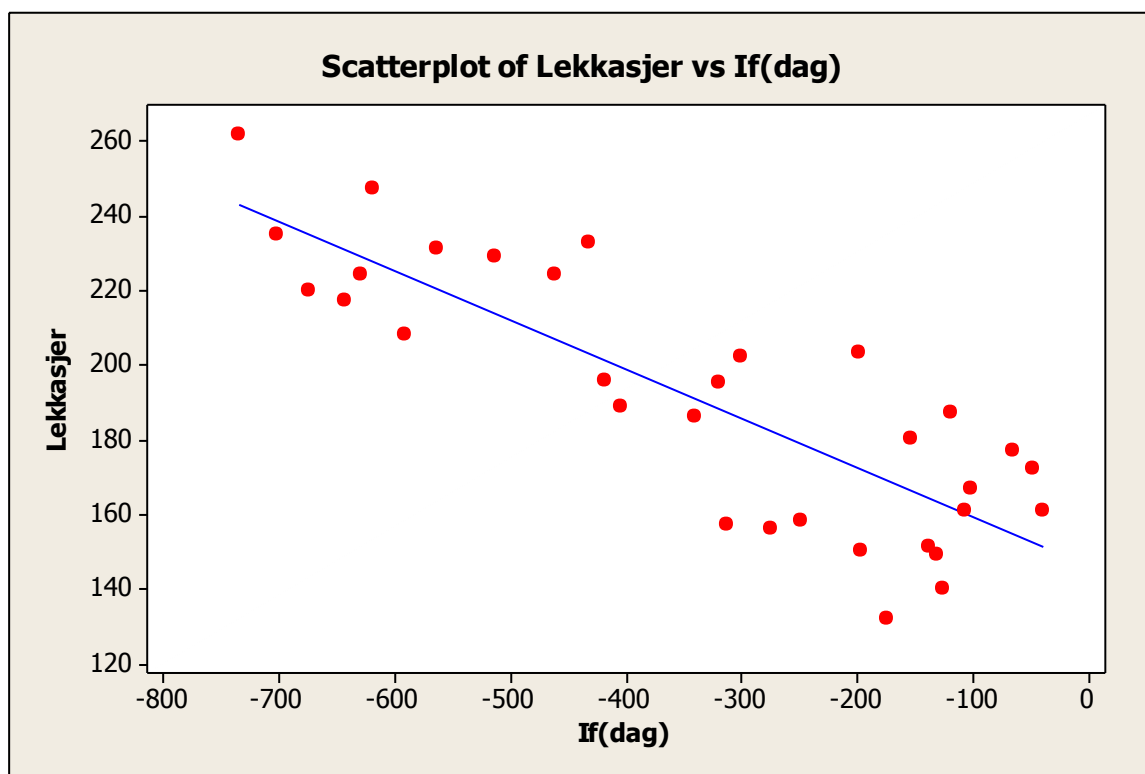
The regression equation is
 Lekkasjer = 146 - 0.132 If(dag)

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|-------|-------|
| Constant | 146.093 | 6.303 | 23.18 | 0.000 |
| If(dag) | -0.13202 | 0.01576 | -8.38 | 0.000 |

S = 19.1915 R-Sq = 70.1% R-Sq(adj) = 69.1%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|
| Regression | 1 | 25852 | 25852 | 70.19 | 0.000 |
| Residual Error | 30 | 11049 | 368 | | |
| Total | 31 | 36902 | | | |



Figur 19; Punktdiagram for sammenhengen mellom antall lekkasjer og frostindeks basert på døgndata, basert på det modifiserte datasettet

I regresjonen av det modifiserte datasettet får vi fremdeles en P-verdi på 0,000. Den store forskjellen er her at vi får en R² verdi på nesten 70 %, en klar økning i hvor mye av responsvariablene som forklares av forklaringsvariablene frostindeks. Det som er enda viktigere er at vi ut i fra residualplottene gitt i [appendiks B.4](#) ser en tilnærmet normalfordeling av residualene og en residualspreddning hvor det er tilnærmet like mange negative og positive verdier. Vi kan derfor i det modifiserte datasettet fastslå at det på et 1%-nivå er signifikant sammenheng mellom frostindeks og antall lekkasjer.

Det modifiserte datasettet er også brukt i en regresjonsanalyse hvor snødybde er tatt med som forklaringsvariabel. Denne regresjonsanalysen er gjengitt i [appendiks B.5](#) Introduksjonen av

snødybde øker forklaringssevenen til modellen med en R²-verdi på 73,6 %. Snødybde er en signifikant forklaringsvariabel på et 2%-nivå med en p-verdi på 0,019.

Alternative responsvariable

Det er også gjennomført statistisk analyse av lekkasjer hvor antall lekkasjer pr år er byttet ut med antall lekkasjer pr rørlengde og antall lekkasjer pr produksjonsvolum. Total lengde på ledningsnett pr år er hentet ut fra VAV Oslo sine årsrapporter. Det er ikke funnet årsrapporter fra før 1981, noe som gir et lavere antall år å teste på. For årene 2002 og 2003 er det brukt feil total lengde i rapportene, noe som er kommentert i senere rapporter. Det er manglende informasjon om den totale rørlengden mellom 2006 og 2010 og data for denne perioden er konstruert som en jevn vekst mellom 2005 og 2011 som har tallfestet den totale lengden. Årene 2002 og 2003 har også fått konstruert verdier for total rørlengde ut i fra de kjente verdiene for 2001 og 2004. Den totale rørlengden har derfor relativt mange usikkerhetsmomenter.

Statistisk analyse er gjengitt i [appendiks B.6](#). Resultatet er mindre signifikant enn modellen med antall lekkasjer som responsvariabel. En forklaring til dette er at det i VAV Oslo har blitt gjort en større innsats for å bytte ut eldre rør slik at nettets gjennomsnittlige alder og kvalitet over tid har blitt høyere, samtidig som ledningsnett har blitt lengre.

En analyse med antall lekkasjer pr produserte vannmengde er også gjort. Denne er gjengitt i [appendiks B.7](#) og er ikke signifikant. Det er en klar nedgang i produsert vannmengde over tid grunnet en nedgang i antall lekkasjer på ledningsnett.

En undersøkelse av outliers-ene

Bruddårene 1996, 1998 og 1999 er som tidligere vist blitt kategoriserte som outliers, en del av datasettet hvor residualene er så store at de påvirker resultatet uten at de er representative for resten av datasettet. Da vi et utvalg på 34 år har 3 outliers vil dette være en signifikant del av datasettet. Fra Engstrand og Olsson (2003) er det foreslått at det i et forsøk med 100 datapunkter kan forventes at det ikke er mer enn 5 stykker som er utenfor ± 2 standardresidualer og at det er usannsynlig med verdier utenfor ± 3 . I datasettet som er brukt

her vil det bety at bruddåret 1998 og 1999 (med residualverdier på 2,06 og 2,32 standardresidualer) kan falle innenfor forventet avvik, men at 1996 (med en residualverdi på 3,7 standardresidualer) er en klar outlier.

For å bedre forstå hvorfor disse årene er outliers er det videre gjort en separat analyse hvor sammensetningen av brudd er sett opp mot gjennomsnittet.

Lekkasjeåret 1996

Lekkasjeåret 1996 er det største avviket til modellene som er anvendt og dermed det mest interessante tilfellet å undersøke nærmere. Gitt i *tabell 17* er sammensetningen av lekkasjer fordelt på bruddkoder.

| Bruddkode | Antall | % Totalt | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|-----------|--------|----------|--------|--------|----------|----------|
| B01 | 39 | 10.96 % | 18 | 21 | 8.45 % | 14.69 % |
| B02 | 203 | 57.02 % | 148 | 55 | 69.48 % | 38.46 % |
| B03 | 18 | 5.06 % | 6 | 12 | 2.82 % | 8.39 % |
| B04 | 31 | 8.71 % | 16 | 15 | 7.51 % | 10.49 % |
| B05 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B06 | 53 | 14.89 % | 20 | 33 | 9.39 % | 23.08 % |
| B07 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B08 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B09 | 10 | 2.81 % | 4 | 6 | 1.88 % | 4.20 % |
| B10 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B11 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B12 | 2 | 0.56 % | 1 | 1 | 0.47 % | 0.70 % |
| B13 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B14 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B19 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| Totalt | 356 | | 213 | 143 | 59.83 % | 40.17 % |

Tabell 17; Antall lekkasjer for lekkasjeåret 1996 fordelt på bruddklasser og sesong

Av tabellen kan vi se at sammensetningen av brudd vinteren 1996 ser svært lik ut som den totale sammensetningen av brudd for alle årene. Som eksempel er 57,02 % av bruddene i 1996 B02 (Tverrbrudd), i det totale datasettet er 52,51 % av bruddene av samme bruddkode - en økning, men ikke så mye at det kan ansees som en signifikant forklaring. Som i det totale datasettet er det også her lite forskjell i antall brudd mellom sommer og vinter i alle bruddklasser utenom B02. Noen forklaring om at det ekstreme antallet lekkasjer skyldes en eller flere typer brudd alene kan derfor ikke trekkes.

I fordelingen av lekkasjer på de ulike materialene er for lekkasjeåret 1996 en stor andel grått støpejern. Andelen lekkasjer på støpejern utgjør 88,76 % mot gjennomsnittet for alle årene på 83,79 %, altså en økning som sett i sammenhengen med økningen i antall tverrbrudd ikke er overraskende. Igjen er denne økningen ikke stor nok til at det kan trekkes noen konklusjon om at det er en type materiale som er forklaringen på det store antallet brudd.

| Materiale | Antall | % Totalt | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|-----------|--------|----------|--------|--------|----------|----------|
| SJG | 316 | 88.76 % | 198 | 118 | 92.96 % | 82.52 % |
| SJK | 31 | 8.71 % | 10 | 21 | 4.69 % | 14.69 % |
| Ukjent | 1 | 0.28 % | 0 | 1 | 0.00 % | 0.70 % |
| PVC | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| MST | 5 | 1.40 % | 3 | 2 | 1.41 % | 1.40 % |
| PE | 3 | 0.84 % | 2 | 1 | 0.94 % | 0.70 % |
| GUP | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| Totalt | 356 | | 213 | 143 | 59.83 % | 40.17 % |

Tabell 18; Antall lekkasjer for lekkasjeåret 1996 fordelt på materialer og sesong

I en analyse av det samme datasettet for lekkasjeåret 1996 er det også gjort en fordeling på månedene. Denne fordelingen viser den første klare indikasjonen på en eventuell forklaring. Det er denne vinteren en opphopning av antall brudd i januar, februar, mars, april og mai. For november og desember (1995) er det registrert en prosentvis mye lavere andel brudd og tilsvarende på slutten av lekkasjeåret i september og oktober (1996).

| Måned | Antall | % |
|-----------|--------|---------|
| November | 18 | 5.06 % |
| Desember | 17 | 4.78 % |
| Januar | 42 | 11.80 % |
| Februar | 49 | 13.76 % |
| Mars | 49 | 13.76 % |
| April | 38 | 10.67 % |
| Mai | 39 | 10.96 % |
| Juni | 29 | 8.15 % |
| Juli | 27 | 7.58 % |
| August | 21 | 5.90 % |
| September | 15 | 4.21 % |
| Oktober | 12 | 3.37 % |

Tabell 19; Antall lekkasjer for lekkasjeåret 1996 fordelt på månedene

I temperaturdata for den samme perioden er det registrert kalde temperaturer i november og desember med et par minusgrader. Det er deretter en periode fra 22.12.1995 til 06.01.1996 en ekstremt kald periode med temperaturer fra -10 til -15 grader. Kuldeperioden er etterfulgt av en varm periode i januar på litt over en uke før en ny kuldeperiode som varer til 25.02.1996, denne gangen med temperaturer rundt -10 grader. Ut mars er der det temperaturer rundt null

med et gjennomsnitt på -0,6 grader celsius. Det er for lekkasjeåret 1996 registrert svært lav nedbørsmengde i forhold til normalen. November og desember hadde nedbørsmengde på henholdsvis 28,4 % og 17,1 % av de respektive normalene. Gjennomsnittlig nedbør for vinteren (november-april) lå på 45,92 % av normalen.

Det har etter samtaler med Kjartan Reksten ved VAV Oslo kommet fram informasjon om en stor økning i arbeidsinnsats denne perioden grunnet tørke og lav vann i Maridalsvannet. Det ble innleid to firmaer for å bidra med lekkasjesøking som arbeidet fra januar til juni/juli. Det ble også gjort ekstra innsats i vinterhalvåret med fremgraving av kummer for å gjøre lytting der man mistenkte lekkasjer, en praksis som ikke var vanlig verken før eller siden.

Lekkasjeåret 1998

Lekkasjeåret 1998 har ikke et antall lekkasjer som i seg selv gjør året til et avvik, men det har et høyt antall lekkasjer i forhold til frostindeksen og får derfor et stort residual. I *tabell 20* er sammensetningen av lekkasjene fordelt på bruddkoder.

| Bruddkode | Antall | % Totalt | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|-----------|--------|----------|--------|--------|----------|----------|
| B01 | 31 | 12.45 % | 17 | 14 | 11.18 % | 14.43 % |
| B02 | 113 | 45.38 % | 79 | 34 | 51.97 % | 35.05 % |
| B03 | 7 | 2.81 % | 5 | 2 | 3.29 % | 2.06 % |
| B04 | 50 | 20.08 % | 23 | 27 | 15.13 % | 27.84 % |
| B05 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B06 | 40 | 16.06 % | 24 | 16 | 15.79 % | 16.49 % |
| B07 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B08 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B09 | 7 | 2.81 % | 4 | 3 | 2.63 % | 3.09 % |
| B10 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B11 | 1 | 0.40 % | 0 | 1 | 0.00 % | 1.03 % |
| B12 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B13 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B14 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B19 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| Totalt | 249 | | 152 | 97 | 61.04 % | 38.96 % |

Tabell 20; Antall lekkasjer for lekkasjeåret 1998 fordelt på bruddkode og sesong

Av tabellen er det en bruddkode som særlig skiller seg ut fra gjennomsnittsåret. B04 (korrosjonshull) har en gjennomsnittlig lekkasjeandel på 10,6 % av alle lekkasjer, i lekkasjeåret 1998 står denne bruddkoden for 20,08 % lekkasjene. En økning i korrosjonsbrudd kan forklare avviket til dette året.

| Materiale | Antall | % Totalt | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|-----------|--------|----------|--------|--------|----------|----------|
| SJG | 206 | 82.73 % | 131 | 75 | 85.62 % | 78.13 % |
| SJK | 34 | 13.65 % | 16 | 18 | 10.46 % | 18.75 % |
| Ukjent | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| PVC | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| MST | 9 | 3.61 % | 5 | 4 | 3.27 % | 4.17 % |
| PE | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| GUP | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| Totalt | 249 | | 153 | 96 | 61.45 % | 38.55 % |

Tabell 21; Antall lekkasjer for lekkasjeåret 1998 fordelt på materialer og sesong

Det er for året 1998 ingen signifikante avvik av lekkasjer fordelt på materiale.

| Måned | Antall | % |
|-----------|--------|---------|
| November | 17 | 6.83 % |
| Desember | 24 | 9.64 % |
| Januar | 26 | 10.44 % |
| Februar | 28 | 11.24 % |
| Mars | 34 | 13.65 % |
| April | 23 | 9.24 % |
| Mai | 17 | 6.83 % |
| Juni | 8 | 3.21 % |
| Juli | 18 | 7.23 % |
| August | 19 | 7.63 % |
| September | 23 | 9.24 % |
| Oktober | 12 | 4.82 % |

Tabell 22; Antall lekkasjer for lekkasjeåret 1998 fordelt på månedene

Det er for året 1998 registrert et unormalt lavt antall lekkasjer for juni (3,21 %) i forhold til gjennomsnittsåret (6,47 %). Det er en noe høyere lekkasjefordeling på januar, februar og mars, men den er ikke stor nok til å anses som signifikant. Det er ikke registrert store avvik fra normalen for nedbørsmengder i lekkasjeåret 1998.

