

MÅLING AF DENSITET OG VANDINDHOLD MED ISOTOPSONDE

prVI 99-10:2011

VEJTEKNISK INSTITUT
PROVISORISK PRØVNINGSMETODE 99-10
SEPTEMBER 2011

MÅLING AF DENSITET OG VANDINDHOLD MED ISOTOPSONDE
prVI 99-10:2011

PROVISORISK PRØVNINGSMETODE 99-10

DATO: September 2011
OPHAVSRET: Eftertryk i uddrag er tilladt med kildeangivelse
FORFATTER: Caroline Hejlesen
UDGIVER: Vejdirektoratet, Vejteknisk Institut
LAYOUT: Svenning Olm
TEGNINGER: Svenning Olm
FOTO: Jochim Kempe

Forord

Denne prøvningsmetode er udarbejdet af Vejteknisk Institut i serien "Provisoriske prøvningsmetoder". Provisoriske prøvningsmetoder beskriver forsøg, som Vejteknisk Institut anvender til vurdering af egenskaber af et materiale eller eventuelt en kombination af materialer. Provisoriske prøvningsmetoder kan også være relevante i forbindelse med vurdering af kvaliteten af arbejde, der udføres in situ.

Prøvningsmetoden erstatter prøvningsmetoden SV LP 16 "Komprimeringskontrol efter isotopmetode", Statens Vejlaboratorium fra 1984.

I forhold til SV LP 16 indeholder denne prøvningsmetode opdateret viden og anvisninger i brugen af isotopsonde. Der er især tilføjet afsnit vedrørende apparaturet og korrektion ved måling i forskellige materialer, herunder genbrugsmaterialer. Derimod er der udeladt noget teori omkring den manuelle beregningsgang ud fra tælleletal og kalibreringskurver, da dette ikke er nødvendigt for brugen af nyere isotopsonder.

Formål

Denne prøvningsmetode bruges i marken til at bestemme densitet og vandindhold i jord, sand, grus, knust asfalt, knust beton, knust tegl og blandinger af disse samt hydraulisk bundne materialer.

Metoden bruges primært til kontrol af komprimeringsarbejder, og kan på ét minut bestemme vandindhold og densitet af et materiale.

Sikkerhedsforhold

Apparaturet indeholder radioaktivt materiale.

Brugere af isotopsonden skal have gennemgået et obligatorisk sikkerhedskursus, eller være oplært af en person der har deltaget i sikkerhedskursus.

Uheld eller bortkomst af sonden skal straks indberettes til Statens Institut for Strålebeskyttelse (SIS) 44 94 37 73 (døgnavagt). "Nærvæd uheld" skal ligeledes indberettes inden for 7 døgn.

Princip

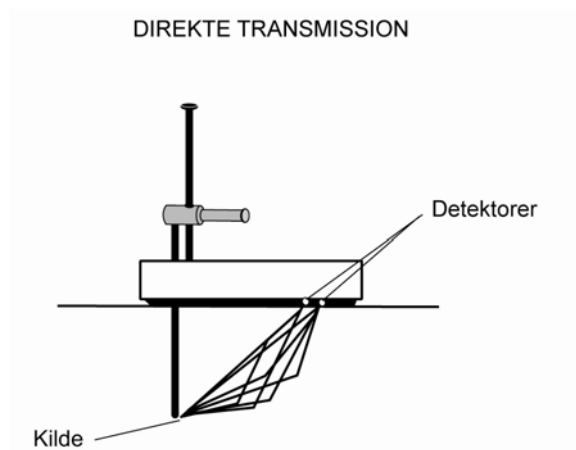
Isotopsonden måler materialets vandindhold og våddensitet. Densiteten måles grundlæggende via to principper, nemlig direkte transmission (figur 1) og backscatter (figur 2).

Vandindholdsmåling

Vandindholdet måles efter sammen princip som backscatter.

Måling af vandindhold er ikke destruktiv, og foretages ved hjælp af en neutronkilde (oftest Americium-Beryllium-241), og en detektor der sidder inde i sonden, lige over den overflade der skal testes.

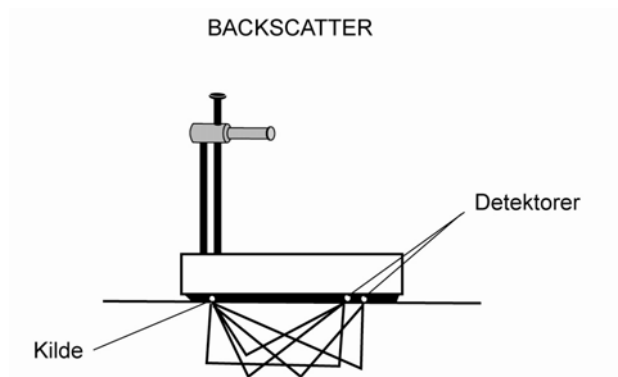
Densitetsmåling ved direkte transmission



Figur 1. Princip for måling af direkte transmission.

I kildespyddet sidder en gammakilde (oftest Cæsium-137), der sender gammastråler igennem det materiale der testes. Detektorer, der sidder inde i sonden, registrerer strålerne, og en gennemsnitlig densitet af materialet mellem kilden og detektorerne bestemmes – altså både mineral Korn og vand, så den densitet, der måles, er våddensiteten. Direkte transmission bruges til at måle i jord, sand, grus, knust asfalt, knust beton, knust tegl og blandinger af disse samt hydraulisk bundne materialer. Der måles i dybder op til 300 mm, normalt i spring på 25 mm eller 50 mm afhængig af sonden.