Etter samtaler med Kjartan Reksten (VAV Oslo) har det kommet fram en økt aktivitet etter saneringsplan vann fra 1996 som ikke kom ordentlig i gang med arbeidene før i 1998 og 1999.

Lekkasjeåret 1999

Lekkasjeåret 1999 har som lekkasjeåret 1998 heller ikke et antall lekkasjer som i seg gjør året til et avvik, men det har fremdeles et høyt antall lekkasjer i forhold til frostindeksen og får derfor et stor residual. I *tabell 23* er sammensetningen av lekkasjene fordelt på bruddkoder.

| Bruddkode | Antall | % Totalt | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|-----------|--------|----------|--------|--------|----------|----------|
| B01 | 45 | 18.00 % | 27 | 18 | 16.98 % | 19.78 % |
| B02 | 126 | 50.40 % | 93 | 33 | 58.49 % | 36.26 % |
| B03 | 5 | 2.00 % | 4 | 1 | 2.52 % | 1.10 % |
| B04 | 19 | 7.60 % | 10 | 9 | 6.29 % | 9.89 % |
| B05 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B06 | 50 | 20.00 % | 22 | 28 | 13.84 % | 30.77 % |
| B07 | 2 | 0.80 % | 1 | 1 | 0.63 % | 1.10 % |
| B08 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B09 | 1 | 0.40 % | 0 | 1 | 0.00 % | 1.10 % |
| B10 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B11 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B12 | 1 | 0.40 % | 1 | 0 | 0.63 % | 0.00 % |
| B13 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| B14 | 1 | 0.40 % | 1 | 0 | 0.63 % | 0.00 % |
| B19 | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| Totalt | 250 | | 159 | 91 | 63.60 % | 36.40 % |

Tabell 23; Antall lekkasjer for lekkasjeåret 1999 fordelt på bruddkoder og sesong

Det er for lekkasjeåret 1999 en noe større andel av bruddkoden B01 (langsgående brudd), en noe større andel av bruddkoden B06 (tetning skadet) og en noe mindre andel av bruddkoden B04 (korrosjonshull) enn gjennomsnittet for hele datasettet. Det kan ut i fra bruddkode ikke trekkes noen konklusjon på det økte antallet lekkasjer i forhold til frostindeksen sammenlignet med andre år.

| Materiale | Antall | % Totalt | Vinter | Sommer | % Vinter | % Sommer |
|-----------|--------|----------|--------|--------|----------|----------|
| SJG | 220 | 88.00 % | 144 | 76 | 91.14 % | 82.61 % |
| SJK | 22 | 8.80 % | 12 | 10 | 7.59 % | 10.87 % |
| Ukjent | 1 | 0.40 % | 0 | 1 | 0.00 % | 1.09 % |
| PVC | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| MST | 2 | 0.80 % | 1 | 1 | 0.63 % | 1.09 % |
| PE | 5 | 2.00 % | 1 | 4 | 0.63 % | 4.35 % |
| GUP | 0 | 0.00 % | 0 | 0 | 0.00 % | 0.00 % |
| Totalt | 250 | | 158 | 92 | 63.20 % | 36.80 % |

Tabell 24; Antall lekkasjer for lekkasjeåret 1999 fordelt på materialer og sesong

Fordelingen av lekkasjer på materialer følger relativt nærme opp mot gjennomsnittet, men har en økning i antall lekkasjer på grått støpejern (SJG) og en mindre andel duktilt støpejern (SJK) enn gjennomsnittet for datasettet. Endringen er ikke stor nok alene til å kunne trekke noen konklusjon.

| Måned | Antall | % |
|-----------|--------|---------|
| November | 32 | 12.80 % |
| Desember | 28 | 11.20 % |
| Januar | 21 | 8.40 % |
| Februar | 22 | 8.80 % |
| Mars | 30 | 12.00 % |
| April | 26 | 10.40 % |
| Mai | 11 | 4.40 % |
| Juni | 19 | 7.60 % |
| Juli | 16 | 6.40 % |
| August | 16 | 6.40 % |
| September | 13 | 5.20 % |
| Oktober | 16 | 6.40 % |

Tabell 25; Antall lekkasjer for lekkasjeåret 1999 fordelt på månedene

Lekkasjer fordelt på måneder har noe endring fra gjennomsnittet, men ingen store nok endringer til at det kan gis noen vektlegging alene. Det er verd å merke seg økningen i antall lekkasjer i november og desember i forhold til gjennomsnittet samt en generelt lavere lekkasje prosent på sommeren (mai-oktober) i forhold til vinteren (november-april). Det er i data fra metrologisk institutt registrert nedbør over normalen, spesielt i månedene januar-april med en gjennomsnittlig nedbør på 171 % i forhold til normalen. Den totale nedbøren for lekkasjeåret 1999 ligger på 126,7 % av normalen.

Etter samtaler med Kjartan Reksten (VAV Oslo) har det kommet fram en økt aktivitet etter saneringsplan vann fra 1996 som ikke kom ordentlig i gang med arbeidene før i 1998 og 1999.

Konklusjon

Det har i denne oppgaven blitt vist det teoretiske grunnlaget for beregning av teledybde, en teoretisk sammenheng mellom antall lekkasjer og kulde, samt materialdata for ulike rørtyper.

Undersøkelser av jordprøver er gjort med 34 prøver hentet ut av gravelaget ved VAV Oslo sin driftsavdeling med base på Helsfyr. Av prøvene er noen hentet ut fra samme område. I det totale prøvesettet er det funnet 16 prøver som er klassifisert som svært frosthevningsfarlige med en jordtype som silt/leire. 10 prøver er klassifisert som sand, som kan være frosthevningsfarlig og 7 prøver er klassifisert som grus og er ikke frosthevningsfarlige. 1 av prøvene har ikke blitt klassifisert. Vanninnholdet i prøvene ligger i all hovedsak mellom 5 % og 15 % som tilsvarer et relativt lavt vanninnhold, prøve nummer 21 hentet fra Myrerskogveien 47 har grunnet målefeil fått et negativt vanninnhold som da ikke er riktig.

Den statistiske analysen forteller at over halvparten av antall brudd er tverrbrudd med bruddkode B02 (52,51 %), ellers er de fordelt i all hovedsak på langsgående brudd (B01 – 13,92 %), flakbrudd (B03 – 4,81 %), korrosjonshull (B04 10,6) og tetning skadet (B06 – 14,25 %).

Fordelingen av lekkasjer på månedene forteller at det er langt flere lekkasjer totalt i vintermånedene (november – april) enn i sommermånedene (mai – oktober). Den måneden med flest brudd er mars med totalt 825 lekkasjer som tilsvarer 11,31 % av totalt antall lekkasjer. Til sammenligning er den måneden med færrest lekkasjer oktober, med 466 (6,39 %). Da det totalt fordelt på vinter og sommer er funnet 4271 lekkasjer på vinteren og 3021 lekkasjer på sommeren, ansees dette som en signifikant trend mellom sesongene.

Det er i analysen funnet en sammenheng som viser at lavere dimensjoner av rør har en høyere bruddrate enn større dimensjoner (0,18 pr km pr år for diametre under 125mm med en synkende rate til 0,07 for rør med diametre over 280mm) samt en sammenheng som viser at lavere rørlengder har en høyere bruddrate enn lengre rørlengder (0,25 pr km pr år for lengder under 15 meter med en synkende rate til 0,07 pr km pr år for lengder over 100 meter).

Fordelingen av lekkasjer i rørklasser ut i fra leggear er det funnet at 40,81 % av alle lekkasjene skjer på rør som er lagt mellom 1946 og 1964.

I den statistiske modelleringen er det i oppgaven funnet en sammenheng mellom antall skader med frostindeks som forklaringsvariabel. Året 1996 har spesielt mange lekkasjer med sine 356 og avviker relativt mye fra modellen. Forklaringen på det store antallet lekkasjer er at det dette året var svært lite vann i Maridalsvannet og at det ble innleid to eksterne firmaer for å drive lekkasjesøking.

Den beste modellen ble oppnådd med introduksjon av snødybde som forklaringsvariabel i tillegg til frostindeks samtidig som årene 1996, 1998 og 1999 ble fjernet fra modellen (de to siste kvalifiserer også som outliers da det marker starten på arbeidet med rehabiliteringsplan vann introdusert i 1996). Modellen ansees som signifikant på et 2 % -nivå med en forklaringskoeffisient (R^2 adj -verdi) på 73,6 %.

Et sammensatt problem

Som vi har sett i oppgaven er det funnet en sammenheng mellom temperatur i vintermånedene og antall brudd. Videre er det også ut i fra de forutsetningene som ligger til grunn for datasettet funnet en sammenheng mellom tverrbruddsraten og vintersesong. Som det har blitt forklart i avsnittet om datagrunnlaget i oppgavens andre del er det vært 568 lekkasjer der det har vært brukt flere bruddkoder sammen. Dette vil for en stor andel av lekkasjene gjelde bruk av koden B04 (korrosjonshull) sammen med bruddkodene B01 (langsgående brudd), B02 (tverrbrudd) og B03 (utsprunget flak). Sammenhengen mellom brudd og korrosjon for støpejernsledninger er en velkjent sammenheng, blant annet vist av Sægrov, Fiksdal og Lange i "Modell for tid til brudd og gjennomtæring ledninger av støpejern" fra 2000. Problemet er at korrosjonshastigheter varierer med svært mange faktorer slik at det er vanskelig å finne en modell som kan anvendes som helhet. Derfor vil det selv om korrosjon er den virkelige forklaringen på mange lekkasjer, fra forfatterens perspektiv være viktig å minimere den ekstra belastningen kulda bringer med seg.

I valget av beskyttelse mot frost er det umiddelbart et par motstridende målsetninger som dukker opp. Grøftematerialer som brukes i dag er gjennomgående ikke utsatt for frosthevning grunnet god vannledningsevne og lav porøsitet. Dessverre er også denne typen materialer som består av lite organisk materiale og lavt vanninnhold en høyere varmeledningsevne i

kombinasjon med lav varmekapasitet. Dette gir en langt dypere frostpenetrering enn i originalmassene. Konsekvensen av en dypere frostpenetrering kan være blokkering av røret, som vist tideligere i oppgaven. For rør med høy vannføring og dimensjon er dette problemet neglisjerbart. Et svært viktig aspekt med bruk av denne typen masser er at det gjøres beviste valg på hvor de benyttes, at de beskyttes med en skilleteppe og at de komprimeres godt. Masser som ikke er utsatt for frostheving men er lagt i områder hvor de omliggende materialene er frosthevningsutsatte vil oppleve langt høyere krefter som virker fra sidene av grøftene når kuldeperioden begynner. Dette vil kunne føre til økt belastning på røret. Viktigheten av skilleteppe for massene må ikke undervurderes, masser har en tendens til å flytte seg på samme måter som en kjemisk konsentrasjon vil gå fra et område med høy konsentrasjon til et område med lavere konsentrasjon. Over tid vil masser som opprinnelig ikke er utsatt for frostheving på denne måten kunne bli utsatt.

Valg av rørmateriale er også viktig. I Oslo legges det i dag i all hovedsak duktile støpejernsrør med korrosjonsbeskyttelse. Dette er valgt da man ser at termoplastene i større grad har fått skader ved legging og fordi det over en lang periode har blitt stor kunnskap duktile støpejernsrør, blant annet at det finnes gode anslag for hvor for raskt korrosjonsbeskyttelsen brytes ned. Rehabilitering av korrosjonsbeskyttelsen er også mulig. En større studie av effekten til materialvalg i forhold til det totale skadeomfanget i Norske forhold er av interesse.

Forslag til senere forsøksarbeid med gjennomføring

Undersøkelse av varmeledningsevne.

Forsøket har som hensikt å vurdere varmeledningsevnen i jordprøver. Dette gjøres ved å kjøle ned jordprøver til temperaturen i bunnen av jordprøven holder -1°C . I realiteten vil vannet begynne å fryse allerede ved 0 grader celsius, men som foreslått av Adamson, Claesson og Efring (1973) vil et valg av temperatur på -1°C gi en liten sikkerhetsmargin på at man er i den frosne sonen og ikke i kanten av frostgrensen. En annen måte å se problemet på er at man kan velge 0°C som nedre temperatur for å ha en sikkerhetsfaktor med tanke på at det ikke er frossent, som er et fornuftig valg ved bygging. Valget av -1°C er gjort med bakgrunn i et

ønske om å regne på reelle frostdybder og ikke frostdybder ut i fra et byggeperspektiv med sikkerhetsfaktor.

En boks konstrueres med isolasjonsplater med svært lav ledningsevne og varmekapasitet. Dette kan for eksempel være Glava EPS S 80 F som har en varmeledningsevne på 0,038 W/mK og en tykkelse på 50 mm. Den er lukket på 5 sider og inneholder et termometer i bunnen av boksen. Jordprøvene legges i boksen i en tynn plastpose (varmekapasiteten og varmeledningsevnen i plasten er sett bort i fra). Dette for å slippe å rense boksene mellom hvert forsøk og for lettere å kunne ta ut prøvene. Utgangstemperaturen til jorden er satt til romtemperaturen og det er da viktig å sørge for en uniform temperatur i prøven før forsøket starter. Prøven står så i en fryseboks med temperatur på en kjent negativ temperatur fram til termometeret i bunnen av prøven viser -1 grad celsius.

Alle jordprøver registreres med hvor de kommer fra, hvilken type jord det er og med den termiske ledningsevnen hentet ut i fra Stefans likning med frostdybde lik den totale dybden i boksen.

Betydningen av temperatur på elektrokjemisk korrosjon

For å undersøke betydningen av temperatur på elektrokjemisk korrosjon av jern og stål er det et forslag å bruke en strømkilde for å påføre røret en elektrisk strøm for å øke korrosjonshastigheten. Målet er å undersøke effekten av temperatur på elektrokjemisk korrosjon og se om temperaturen i bakken kan ha en innflytelse på korrosjonshastigheten. Dette forsøkes ved temperaturer på 0 grader, 5 grader, 10 grader og 15 grader.

Røret settes inn i et system av plastrør som ikke leder elektrisitet og en strømning av vann hentet fra vannverket på Oset settes inn i systemet. Vannet sirkulerer gjennom røret i hele prosessen og vil derfor få et stadig høyere innhold av jernoksid under eksperimentet. Vekten av røret veies før korrosjonstesten og etter en børsting innvendig veies det på nytt.

Korrosjonsstørrelsen regnes som vekttapet i røret over korrosjonsperioden. Det undersøkes kun innvendig korrosjon, da undersøkelser gjort av VAV Oslo med modellering i LEYP ikke fant noen sammenheng mellom jordtype og korrosjon.

Kilder

- Aldrich (jr), Harl P. & Aldrich, Harl P. & Paynter, Henry M. (1966)
Depth of frost penetration in non-uniform soil, Special report volume 104
- Andersland, Orlando B. & Ladanyi, Branko (2004)
Frozen ground engineering (2nd edition)
Chapter 1 – Frozen ground
Chapter 2 – Physical and thermal properties
Chapter 3 – Heat flow in soils
- American Society of Civil Engineers, og Canadian Society for Civil Engineering (1996)
Cold regions utilities monograph
Chapter 3 – Geotechnical considerations
Chapter 4 – Thermal considerations
Chapter 8 – Water distribution
Chapter 9 – Wastewater collection
Appendix A – Piping options
Appendix D – Freeze protection, thawing and heat tracing
- Balchin, D. & Hayhoe, H. N. (1990)
Field frost heave measurements and prediction during periods of seasonal frost
Canadian Geotechnical Journal 27(3): 393-397
- Bhadeshia, H.K.D.H. & Honeycombe, R. W. K. (1981)
Steels: Microstructures and Properties, 3rd Edition (2006)
- Brown, R. J. E. (1963)
Relation between mean annual air and ground temperatures in the permafrost region of Canada
First international conference on permafrost
- Cavanagh, Paul & Oswell, James M. & Skibinksy, Darren (2005)
Discussion of "Frost heave and pipeline upheaval buckling"
Canadian Geotechnical Journal 42(1): 323-324
- Crittenden, John C. & Flere (2005)
Water treatment: principles and design, second edition
Chapter 21 – Internal corrosion of water conduits
- Day, J. A. & Leadbitter, J. & Ryan, J. L. (1994)
PVC: compounds, processing and applications
- Conroy, P. (1996)
Achieving a cost effective rehabilitation solution
Chartered institution of water and environmental management
- Daigle, Lyne & Rajani, Balvant B. & Zhao, Jack Q. (2001)
Thermal performance of trench backfills used for frost protection of water service lines
Canadian Geotechnical Journal 38 (1): 161-174
- Dieter, George E. (1961)
Mechanical Metallurgy
- Eckback, D & Hedman, B. (1983)
Rørbok yttre rørledninger
Svensk byggtjanst

- Engstrand, Ulla & Olsson, Ulf (2003)
Variansanalys och försöksplanering
- Fagnou, A. Y., & Nasser, Marim W. (1974)
Structural behavior of buried plastic pipe
- Goodrich, L. E. & Sepehr, K. (1994)
Frost protection of buried PVC water mains in western Canada
Canadian Geotechnical Journal 31(4): 491-501
- Google maps
Kart over jordprøver i Oslo
- Goulter, I. C. & Kettler, A. J. (1985)
An analysis of pipe breakage in urban water distribution networks
Canadian Geotechnical Journal 48(6): 847-866
- Hu, Yafei & Vu, Hung Q. (2011)
Analysis of soil conditions and pipe behavior at a field site
Canadian Geotechnical Journal
- Hubble, D. W. & Hu, Yafei (2007)
Factors contributing to the failure of asbestos cement water mains
Canadian Journal of Civil Engineering 34: 608-621
- Konrad, J.-M. & Morgenstern, N. R. (1980)
A mechanistic theory of ice lens formation in fine grained soils
Canadian Geotechnical Journal 17(4): 473-486
- Konrad, J.-M. & Morgenstern, N. R. (1981)
The segregation potential of a freezing soil
Canadian Geotechnical Journal 18(4): 482-491
- Konrad, J.-M. & Morgenstern, N. R. (1982)
Prediction of frost heave in the laboratory during transient freezing
Canadian Geotechnical Journal 19(3): 250-259
- Larsen, Jan Otto (2012)
Forelesninger i kurset AT-205 ved UNIS
UNIS – Geotechnical Engineering
- Lindholm, Oddvar. G. (2012-2013)
Personlige meddelelser
UMB - IMT – Bygg og miljøteknikk
- Lunardini, Virgil J. (1981)
Heat transfer in cold climates
- Malpass, Dennis (2010)
Introduction to industrial polyethylene: properties, catalysts and processes
- Nixon, John F. (1982)
Field frost heave predictions using the segregation potential concept
Canadian Geotechnical Journal 19(4): 526-529
- Nixon, John F. & Morgenstern, N. R. & Reesor S.N. (1983)
Frost heave – pipeline interaction using continuum mechanics
Canadian Geotechnical Journal 20(2): 251-261

- Nixon, John F. (1992)
Discrete ice lens theory for frost heave beneath pipelines
Canadian Geotechnical Journal 29(3): 487-497
- NGU (2013)
Løsmassekart - <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>
- Norsk Vann (2004)
Vannledningsrør i Norge – historisk utvikling
Rapport 135
- Norsk Vann (2008)
Termoplastrør i Norge – før og nå
Rapport 158
- Norsk Vann (2010)
Veiledning for bruk av duktile støpejernsrør
Rapport 173
- Norges Lover (2013)
FOR 2001-12-04 nr 1372: Forskrift om vannforsyningen og drikkevann
Drikkevannsforskriften
- Palmer, Andrew C. & Williams, Peter J (2003)
Frost heave and pipeline upheaval buckling
Canadian Geotechnical Journal 40(5): 1033-1038
- Rajani, B. & Zhan, C. (1996)
On estimation of frost loads
Canadian Geotechnical Journal 33(4): 629-641
- Rajani, B. & Zhan, C. (1996)
Estimation of frost load in a trench: theory and experiment
Canadian Geotechnical Journal 34(4): 568-579
- Reksten, Kjartan (2012-2013)
Personlige meddelelser
VAV Oslo - Vanntransport
- Ruud, Jack (2012-2013)
Personlige meddelelser
VAV Oslo - Lekkasjesøking
- Røstum, Jon (2000)
Statistical modeling of pipe failures in water networks
- Rådgivende Ingeniørers Forening (2009)
State of the nation
- Smith, G. N. & Smith, Ian G. N. (1998)
Elements of soil mechanics (7th edition)
Chapter 1: Classification and identification properties of soil
- SINTEF (1998)
Forfall i ledningsnett
Samleperm for utførte porsjekter 1995-1998
- Sægrov, Sveinung & flere (1999)
Rehabilitation of water networks; Survey of research needs and on-going efforts

Sægrov, Sveinung & Fiksdal, Liv & Lange, Hans Iver (2000)
Modell for tid til brudd og gjennomtæring ledninger av støpejern

Vann- og Avløpsetaten, Oslo Kommune (2008)
Rehabiliteringsplan Vannledningsnettet 2010-2020
Bruddprognose 2010-2020

Vannverksregisteret – VREG

Ødegaard, m.fl (2012)
Vann- og avløpsteknikk
Kapittel 8

Appendiks

Appendiks A – Figurer

A.1 – Figur for korreksjonskoeffesienten i den modifiserte Berggren likningen

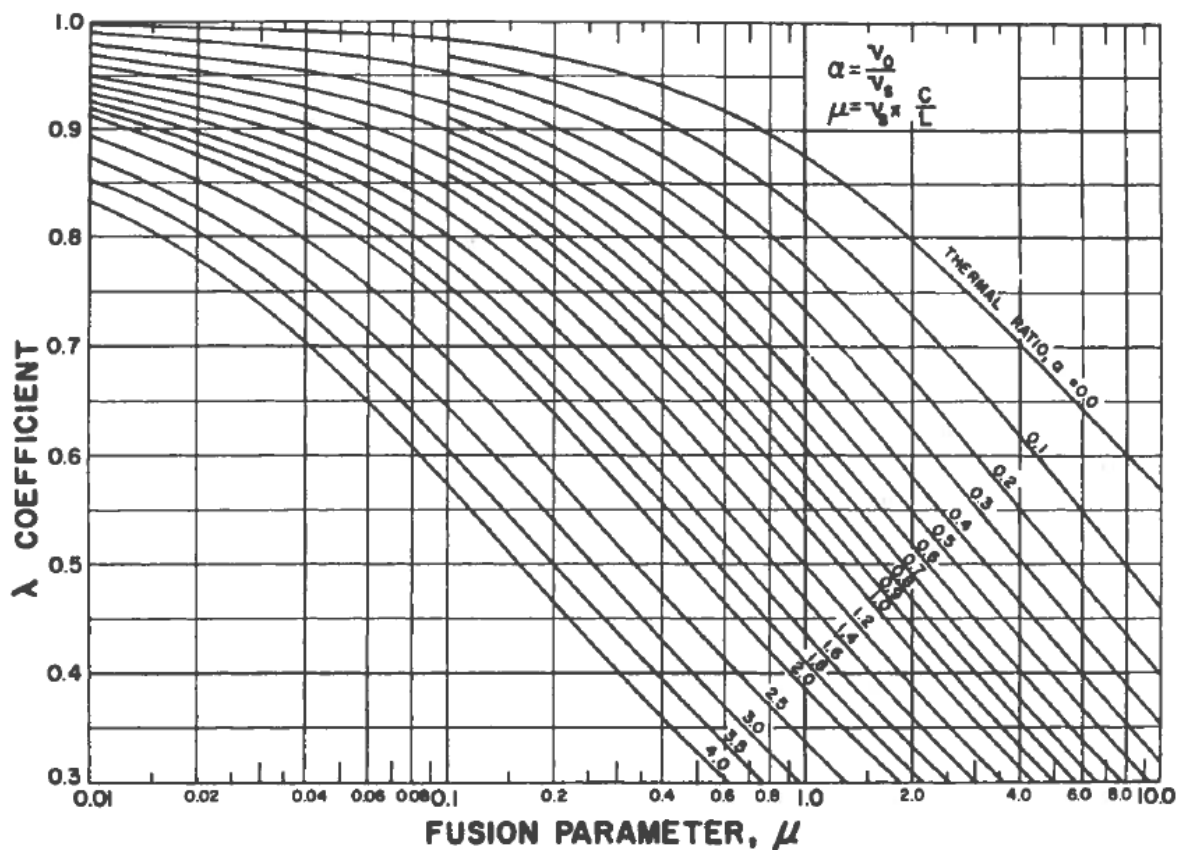


FIGURE 3-6 Correction coefficient in the modified Berggren equation.

Source: Reproduced from Department of the Army 1966.

A.2 – Varmeledningsevne for silt og leire

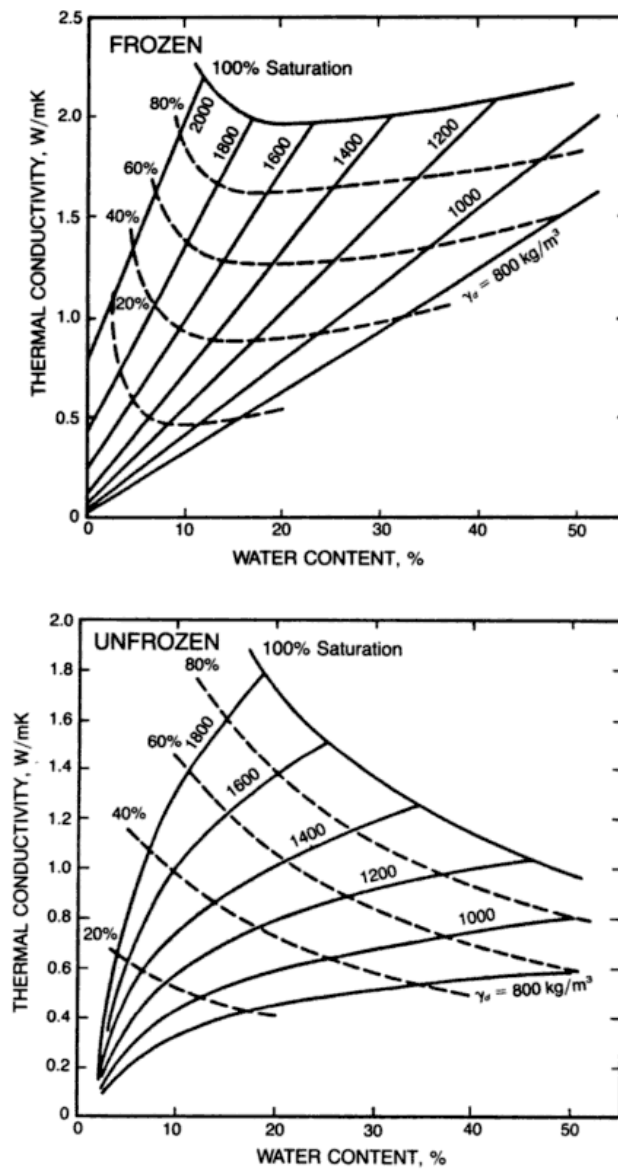


FIGURE 4-2 THERMAL CONDUCTIVITY OF SILT AND CLAY SOILS (after Kersten, 1949)

A.3 – Varmeledningsevne for sand

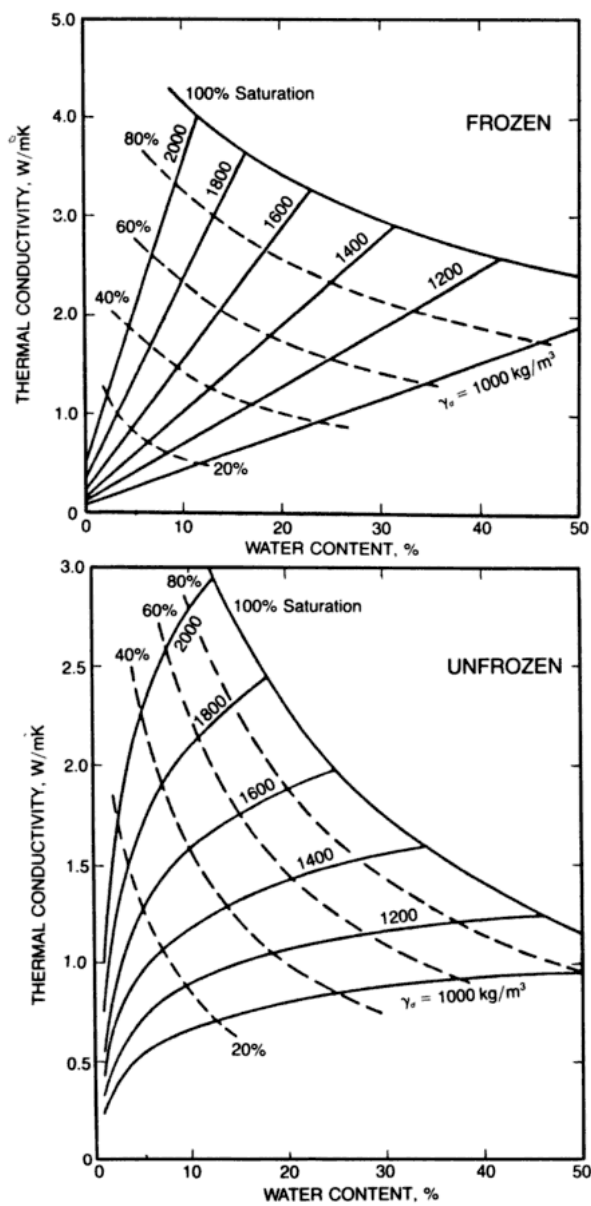


FIGURE 4-1 THERMAL CONDUCTIVITY OF SANDY SOILS (after Kersten, 1949)

A.4 – Varmeledningsevne for grus

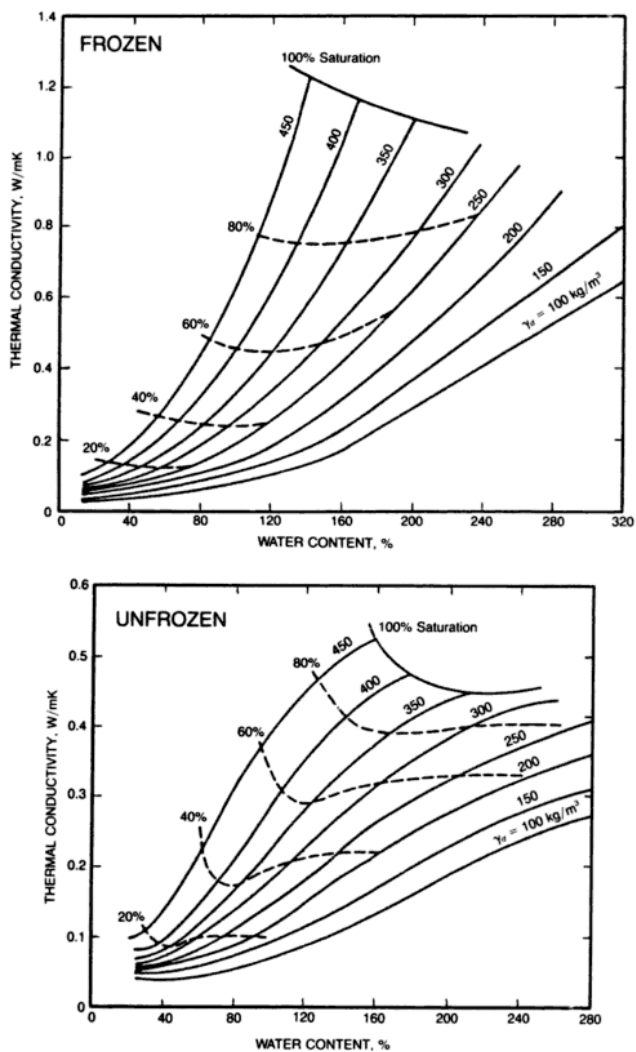


FIGURE 4-3 THERMAL CONDUCTIVITY OF PEAT (Kersten, 1949)

Appendiks A.5 – Jordtypering etter ”Department of the Navy”

| Grain size | | | |
|------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| <i>Material</i> | <i>Fraction</i> | <i>Sieve size</i> | |
| Boulders | | 12+ in. | (300+ mm) |
| Cobbles | | 3–12 in. | (75–300 mm) |
| Gravel | Coarse | ¾ to 3 in. | (19–75 mm) |
| | Fine | No. 4 to ¾ in. | (4.76–19 mm) |
| Sand | Coarse | No. 10–No. 4 | (2.0–4.76 mm) |
| | Medium | No. 40–No. 10 | (0.42–2.0 mm) |
| | Fine | No. 200–No. 40 | (0.074–0.42 mm) |
| Fines (silts and clay) | | Passing No. 200 | (0.074 mm) |

| Coarse- and fine-grained soils | |
|--------------------------------|-------------------------------|
| <i>Descriptive adjective</i> | <i>Percentage requirement</i> |
| Trace | 1–10 |
| Little | 10–20 |
| Some | 20–35 |
| And | 35–50 |

3. Fine-grained soils. Identify in accordance with plasticity characteristics, dry strength, and toughness, as described in Table 2-3.

| <i>Descriptive term</i> | <i>Thickness</i> |
|----------------------------------|---|
| Stratified soils | |
| Alternating thick and thin with: | |
| Parting | 0 to 1/16 in. (0–1.6 mm) |
| Seam | 1/16 to ½ in. (1.6–12.7 mm) |
| Layer | ½ to 12 in. (12.7–300 mm) |
| Stratum | Greater than 12 in. (> 300 mm) |
| Varved clay | Alternating seams or layers of sands, silt, and clay |
| Pocket | Small, erratic deposit, usually less than 1 ft (300 mm) |
| Lens | Lenticular deposit |
| Occasional | 1 or less per foot (300 mm) of thickness) |
| Frequent | More than 1 per foot (300 mm) of thickness |

Source: After Department of the Navy 1982.

Appendiks B – Statistikk

Appendiks B.1 - Regression Analysis: Lekkasjer versus If(dag)

The regression equation is
 $Lekkasjer = 154 - 0.134 \text{ If(dag)}$

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|-------|-------|
| Constant | 154.01 | 10.90 | 14.13 | 0.000 |
| If(dag) | -0.13391 | 0.02749 | -4.87 | 0.000 |

S = 34.8522 R-Sq = 41.8% R-Sq(adj) = 40.1%

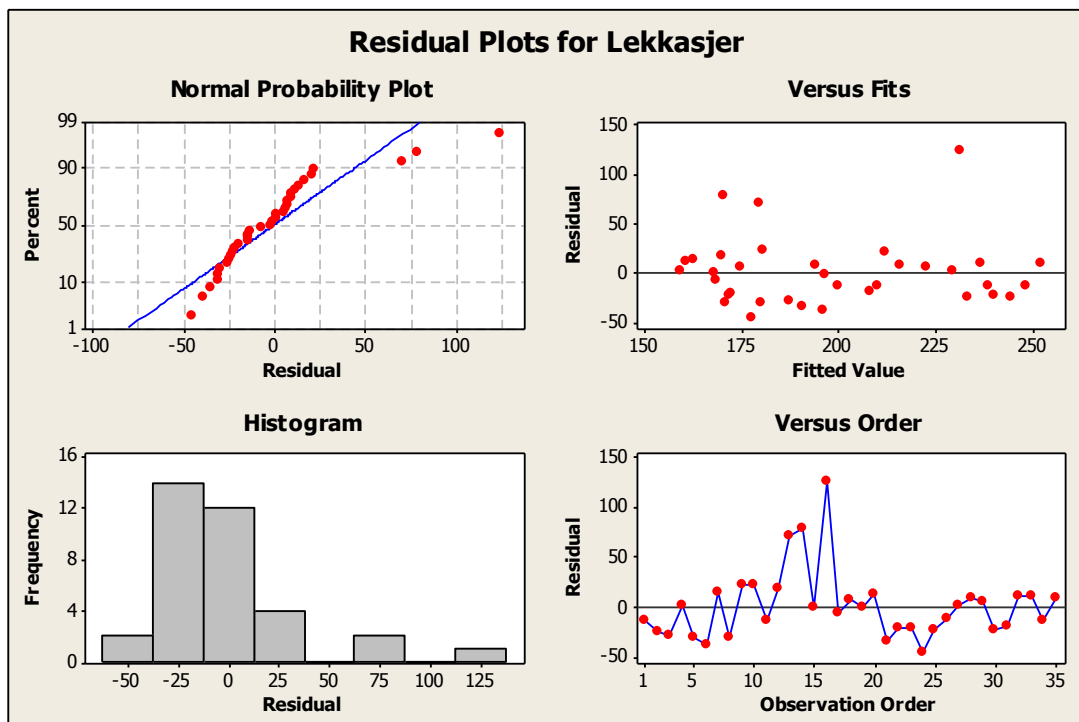
Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|
| Regression | 1 | 28825 | 28825 | 23.73 | 0.000 |
| Residual Error | 33 | 40084 | 1215 | | |
| Total | 34 | 68910 | | | |

Unusual Observations

| Obs | If(dag) | Lekkasjer | Fit | SE Fit | Residual | St Resid |
|-----|---------|-----------|--------|--------|----------|----------|
| 13 | -192 | 250.00 | 179.69 | 7.06 | 70.31 | 2.06R |
| 14 | -122 | 249.00 | 170.41 | 8.27 | 78.59 | 2.32R |
| 16 | -577 | 356.00 | 231.22 | 8.91 | 124.78 | 3.70R |

R denotes an observation with a large standardized residual.



Appendiks B.2 - Regression Analysis: Lekkasjer versus If(Måned)

The regression equation is
 $Lekkasjer = 151 - 0.138 \text{ If(Måned)}$

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|-------|-------|
| Constant | 150.69 | 11.58 | 13.01 | 0.000 |
| If(Måned) | -0.13785 | 0.02859 | -4.82 | 0.000 |

S = 35.0024 R-Sq = 41.3% R-Sq(adj) = 39.6%

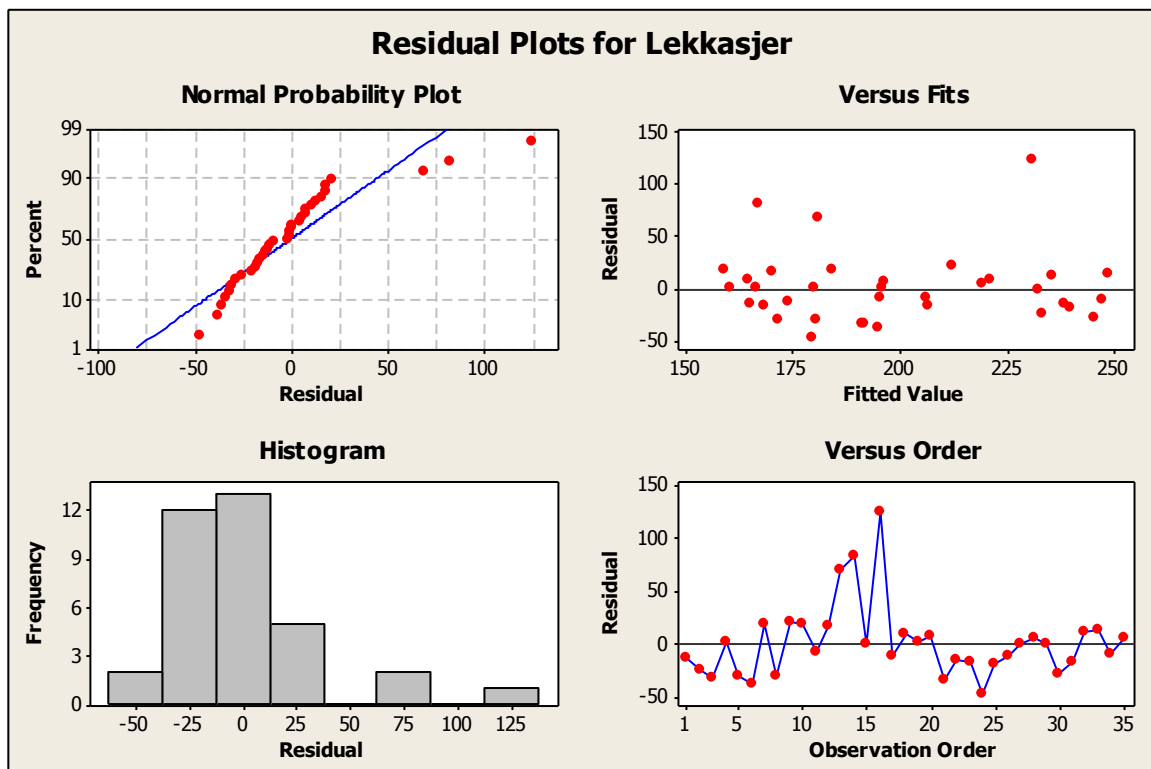
Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|
| Regression | 1 | 28479 | 28479 | 23.25 | 0.000 |
| Residual Error | 33 | 40430 | 1225 | | |
| Total | 34 | 68910 | | | |

Unusual Observations

| Obs | If(Måned) | Lekkasjer | Fit | SE Fit | Residual | St Resid |
|-----|-----------|-----------|--------|--------|----------|----------|
| 13 | -220 | 250.00 | 181.07 | 6.95 | 68.93 | 2.01R |
| 14 | -118 | 249.00 | 166.94 | 8.85 | 82.06 | 2.42R |
| 16 | -582 | 356.00 | 230.90 | 8.92 | 125.10 | 3.70R |

R denotes an observation with a large standardized residual.



Appendiks B.3 - Regression Analysis: Lekkasjer versus If(dag); Snødybde

The regression equation is

$$\text{Lekkasjer} = 168 - 0.193 \text{ If(dag)} - 2.22 \text{ Snødybde}$$

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|-------|-------|
| Constant | 167.59 | 10.38 | 16.14 | 0.000 |
| If(dag) | -0.19278 | 0.02988 | -6.45 | 0.000 |
| Snødybde | -2.2187 | 0.6675 | -3.32 | 0.002 |

S = 30.5147 R-Sq = 56.8% R-Sq(adj) = 54.1%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|
| Regression | 2 | 39113 | 19556 | 21.00 | 0.000 |
| Residual Error | 32 | 29797 | 931 | | |
| Total | 34 | 68910 | | | |

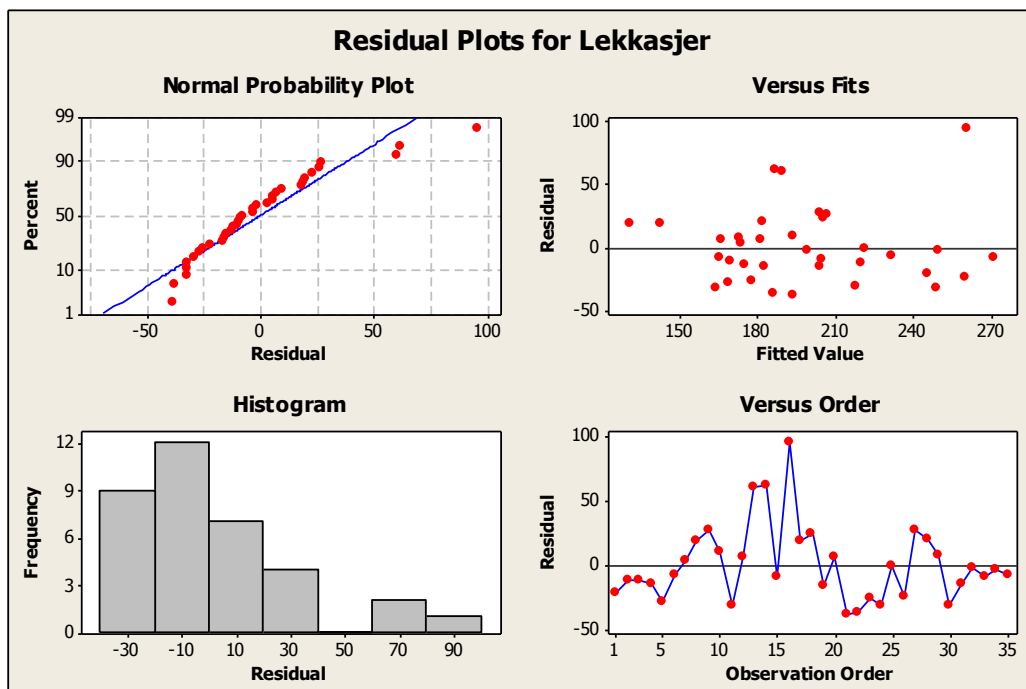
| Source | DF | Seq SS |
|----------|----|--------|
| If(dag) | 1 | 28825 |
| Snødybde | 1 | 10287 |

Unusual Observations

| Obs | If(dag) | Lekkasjer | Fit | SE Fit | Residual | St Resid |
|-----|---------|-----------|--------|--------|----------|----------|
| 8 | -196 | 150.00 | 131.09 | 16.02 | 18.91 | 0.73 X |
| 13 | -192 | 250.00 | 189.59 | 6.87 | 60.41 | 2.03R |
| 14 | -122 | 249.00 | 186.77 | 8.76 | 62.23 | 2.13R |
| 16 | -577 | 356.00 | 260.56 | 11.78 | 95.44 | 3.39R |

R denotes an observation with a large standardized residual.

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



Appendiks B.4 - Regression Analysis: Lekkasjer (modifisert) versus If(dag)

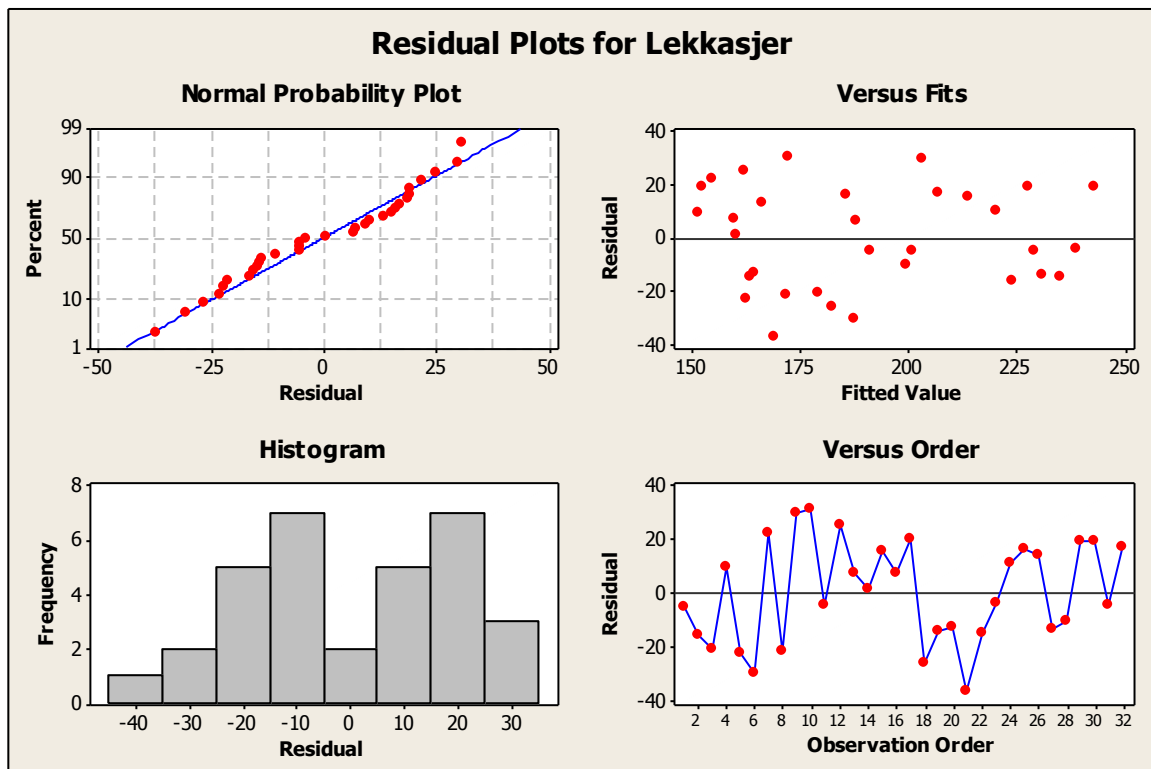
The regression equation is
 Lekkasjer = 146 - 0.132 If(dag)

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|-------|-------|
| Constant | 146.093 | 6.303 | 23.18 | 0.000 |
| If(dag) | -0.13202 | 0.01576 | -8.38 | 0.000 |

S = 19.1915 R-Sq = 70.1% R-Sq(adj) = 69.1%

Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|
| Regression | 1 | 25852 | 25852 | 70.19 | 0.000 |
| Residual Error | 30 | 11049 | 368 | | |
| Total | 31 | 36902 | | | |



Appendiks B.5 - Regression Analysis: Lekkasjer (modifisert) versus If(dag); Snødybde

The regression equation is
 $Lekkasjer = 153 - 0.160 \text{ If(dag)} - 1.03 \text{ Snødybde}$

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|----------|---------|-------|-------|
| Constant | 152.998 | 6.452 | 23.71 | 0.000 |
| If(dag) | -0.16003 | 0.01842 | -8.69 | 0.000 |
| Snødybde | -1.0313 | 0.4155 | -2.48 | 0.019 |

S = 17.7268 R-Sq = 75.3% R-Sq(adj) = 73.6%

Analysis of Variance

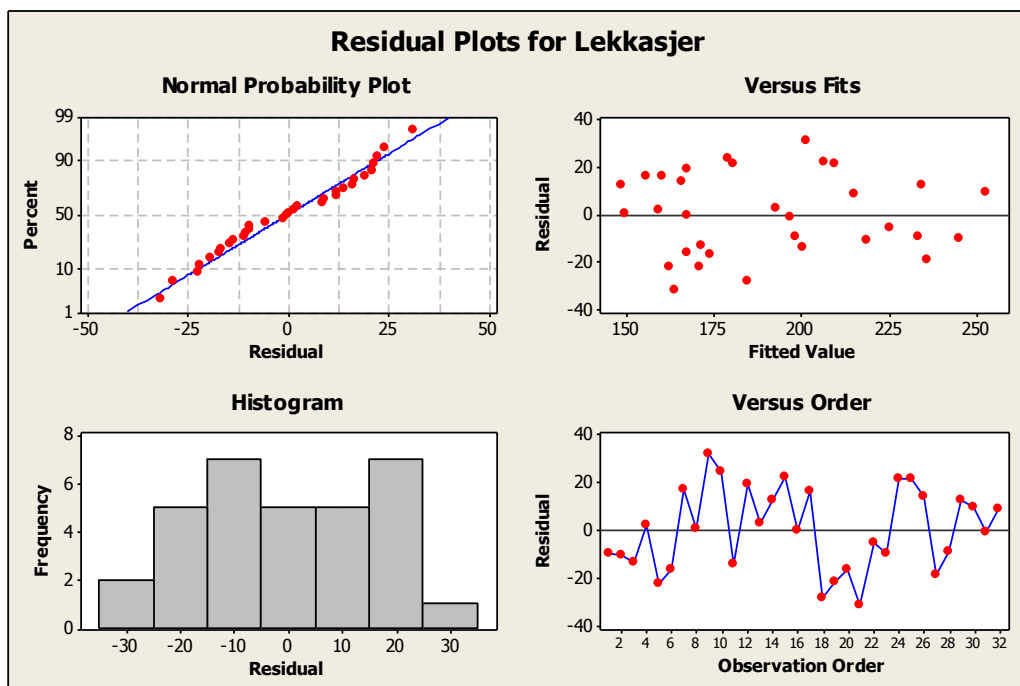
| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|
| Regression | 2 | 27789 | 13894 | 44.22 | 0.000 |
| Residual Error | 29 | 9113 | 314 | | |
| Total | 31 | 36902 | | | |

| Source | DF | Seq SS |
|----------|----|--------|
| If(dag) | 1 | 25852 |
| Snødybde | 1 | 1936 |

Unusual Observations

| Obs | If(dag) | Lekkasjer | Fit | SE Fit | Residual | St Resid |
|-----|---------|-----------|--------|--------|----------|----------|
| 8 | -196 | 150.00 | 149.85 | 9.68 | 0.15 | 0.01 X |

X denotes an observation whose X value gives it large leverage.



Appendiks B.6 - Regression Analysis: Lekkasje pr Lengde (km) versus If(dag)

The regression equation is

$$\text{Lekkasje pr Lengde (km)} = 0.101 - 0.000088 \text{ If(dag)}$$

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|-------------|------------|-------|-------|
| Constant | 0.101319 | 0.007780 | 13.02 | 0.000 |
| If(dag) | -0.00008756 | 0.00002115 | -4.14 | 0.000 |

S = 0.0242683 R-Sq = 37.1% R-Sq(adj) = 35.0%

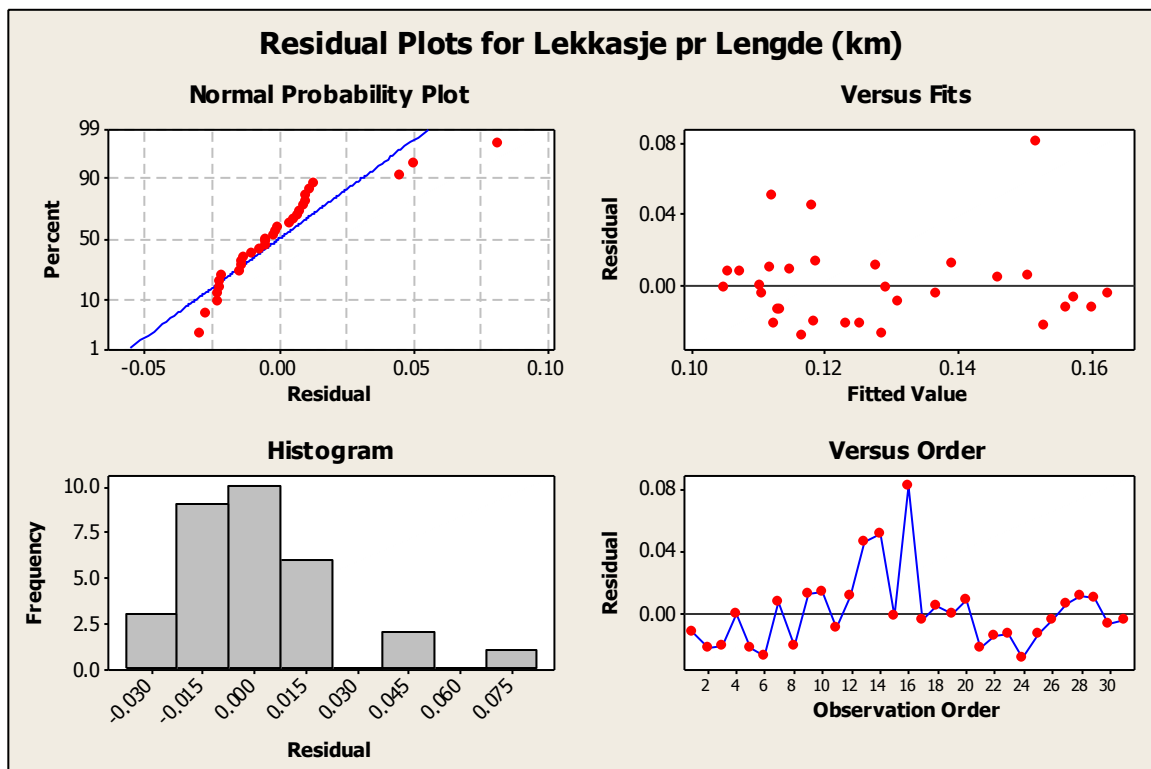
Analysis of Variance

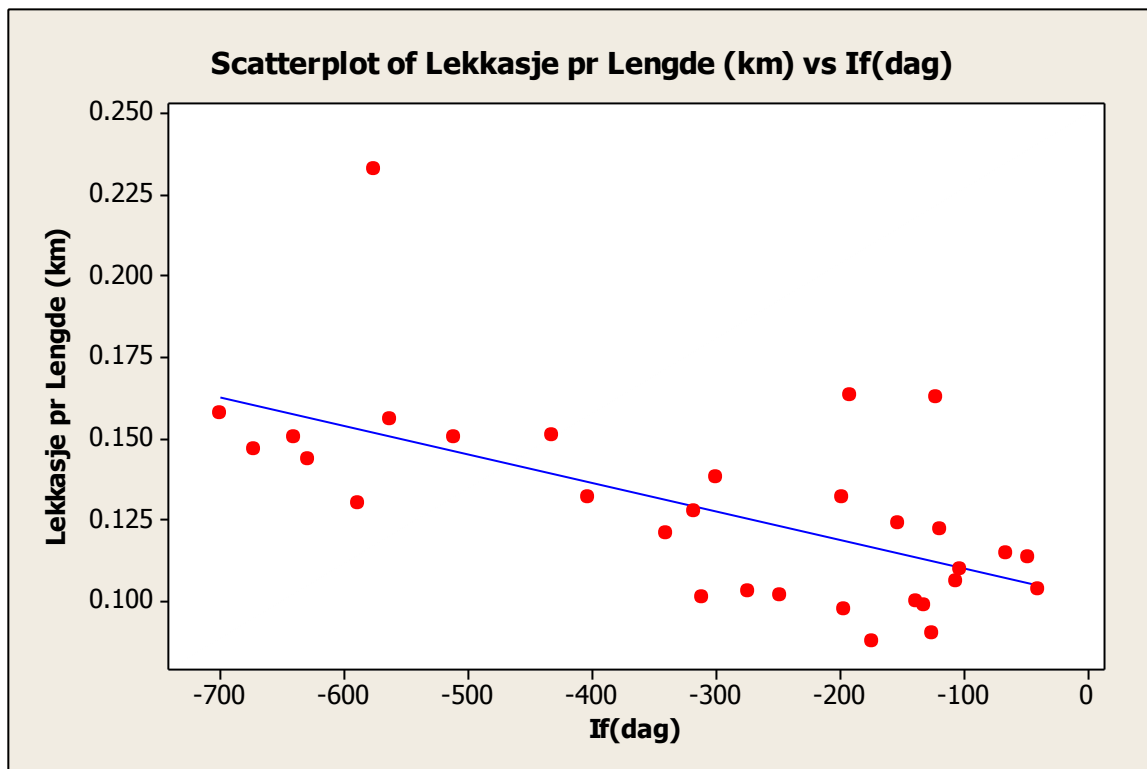
| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|----------|----------|-------|-------|
| Regression | 1 | 0.010093 | 0.010093 | 17.14 | 0.000 |
| Residual Error | 29 | 0.017080 | 0.000589 | | |
| Total | 30 | 0.027172 | | | |

Unusual Observations

| Obs | If(dag) | Lekkasje pr Lengde (km) | Fit | SE Fit | Residual | St Resid |
|-----|---------|-------------------------|---------|---------|----------|----------|
| 14 | -122 | 0.16275 | 0.11205 | 0.00582 | 0.05070 | 2.15R |
| 16 | -577 | 0.23344 | 0.15181 | 0.00722 | 0.08164 | 3.52R |

R denotes an observation with a large standardized residual.





Appendiks B.7 - Regression Analysis: Lekkasje pr volum (mill m³) versus If(dag)

The regression equation is
 Lekkasje pr volum (mill m³) = 1.55 - 0.00109 If(dag)

| Predictor | Coef | SE Coef | T | P |
|-----------|------------|-----------|-------|-------|
| Constant | 1.5521 | 0.1515 | 10.25 | 0.000 |
| If(dag) | -0.0010946 | 0.0004119 | -2.66 | 0.013 |

S = 0.472550 R-Sq = 19.6% R-Sq(adj) = 16.8%

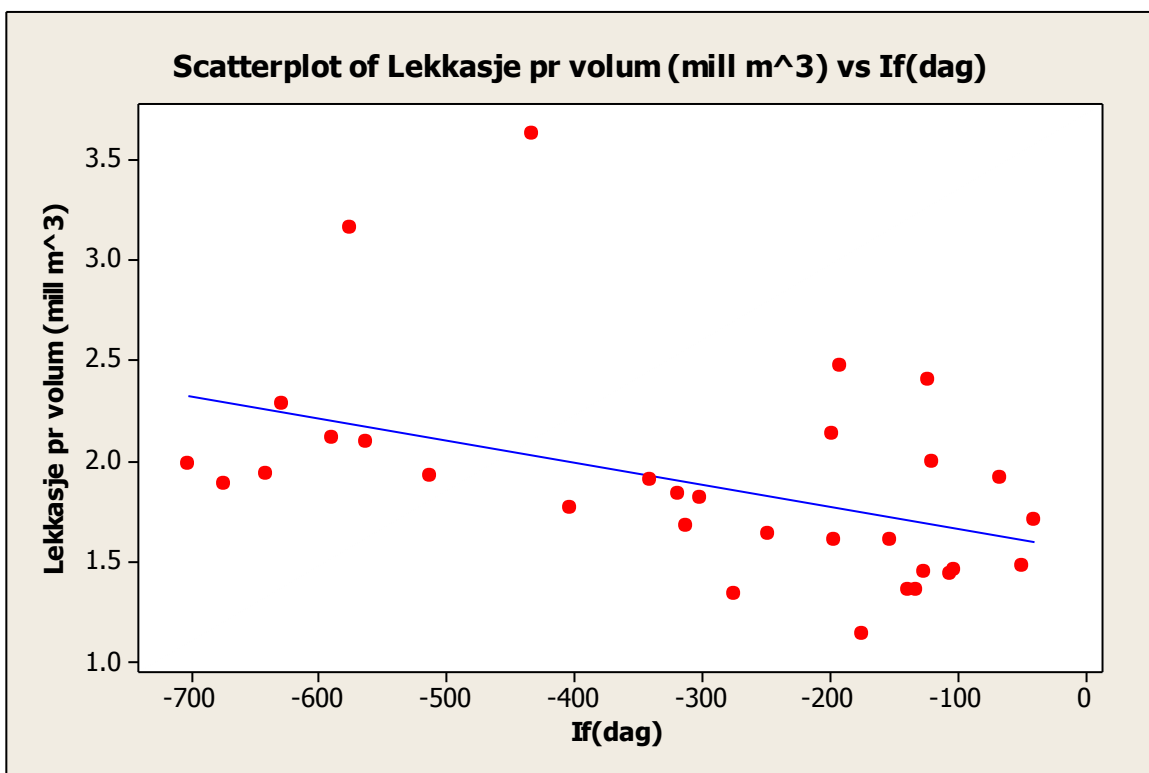
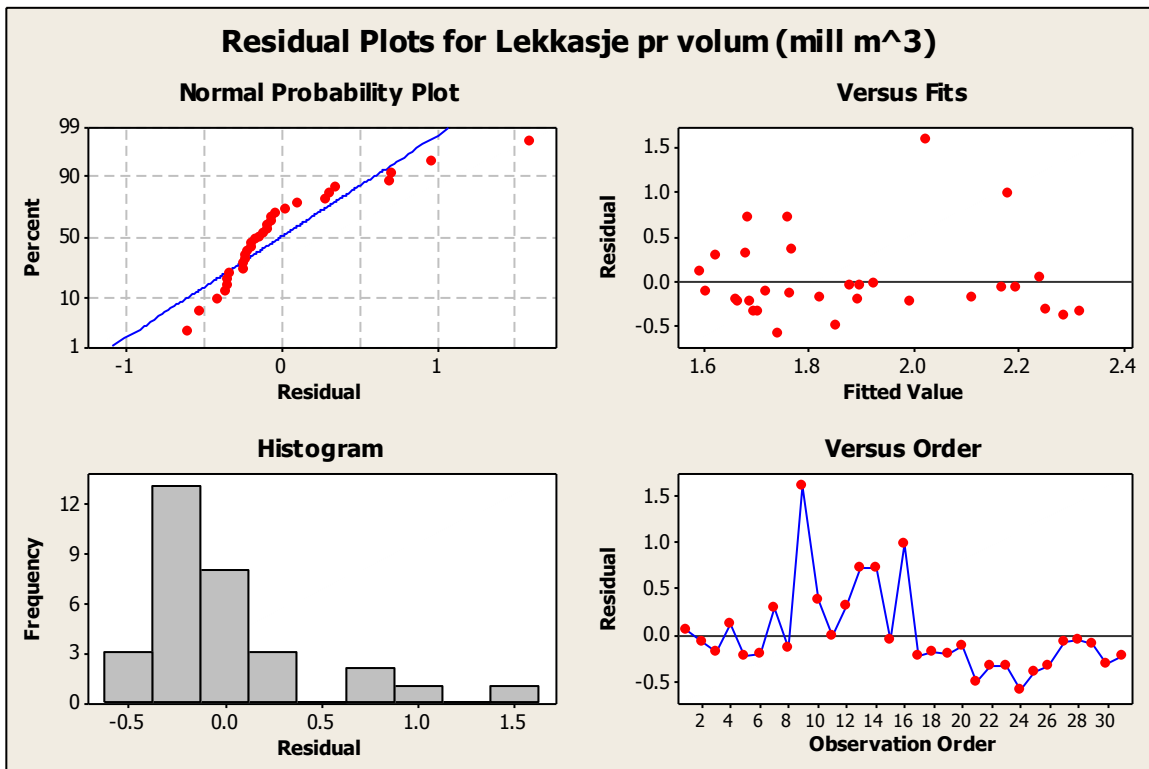
Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|----------------|----|--------|--------|------|-------|
| Regression | 1 | 1.5772 | 1.5772 | 7.06 | 0.013 |
| Residual Error | 29 | 6.4758 | 0.2233 | | |
| Total | 30 | 8.0530 | | | |

Unusual Observations

| Obs | If(dag) | Lekkasje pr volum (mill m ³) | Fit | SE Fit | Residual | St Resid |
|-----|---------|---|--------|--------|----------|----------|
| 9 | -433 | 3.6236 | 2.0257 | 0.0999 | 1.5980 | 3.46R |
| 16 | -577 | 3.1588 | 2.1833 | 0.1405 | 0.9755 | 2.16R |

R denotes an observation with a large standardized residual.



Appendiks C – Datagrunnlag

Appendiks C.1 – Frostindeks og snødybde

| Vintersesong | År | Iaf (Dag) | | Iaf (Måned) | | Differanse |
|--------------|-----------|----------------|-------------|----------------|------------|------------|
| | | (Grader*dager) | (xi-xn)^2 | (Grader*dager) | (xi-xn)^2 | |
| 2012 | 2011-2012 | -158.1 | 29125.21485 | -179.0 | 22433.7727 | 20.9 |
| 2011 | 2010-2011 | -629.8 | 90624.41262 | -636.1 | 94438.3834 | 6.3 |
| 2010 | 2009-2010 | -590.6 | 68559.60373 | -598.3 | 72632.0984 | 7.7 |
| 2009 | 2008-2009 | -249.2 | 6329.970401 | -298.5 | 914.658275 | 49.3 |
| 2008 | 2007-2008 | -40.3 | 83209.81262 | -69.4 | 67275.7706 | 29.1 |
| 2007 | 2006-2007 | -126.5 | 40909.55707 | -150.6 | 31740.7977 | 24.1 |
| 2006 | 2005-2006 | -312.6 | 261.1815123 | -321.9 | 47.2671267 | 9.3 |
| 2005 | 2004-2005 | -66.3 | 68885.83485 | -61.3 | 71551.295 | -5.0 |
| 2004 | 2003-2003 | -196.2 | 17572.44818 | -216.3 | 12638.3667 | 20.1 |
| 2003 | 2002-2003 | -432.6 | 10782.51485 | -446.0 | 13755.9211 | 13.4 |
| 2002 | 2001-2002 | -198.4 | 16994.01929 | -244.1 | 7170.95377 | 45.7 |
| 2001 | 2000-2001 | -340.9 | 147.3526235 | -323.2 | 30.8972543 | -17.7 |
| 2000 | 1999-2000 | -119.9 | 43622.96373 | -142.8 | 34590.8784 | 22.9 |
| 1999 | 1998-1999 | -191.8 | 18758.34596 | -220.4 | 11737.0511 | 28.6 |
| 1998 | 1997-1998 | -122.5 | 42543.64596 | -117.9 | 44459.0118 | -4.6 |
| 1997 | 1996-1997 | -318.9 | 97.24151235 | -326.4 | 5.56636747 | 7.5 |
| 1996 | 1995-1996 | -576.6 | 61424.11485 | -581.9 | 64074.9484 | 5.3 |
| 1995 | 1994-1995 | -106.3 | 49488.94596 | -168.8 | 25589.0086 | 62.5 |
| 1994 | 1993-1994 | -512.9 | 33907.1304 | -509.1 | 32512.9702 | -3.8 |
| 1993 | 1992-1993 | -102.7 | 51103.62596 | -113.8 | 46217.4931 | 11.1 |
| 1992 | 1991-1992 | -49 | 78266.27929 | -99.3 | 52672.8992 | 50.3 |
| 1991 | 1990-1991 | -275.4 | 2847.408179 | -293.9 | 1214.95852 | 18.5 |
| 1990 | 1989-1990 | -131.9 | 38754.29707 | -102.6 | 51137.3522 | -29.3 |
| 1989 | 1988-1989 | -138.4 | 36237.35262 | -127.8 | 40373.2443 | -10.6 |
| 1988 | 1987-1988 | -175 | 23642.47929 | -209.2 | 14293.1969 | 34.2 |
| 1987 | 1986-1987 | -674.3 | 119397.1237 | -646.5 | 100958.003 | -27.8 |
| 1986 | 1985-1986 | -702.3 | 139531.3015 | -701.0 | 138547.685 | -1.3 |
| 1985 | 1984-1985 | -563.6 | 55149.30373 | -593.1 | 69855.0201 | 29.5 |
| 1984 | 1983-1984 | -301 | 770.6792901 | -330.2 | 2.14966174 | 29.2 |
| 1983 | 1982-1983 | -153.5 | 30716.45707 | -213.2 | 13350.3991 | 59.7 |
| 1982 | 1981-1982 | -642.1 | 98181.25929 | -687.3 | 128555.941 | 45.2 |
| 1981 | 1980-1981 | -404.1 | 5675.948179 | -407.2 | 6155.47503 | 3.1 |
| 1980 | 1979-1980 | -618.4 | 83890.68596 | -616.6 | 82860.4209 | -1.8 |
| 1979 | 1978-1979 | -734.2 | 164380.6926 | -712.1 | 146973.459 | -22.1 |
| 1978 | 1977-1978 | -417.3 | 7839.134846 | -403.8 | 5625.55477 | -13.5 |
| 1977 | 1976-1977 | -461.8 | 17699.34596 | -495.9 | 27942.8889 | 34.1 |
| 1976 | 1975-1976 | | | -306.8 | 483.953063 | |

| | | | | | | |
|------|-----------|--|--|--------|------------|--|
| 1975 | 1974-1975 | | | -173.8 | 24021.8591 | |
| 1974 | 1973-1974 | | | -116.1 | 45237.2245 | |
| 1973 | 1972-1973 | | | -56.0 | 74376.0841 | |
| 1972 | 1971-1972 | | | -357.4 | 818.323458 | |

| Vintersesong | Gjennomsnittlig snødybde | Iaf(5 vintre) | Iaf(3 vintre) | Iaf(Dag,kun-) | Diff, dag vs dag- |
|--------------|--------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
| | cm | | | | |
| 2012 | 13.5 | -1752.8 | -1532.9 | -216.5 | -58.4 |
| 2011 | 19.5 | -1438.7 | -966.2 | -654.2 | -24.4 |
| 2010 | 27.7 | -901.7 | -518.5 | -604.8 | -14.2 |
| 2009 | 20.7 | -819.5 | -541.9 | -303.4 | -54.2 |
| 2008 | 0.0 | -1196.1 | -533.8 | -153.6 | -113.3 |
| 2007 | 10.5 | -1289.6 | -599.5 | -197.9 | -71.4 |
| 2006 | 28.3 | -1290.9 | -723.7 | -368.4 | -55.8 |
| 2005 | 3.0 | -1372.4 | -906.5 | -211 | -144.7 |
| 2004 | 33.5 | -1376.5 | -1013.3 | -251.2 | -55 |
| 2003 | 20.0 | -1048.4 | -710.1 | -484.5 | -51.9 |
| 2002 | 5.5 | -1130.7 | -686.4 | -262.7 | -64.3 |
| 2001 | 7.0 | -1389.4 | -481.1 | -393.1 | -52.2 |
| 2000 | 4.3 | -1415.4 | -664.7 | -219.6 | -99.7 |
| 1999 | 6.8 | -1704.1 | -1026.2 | -291.6 | -99.8 |
| 1998 | 2.0 | -1699.9 | -1077.1 | -226.2 | -103.7 |
| 1997 | 11.0 | -1472.8 | -1259.8 | -407.3 | -88.4 |
| 1996 | 8.2 | -1184.8 | -791.6 | -634 | -57.4 |
| 1995 | 20.5 | -1118.6 | -722.1 | -195.2 | -88.9 |
| 1994 | 27.5 | -737.4 | -506.9 | -546.4 | -33.5 |
| 1993 | 2.0 | -832.8 | -495.8 | -192.1 | -89.4 |
| 1992 | 5.0 | -1380.1 | -524.4 | -153.5 | -104.5 |
| 1991 | 12.0 | -1787.1 | -439.7 | -342 | -66.6 |
| 1990 | 3.0 | -2277.6 | -983.5 | -168 | -36.1 |
| 1989 | 7.5 | -2480.0 | -1556.7 | -171.1 | -32.7 |
| 1988 | 16.7 | -2484.0 | -1940.5 | -250 | -75 |
| 1987 | 34.3 | -2524.8 | -1624.3 | -689.4 | -15.1 |
| 1986 | 19.5 | -2231.0 | -1136.5 | -717.1 | -14.8 |
| 1985 | 32.7 | -2254.6 | -1230.8 | -596.2 | -32.6 |
| 1984 | 19.8 | -2636.5 | -1307.7 | -395 | -94 |
| 1983 | 11.0 | -2827.0 | -1711.1 | -237.1 | -83.6 |
| 1982 | 19.0 | -2635.7 | -1736.0 | -663.9 | -21.8 |
| 1981 | 18.6 | -2535.2 | -1732.5 | -481 | -76.9 |
| 1980 | 16.8 | -2092.4 | -1611.8 | -667.4 | -49 |
| 1979 | 17.3 | -1496.3 | -1206.4 | -753.3 | -19.1 |
| 1978 | 22.0 | -1148.6 | -976.5 | -456.9 | -39.6 |
| 1977 | 11.3 | -1010.0 | -596.6 | -495.3 | -33.5 |

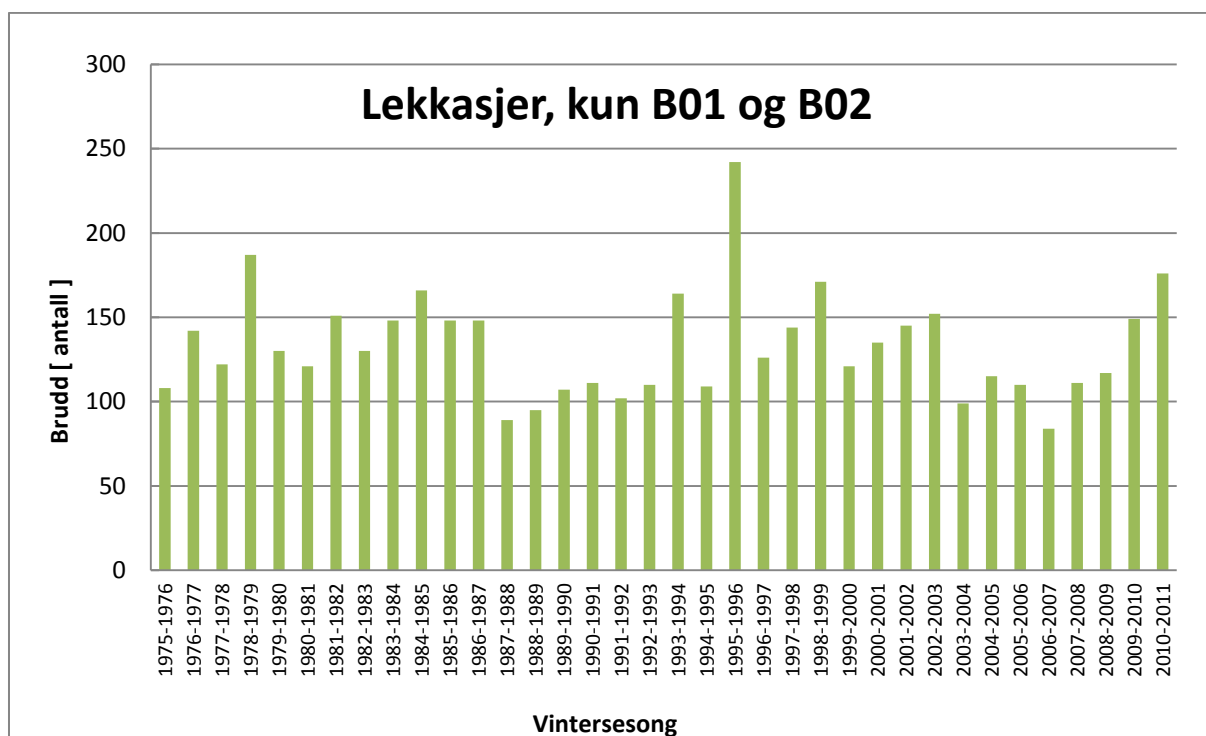
| | | | | | |
|------|-----|--------|--|--|--|
| 1976 | 0.0 | -703.3 | | | |
| 1975 | 0.0 | -529.5 | | | |
| 1974 | 0.0 | -413.4 | | | |
| 1973 | 0.0 | -357.4 | | | |
| 1972 | 0.0 | 0.0 | | | |

Appendiks C.2 – Lekkasje, nettlengde, vannproduksjon

| År | Totalt antall lekkasjer | | Andel B01 og B02 | Prosent av året | Nettlengde (km) | Vannproduksjon (mill m ³) |
|------------------|-------------------------|------|------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------|
| | Formel | Tall | Kun B01 og B02 | | | |
| 2010-2011 | 224 | 224 | 176 | 78.57 % | 1562 | 98.3 |
| 2009-2010 | 208 | 208 | 149 | 71.63 % | 1600 | 98.3 |
| 2008-2009 | 158 | 158 | 117 | 74.05 % | 1558 | 96.4 |
| 2007-2008 | 161 | 161 | 111 | 68.94 % | 1555 | 94.6 |
| 2006-2007 | 140 | 140 | 84 | 60.00 % | 1553 | 96.7 |
| 2005-2006 | 157 | 157 | 110 | 70.06 % | 1550 | 93.7 |
| 2004-2005 | 177 | 177 | 115 | 64.97 % | 1547 | 92.7 |
| 2003-2004 | 150 | 150 | 99 | 66.00 % | 1544 | 93.1 |
| 2002-2003 | 233 | 233 | 152 | 65.24 % | 1542 | 64.3 |
| 2001-2002 | 203 | 203 | 145 | 71.43 % | 1539 | 95.3 |
| 2000-2001 | 186 | 186 | 135 | 72.58 % | 1536 | 97.9 |
| 1999-2000 | 187 | 187 | 121 | 64.71 % | 1533 | 93.8 |
| 1998-1999 | 250 | 250 | 171 | 68.40 % | 1531 | 101.3 |
| 1997-1998 | 249 | 249 | 144 | 57.83 % | 1530 | 103.9 |
| 1996-1997 | 195 | 195 | 126 | 64.62 % | 1527 | 106.1 |
| 1995-1996 | 356 | 356 | 242 | 67.98 % | 1525 | 112.7 |
| 1994-1995 | 161 | 161 | 109 | 67.70 % | 1523 | 112.3 |
| 1993-1994 | 229 | 229 | 164 | 71.62 % | 1522 | 118.8 |
| 1992-1993 | 167 | 167 | 110 | 65.87 % | 1520 | 114.9 |
| 1991-1992 | 172 | 172 | 102 | 59.30 % | 1517 | 116.5 |
| 1990-1991 | 156 | 156 | 111 | 71.15 % | 1515 | 116.7 |
| 1989-1990 | 149 | 149 | 107 | 71.81 % | 1513 | 109.8 |
| 1988-1989 | 151 | 151 | 95 | 62.91 % | 1512 | 111.4 |
| 1987-1988 | 132 | 132 | 89 | 67.42 % | 1507 | 115.5 |
| 1986-1987 | 220 | 220 | 148 | 67.27 % | 1497 | 116.5 |
| 1985-1986 | 235 | 235 | 148 | 62.98 % | 1490 | 118.6 |
| 1984-1985 | 231 | 231 | 166 | 71.86 % | 1478 | 110.6 |
| 1983-1984 | 202 | 202 | 148 | 73.27 % | 1462 | 111 |
| 1982-1983 | 180 | 180 | 130 | 72.22 % | 1453 | 112.1 |
| 1981-1982 | 217 | 217 | 151 | 69.59 % | 1444 | 112.2 |
| 1980-1981 | 189 | 189 | 121 | 64.02 % | 1435 | 107 |

| | | | | | | |
|------------------|-----|-----|-----|---------|--|--|
| 1979-1980 | 247 | 247 | 130 | 52.63 % | | |
| 1978-1979 | 262 | 262 | 187 | 71.37 % | | |
| 1977-1978 | 196 | 196 | 122 | 62.24 % | | |
| 1976-1977 | 224 | 224 | 142 | 63.39 % | | |
| 1975-1976 | 176 | 176 | 108 | 61.36 % | | |

| År | Nettlengde (km) | Vannproduksjon (mill m ³) | Lekkasje pr Lengde | Lekkasje pr produksjon |
|------------------|-----------------|---------------------------------------|--------------------|------------------------|
| 2010-2011 | 1562 | 98.3 | 0.1434 | 2.2787 |
| 2009-2010 | 1600 | 98.3 | 0.1300 | 2.1160 |
| 2008-2009 | 1558 | 96.4 | 0.1014 | 1.6390 |
| 2007-2008 | 1555 | 94.6 | 0.1035 | 1.7019 |
| 2006-2007 | 1553 | 96.7 | 0.0901 | 1.4478 |
| 2005-2006 | 1550 | 93.7 | 0.1013 | 1.6756 |
| 2004-2005 | 1547 | 92.7 | 0.1144 | 1.9094 |
| 2003-2004 | 1544 | 93.1 | 0.0972 | 1.6112 |
| 2002-2003 | 1542 | 64.3 | 0.1511 | 3.6236 |
| 2001-2002 | 1539 | 95.3 | 0.1319 | 2.1301 |
| 2000-2001 | 1536 | 97.9 | 0.1211 | 1.8999 |
| 1999-2000 | 1533 | 93.8 | 0.1220 | 1.9936 |
| 1998-1999 | 1531 | 101.3 | 0.1633 | 2.4679 |
| 1997-1998 | 1530 | 103.9 | 0.1627 | 2.3965 |
| 1996-1997 | 1527 | 106.1 | 0.1277 | 1.8379 |
| 1995-1996 | 1525 | 112.7 | 0.2334 | 3.1588 |
| 1994-1995 | 1523 | 112.3 | 0.1057 | 1.4337 |
| 1993-1994 | 1522 | 118.8 | 0.1505 | 1.9276 |
| 1992-1993 | 1520 | 114.9 | 0.1099 | 1.4534 |
| 1991-1992 | 1517 | 116.5 | 0.1134 | 1.4764 |
| 1990-1991 | 1515 | 116.7 | 0.1030 | 1.3368 |
| 1989-1990 | 1513 | 109.8 | 0.0985 | 1.3570 |
| 1988-1989 | 1512 | 111.4 | 0.0999 | 1.3555 |
| 1987-1988 | 1507 | 115.5 | 0.0876 | 1.1429 |
| 1986-1987 | 1497 | 116.5 | 0.1470 | 1.8884 |
| 1985-1986 | 1490 | 118.6 | 0.1577 | 1.9815 |
| 1984-1985 | 1478 | 110.6 | 0.1563 | 2.0886 |
| 1983-1984 | 1462 | 111 | 0.1382 | 1.8198 |
| 1982-1983 | 1453 | 112.1 | 0.1239 | 1.6057 |
| 1981-1982 | 1444 | 112.2 | 0.1503 | 1.9340 |
| 1980-1981 | 1435 | 107 | 0.1317 | 1.7664 |



Appendiks C.3 – Resultater jordprøver

| Prøve | Sted | Dato | Dybde [m] | Diameter VL [mm] | Materiale | Bruddtype | Jordtype |
|-------|--------------------|------------|-----------|------------------|-----------|----------------|------------|
| 1 | Melkeveien 60 | 14.12.2012 | 1.8 | 150 | SJG | B02 | Sand |
| 2 | Madserud Alle | 18.12.2012 | 1.85 | 125 | SJG | B06 | Sand |
| 3 | Bakkerudveien 10 | 20.11.2012 | 2 | 100 | SJG | B02 | Silt/Leire |
| 4 | Refstadsvingen 11 | 16.01.2013 | 1.75 | 150 | SJG | B02 | Silt/Leire |
| 5 | Hospitsveien 5 | 22.01.2013 | 3.5 | 150 | SJG | B02 | Grus |
| 6 | Myrerskogveien 47 | 15.11.2012 | 2 | 150 | SJG | B19 | Silt/Leire |
| 7 | Stamhusveien 13 | 24.01.2013 | 1.7 | 150 | SJG | Ukjent | Silt/Leire |
| 8 | Voksenkollveien 30 | 10.12.2012 | 1.8 | 150 | SJG | B02 | Sand |
| 9 | Akersgata 60 | 26.11.2012 | 1.8 | 180 | PE | Andre arbeider | Sand |
| 10 | Sollerudveien 5b | 30.11.2012 | 1.9 | 150 | SJG | B06 | Silt/Leire |
| 11 | Ullernchausseen 8 | 03.12.2012 | 1.9 | 150 | SJG | B02 | Grus |
| 12 | Østmarkveien 71 | 08.11.2012 | 2 | 150 | SJG | B02 | Silt/Leire |
| 13 | Rosenlundgata | 04.01.2013 | 2.2 | 125 | SJG | B02 | Sand |
| 14 | Ivar Aasens vei 1 | 07.12.2012 | 1.9 | 125 | SJG | SBV | Sand |
| 15 | Økern Torgvei 3 | 19.11.2012 | 1.85 | 150 | SJG | B02 | Silt/Leire |
| 16 | Måltrostveien 23 | 20.11.2012 | 2.1 | 150 | SJG | B02 | Silt/Leire |
| 17 | Haraldrudveien 29 | 11.01.2013 | 2.2 | 200 | SJG | B02 | Silt/Leire |
| 18 | Stordamsnaret 5 | 03.01.2013 | 1.95 | 150 | SJG | B02 | Silt/Leire |
| 19 | Risalleen 40 | 29.11.2012 | 2 | 175 | SJG | B04 | Silt/Leire |
| 20 | Stålfjæra 11 | 31.01.2013 | 1.8 | 200 | SJG | SBV | Silt/Leire |
| 21 | Myrerskogveien 47 | 16.11.2012 | 2.8 | 150 | SJG | B19 | Grus |
| 22 | Thunes vei 17 | 31.01.2013 | | 125 | SJG | B01 | Silt/Leire |
| 23 | Holmenveien 62 | 05.01.1900 | 2.2 | 150 | SJG | Ukjent | Grus |

| | | | | | | | |
|----|-----------------------|------------|-----|-----|-----|-------------|------------|
| 24 | Stålfæra 1 | 29.01.2013 | 2.5 | 200 | SJG | B03 | Silt/Leire |
| 25 | Marting Linges vei 43 | 13.12.2012 | 3 | 250 | SJG | B02 | Sand |
| 26 | Haugmansveien BIT | 05.11.2012 | 2.2 | 300 | SJK | Rørscanning | Grus |
| 27 | Hellerudveien 142 | 12.11.2012 | 2 | 300 | SJG | B01 | Silt/Leire |
| 28 | Telesvingen | 04.01.2013 | 2 | 125 | SJG | B02 | Grus |
| 29 | Dronninghavnveien 6 | 10.01.2013 | 2.2 | 100 | SJG | B02 | Sand |
| 30 | Linjeveien 46 | 01.11.2012 | 1.8 | 150 | SJG | Ukjent | Sand |
| 31 | Røahellinga 24 | 08.11.2012 | 1.9 | 125 | SJG | B09 | Silt/Leire |
| 32 | Ullernchauseen 8 | 18.12.2012 | 1.9 | 150 | SJK | B06 | Grus |
| 33 | Ullernchauseen 6 | 14.12.2012 | 1.9 | 150 | SJK | B04 | |
| 34 | Olav V's Gate | 05.12.2012 | 1.8 | 150 | SJG | B02 | Sand |

| Prøve | Sted | Totalvekt [g] | Brett [g] | Våtvekt [g] | Tørrvekt [g] | Vanninnhold |
|-------|-----------------------|---------------|-----------|-------------|--------------|-------------|
| 1 | Melkeveien 60 | 715.21 | 30.2 | 685.01 | 606.39 | 11.48 % |
| 2 | Madserud Alle | 581.78 | 30.3 | 551.48 | 505.9 | 8.27 % |
| 3 | Bakkerudveien 10 | 581.7 | 30.3 | 551.4 | 466.8 | 15.34 % |
| 4 | Refstadsvingen 11 | 719.02 | 30.3 | 688.72 | 600.8 | 12.77 % |
| 5 | Hospitsveien 5 | 681.2 | 30.21 | 650.99 | 586.1 | 9.97 % |
| 6 | Myrerskogveien 47 | 623.27 | 30.25 | 593.02 | 540.45 | 8.86 % |
| 7 | Stamhusveien 13 | 602.75 | 30.28 | 572.47 | 494.31 | 13.65 % |
| 8 | Voksenkollveien 30 | 626.24 | 30.2 | 596.04 | 556.58 | 6.62 % |
| 9 | Akersgata 60 | 683.25 | 30.35 | 652.9 | 559.16 | 14.36 % |
| 10 | Sollerudveien 5b | 667.05 | 30.2 | 636.85 | 550.6 | 13.54 % |
| 11 | Ullernchauseen 8 | 602.85 | 30.3 | 572.55 | 554.4 | 3.17 % |
| 12 | Østmarkveien 71 | 661.92 | 30.3 | 631.62 | 544.05 | 13.86 % |
| 13 | Rosenlundgata | 707.5 | 30.22 | 677.28 | 628.85 | 7.15 % |
| 14 | Ivar Aasens vei 1 | 668.19 | 30.23 | 637.96 | 522.81 | 18.05 % |
| 15 | Økern Torgvei 3 | 652.25 | 30.26 | 621.99 | 583.14 | 6.25 % |
| 16 | Måltrostveien 23 | 619.86 | 30.25 | 589.61 | 504.17 | 14.49 % |
| 17 | Haraldrudveien 29 | 655.17 | 30.33 | 624.84 | 530.7 | 15.07 % |
| 18 | Stordamsnaret 5 | 628.65 | 30.16 | 598.49 | 510.87 | 14.64 % |
| 19 | Risalleen 40 | 682.9 | 30.25 | 652.65 | 569.05 | 12.81 % |
| 20 | Stålfjæra 11 | 631.85 | 30.25 | 601.6 | 518.26 | 13.85 % |
| 21 | Myrerskogveien 47 | 620.95 | 30.15 | 590.8 | 597.26 | -1.09 % |
| 22 | Thunes vei 17 | 662.89 | 30.19 | 632.7 | 550.8 | 12.94 % |
| 23 | Holmenveien 62 | 648.35 | 30.25 | 618.1 | 597.96 | 3.26 % |
| 24 | Stålfæra 1 | 633.35 | 30.5 | 602.85 | 533.74 | 11.46 % |
| 25 | Marting Linges vei 43 | 668.27 | 30.4 | 637.87 | 572.87 | 10.19 % |
| 26 | Haugmansveien BIT | 662.19 | 30.2 | 631.99 | 619.7 | 1.94 % |
| 27 | Hellerudveien 142 | 679.01 | 30.31 | 648.7 | 581.7 | 10.33 % |
| 28 | Telesvingen | 670.95 | 30.26 | 640.69 | 624.61 | 2.51 % |
| 29 | Dronninghavnveien 6 | 681.53 | 30.3 | 651.23 | 642.84 | 1.29 % |

| | | | | | | |
|----|------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 30 | Linjeveien 46 | 666.27 | 30.2 | 636.07 | 602.39 | 5.30 % |
| 31 | Røahellinga 24 | 650.62 | 30.3 | 620.32 | 566.53 | 8.67 % |
| 32 | Ullernchauseen 8 | 650.93 | 30.27 | 620.66 | 601.45 | 3.10 % |
| 33 | Ullernchauseen 6 | 602.5 | 30.2 | 572.3 | 520 | 9.14 % |
| 34 | Olav V's Gate | 614.9 | 30.25 | 584.65 | 567.38 | 2.95 % |

| Prøve | Sted | Masse [g] | | | | | |
|-------|-----------------------|-----------|-----------------|---------------|------------------|----------------------|-----------|
| | | D > 19mm | 19 mm > D > 4mm | 4mm > D > 2mm | 2mm > D > 0,42mm | 0,42mm > D > 0,074mm | D < 0,074 |
| 1 | Melkeveien 60 | 38.34 | 206.61 | 43.99 | 96.3 | 76.42 | 144.73 |
| 2 | Madserud Alle | 95.91 | 64.37 | 23.6 | 117.56 | 83.8 | 120.66 |
| 3 | Bakkerudveien 10 | 0 | 16.83 | 11.65 | 34.46 | 18.35 | 385.51 |
| 4 | Refstadsvingen 11 | 0 | 37.98 | 6.15 | 14.14 | 19.15 | 523.38 |
| 5 | Hospitsveien 5 | 129.87 | 129.72 | 51.91 | 90.22 | 40.85 | 143.53 |
| 6 | Myrerskogveien 47 | 82.92 | 41.16 | 23.54 | 73.57 | 57.71 | 261.55 |
| 7 | Stamhusveien 13 | 0 | 21.75 | 15.99 | 63.08 | 65.56 | 327.93 |
| 8 | Voksenkollveien 30 | 134.9 | 94 | 23.52 | 81.55 | 170.27 | 52.34 |
| 9 | Akersgata 60 | 11.94 | 205.87 | 50.2 | 96.47 | 45.45 | 149.23 |
| 10 | Sollerudveien 5b | 0 | 26.26 | 10.1 | 24.11 | 32.86 | 457.27 |
| 11 | Ullernchauseen 8 | 44.26 | 195.09 | 39.55 | 96.99 | 57.06 | 121.45 |
| 12 | Østmarkveien 71 | 0 | 11.71 | 10.47 | 27.43 | 52.06 | 442.38 |
| 13 | Rosenlundgata | 110.44 | 90.54 | 24.29 | 124.21 | 158.01 | 121.36 |
| 14 | Ivar Aasens vei 1 | 101.55 | 130.6 | 25.78 | 66.42 | 60.01 | 138.45 |
| 15 | Økern Torgvei 3 | 17.44 | 106.96 | 34.7 | 119.3 | 150.56 | 154.18 |
| 16 | Måltrostveien 23 | 0 | 59.8 | 16.37 | 39.45 | 30.77 | 357.78 |
| 17 | Haraldrudveien 29 | 0 | 1.35 | 2.56 | 22.32 | 9.7 | 494.77 |
| 18 | Stordamsnaret 5 | 0 | 7.4 | 5.06 | 22.83 | 22.2 | 453.38 |
| 19 | Risalleen 40 | 9.92 | 56.16 | 34.16 | 110.26 | 45.33 | 313.22 |
| 20 | Stålfjæra 11 | 0 | 14.67 | 3.88 | 20.38 | 10.88 | 468.45 |
| 21 | Myrerskogveien 47 | 66.15 | 248.84 | 48.69 | 108.45 | 56.31 | 68.82 |
| 22 | Thunes vei 17 | 6.07 | 7.91 | 6.23 | 9.19 | 14.55 | 506.85 |
| 23 | Holmenveien 62 | 101.1 | 259.97 | 46.22 | 76.89 | 38 | 75.78 |
| 24 | Stålfæra 1 | 57.66 | 41.4 | 10.8 | 33.16 | 32.13 | 358.59 |
| 25 | Marting Linges vei 43 | 105.87 | 143.28 | 19.23 | 41.69 | 34.95 | 227.85 |
| 26 | Haugmansveien BIT | 43.1 | 232.25 | 52.83 | 94.8 | 59.54 | 137.18 |
| 27 | Hellerudveien 142 | 29.77 | 89.35 | 28.07 | 104.29 | 103.58 | 226.64 |
| 28 | Telesvingen | 79.29 | 311.93 | 36.74 | 48.6 | 20.09 | 127.96 |
| 29 | Dronninghavnveien 6 | 108.88 | 133.07 | 33.3 | 122.49 | 96.67 | 148.43 |
| 30 | Linjeveien 46 | 97.43 | 140 | 41.69 | 143.11 | 83.62 | 96.54 |
| 31 | Røahellinga 24 | 0 | 120.98 | 29.77 | 39.58 | 14.41 | 361.79 |
| 32 | Ullernchauseen 8 | 230.58 | 61.54 | 15.84 | 40.47 | 29.37 | 223.65 |
| 33 | Ullernchauseen 6 | | | | | | 520 |
| 34 | Olav V's Gate | 68.24 | 165.47 | 28.94 | 85.83 | 90.08 | 128.82 |

| Prøve | Sted | Grus | | Sand | | | Silt/Leire |
|-------|-----------------------|------|------|------|--------|------|------------|
| | | Grov | Fin | Grov | Medium | Fin | |
| 1 | Melkeveien 60 | Spor | Noe | Spor | Litt | Litt | Noe |
| 2 | Madserud Alle | Litt | Litt | Spor | Noe | Litt | Noe |
| 3 | Bakkerudveien 10 | | Spor | Spor | Spor | Spor | Majoritet |
| 4 | Refstadsvingen 11 | | Spor | Spor | Spor | Spor | Majoritet |
| 5 | Hospitsveien 5 | Noe | Noe | Spor | Litt | Spor | Noe |
| 6 | Myrerskogveien 47 | Litt | Spor | Spor | Litt | Litt | Og |
| 7 | Stamhusveien 13 | | Spor | Spor | Litt | Litt | Majoritet |
| 8 | Voksenkollveien 30 | Noe | Litt | Spor | Litt | Noe | Spor |
| 9 | Akersgata 60 | Spor | Og | Spor | Litt | Spor | Noe |
| 10 | Sollerudveien 5b | | Spor | Spor | Spor | Spor | Majoritet |
| 11 | Ullernchauseen 8 | Spor | Og | Spor | Litt | Litt | Noe |
| 12 | Østmarkveien 71 | | Spor | Spor | Spor | Spor | Majoritet |
| 13 | Rosenlundgata | Litt | Litt | Spor | Litt | Noe | Litt |
| 14 | Ivar Aasens vei 1 | Litt | Noe | Spor | Litt | Litt | Noe |
| 15 | Økern Torgvei 3 | Spor | Litt | Spor | Noe | Noe | Noe |
| 16 | Måltrostveien 23 | | Litt | Spor | Spor | Spor | Majoritet |
| 17 | Haraldrudveien 29 | | | | Spor | Spor | Majoritet |
| 18 | Stordamsnaret 5 | | Spor | | Spor | Spor | Majoritet |
| 19 | Risalleen 40 | Spor | Spor | Spor | Litt | Spor | Majoritet |
| 20 | Stålfjæra 11 | | Spor | | Spor | Spor | Majoritet |
| 21 | Myrerskogveien 47 | Litt | Og | Spor | Litt | Spor | Litt |
| 22 | Thunes vei 17 | Spor | Spor | Spor | Spor | Spor | Majoritet |
| 23 | Holmenveien 62 | Litt | Og | Spor | Litt | Spor | Litt |
| 24 | Stålfæra 1 | Litt | Spor | Spor | Spor | Spor | Majoritet |
| 25 | Marting Linges vei 43 | Litt | Noe | Spor | Spor | Spor | Og |
| 26 | Haugmansveien BIT | Spor | Og | Spor | Litt | Spor | Noe |
| 27 | Hellerudveien 142 | Spor | Litt | Spor | Litt | Litt | Og |
| 28 | Telesvingen | Litt | Og | Spor | Spor | Spor | Noe |
| 29 | Dronninghavnveien 6 | Litt | Noe | Spor | Litt | Litt | Noe |
| 30 | Linjeveien 46 | Litt | Noe | Spor | Noe | Litt | Litt |
| 31 | Røahellinga 24 | | Noe | Spor | Spor | Spor | Majoritet |
| 32 | Ullernchauseen 8 | Og | Litt | Spor | Spor | Spor | Og |
| 33 | Ullernchauseen 6 | | | | | | |
| 34 | Olav V's Gate | Litt | Noe | Spor | Litt | Litt | Noe |

| Prøve | Sted | Fraksjon [%] med en størrelse mindre enn | | | | | |
|-------|-----------------------|--|----------|---------|---------|---------|----------|
| | | 40 mm | 19 mm | 4 mm | 2 mm | 0.42 mm | 0.074 mm |
| 1 | Melkeveien 60 | 100.00 % | 93.68 % | 59.61 % | 52.35 % | 36.47 % | 23.87 % |
| 2 | Madserud Alle | 100.00 % | 81.04 % | 68.32 % | 63.65 % | 40.42 % | 23.85 % |
| 3 | Bakkerudveien 10 | 100.00 % | 100.00 % | 96.39 % | 93.90 % | 86.52 % | 82.59 % |
| 4 | Refstadsvingen 11 | 100.00 % | 100.00 % | 93.68 % | 92.65 % | 90.30 % | 87.11 % |
| 5 | Hospitsveien 5 | 100.00 % | 77.84 % | 55.71 % | 46.85 % | 31.46 % | 24.49 % |
| 6 | Myrerskogveien 47 | 100.00 % | 84.66 % | 77.04 % | 72.69 % | 59.07 % | 48.39 % |
| 7 | Stamhusveien 13 | 100.00 % | 100.00 % | 95.60 % | 92.37 % | 79.60 % | 66.34 % |
| 8 | Voksenkollveien 30 | 100.00 % | 75.76 % | 58.87 % | 54.65 % | 40.00 % | 9.40 % |
| 9 | Akersgata 60 | 100.00 % | 97.86 % | 61.05 % | 52.07 % | 34.82 % | 26.69 % |
| 10 | Sollerudveien 5b | 100.00 % | 100.00 % | 95.23 % | 93.40 % | 89.02 % | 83.05 % |
| 11 | Ullernchauseen 8 | 100.00 % | 92.02 % | 56.83 % | 49.69 % | 32.20 % | 21.91 % |
| 12 | Østmarkveien 71 | 100.00 % | 100.00 % | 97.85 % | 95.92 % | 90.88 % | 81.31 % |
| 13 | Rosenlundgata | 100.00 % | 82.44 % | 68.04 % | 64.18 % | 44.43 % | 19.30 % |
| 14 | Ivar Aasens vei 1 | 100.00 % | 80.58 % | 55.60 % | 50.66 % | 37.96 % | 26.48 % |
| 15 | Økern Torgvei 3 | 100.00 % | 97.01 % | 78.67 % | 72.72 % | 52.26 % | 26.44 % |
| 16 | Måltrostveien 23 | 100.00 % | 100.00 % | 88.14 % | 84.89 % | 77.07 % | 70.96 % |
| 17 | Haraldrudveien 29 | 100.00 % | 100.00 % | 99.75 % | 99.26 % | 95.06 % | 93.23 % |
| 18 | Stordamsnaret 5 | 100.00 % | 100.00 % | 98.55 % | 97.56 % | 93.09 % | 88.75 % |
| 19 | Risalleen 40 | 100.00 % | 98.26 % | 88.39 % | 82.38 % | 63.01 % | 55.04 % |
| 20 | Stålfjæra 11 | 100.00 % | 100.00 % | 97.17 % | 96.42 % | 92.49 % | 90.39 % |
| 21 | Myrerskogveien 47 | 100.00 % | 88.92 % | 47.26 % | 39.11 % | 20.95 % | 11.52 % |
| 22 | Thunes vei 17 | 100.00 % | 98.90 % | 97.46 % | 96.33 % | 94.66 % | 92.02 % |
| 23 | Holmenveien 62 | 100.00 % | 83.09 % | 39.62 % | 31.89 % | 19.03 % | 12.67 % |
| 24 | Stålfæra 1 | 100.00 % | 89.20 % | 81.44 % | 79.42 % | 73.20 % | 67.18 % |
| 25 | Marting Linges vei 43 | 100.00 % | 81.52 % | 56.51 % | 53.15 % | 45.87 % | 39.77 % |
| 26 | Haugmansveien BIT | 100.00 % | 93.05 % | 55.57 % | 47.04 % | 31.74 % | 22.14 % |
| 27 | Hellerudveien 142 | 100.00 % | 94.88 % | 79.52 % | 74.70 % | 56.77 % | 38.96 % |
| 28 | Telesvingen | 100.00 % | 87.31 % | 37.37 % | 31.48 % | 23.70 % | 20.49 % |
| 29 | Dronninghavnveien 6 | 100.00 % | 83.06 % | 62.36 % | 57.18 % | 38.13 % | 23.09 % |
| 30 | Linjeveien 46 | 100.00 % | 83.83 % | 60.59 % | 53.66 % | 29.91 % | 16.03 % |
| 31 | Røahellinga 24 | 100.00 % | 100.00 % | 78.65 % | 73.39 % | 66.40 % | 63.86 % |
| 32 | Ullernchauseen 8 | 100.00 % | 61.66 % | 51.43 % | 48.80 % | 42.07 % | 37.19 % |
| 33 | Ullernchauseen 6 | | | | | | |
| 34 | Olav V's Gate | 100.00 % | 87.97 % | 58.81 % | 53.71 % | 38.58 % | 22.70 % |