Densitetsmåling ved backscatter

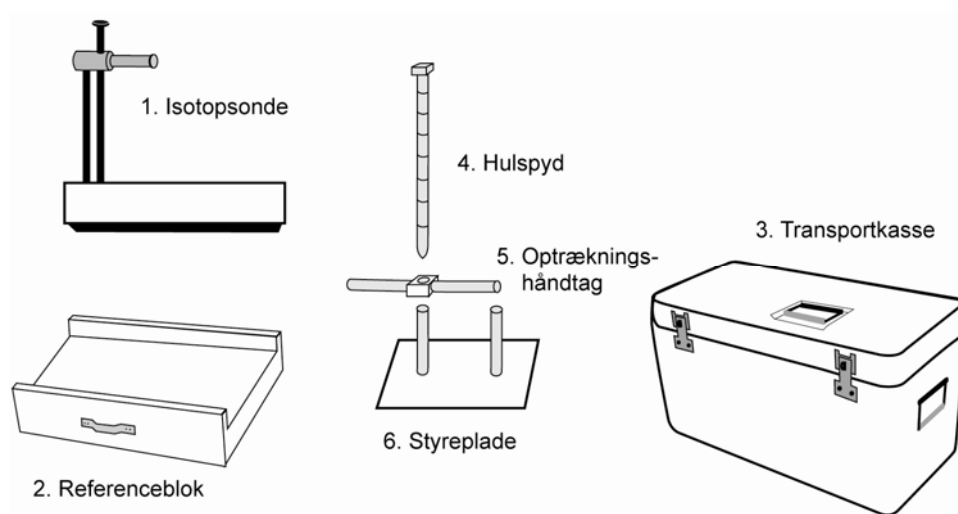


Figur 2. Princip for backscatter-måling.

Backscattermålingen er en ikke destruktiv måling, hvor kildespyddet placeres på den overflade der testes (se backscatterposition på figur 4). Gammastrålerne fra kildespyddet sendes ned i testmaterialet, og de stråler der bliver reflekteret tilbage og rammer detektorerne, registreres. På baggrund af dette kan densiteten af materialet bestemmes – både mineral-korn og vand, så den densitet, der måles, er våddensiteten. Backscatter kan bruges til densitetsmålinger af ca. 100 mm tykke lag af asfalt og beton.

Apparatur

Isotopsonder fås i forskellige fabrikater, men de fungerer i princippet ens.



Figur 3. Det gængse udstyr der bruges ved målinger med isotopsonde.

1. Isotopsonden

Selve isotopsonden er et bærbart instrument, der indeholder to radioaktive kilder samt detektor til at foretage målinger. Der er desuden display og tastatur til betjening af sonden samt hukommelse til at lagre målinger. Data kan udskrives eller overføres til computer via kabel eller USB-lagringsmedie, afhængig af model.

2. Referenceblok

Referenceblokken, som har en kendt densitet, bruges til at lave en standardtælling. For hver lokalitet og for hver opstart af isotopsonden udføres en standardtælling. Standardtællingen justerer isotopsonden i forhold til den naturlige baggrundsstråling. Se i øvrigt afsnittet "Fremgangsmåde".

3. Transportkassen

Til opbevaring og transport af isotopsonden samt udstyr anvendes den specialtilpassede transportkasse. Transportkassen er udført efter specifikke forskrifter til transport af sonden i kategorien type A kolli.

4. Hulspydd

Hulspyddet bruges til at forberede et hul til måling, ved direkte transmission. Hulspyddet er en smule større end kildespyddet, således at dette nemt kan føres ned i måledybden.

5. Optrækningshåndtag

Når hulspyddet skal trækkes op af materialet, bruges optrækningshåndtaget, således at hullet ikke ødelægges.

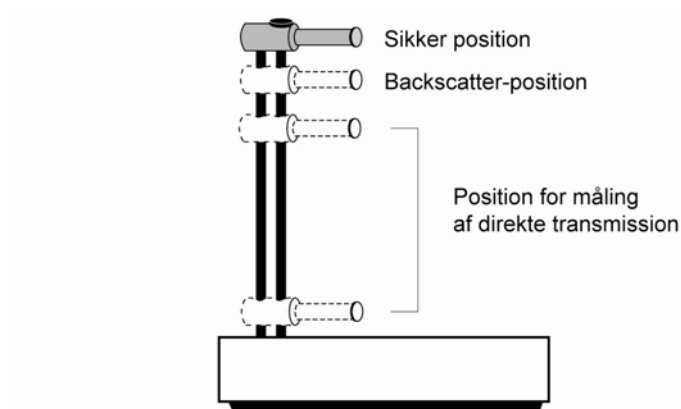
6. Styreplade

Styrepladen har samme dimensioner som undersiden af sonden, og den har to huller svarende til det sted, kildespyddet sidder i sonden. Ved at optegne omridset af styrepladen med hulspyddet sikres det, at det er nemt at placere isotopsonden, så kildespyddet føres direkte ned i hullet. Pladen anvendes desuden til at sikre, at hullet udføres vinkelret på overfladen.

Isotopsondens måleindstillinger:

Isotopsondens kildespyd kan justeres i forskellige højder, som har forskellige betegnelser og funktioner som vist figur 4:

- Sikker position: Håndtaget er helt oppe, og kilden er dækket af en plade, lavet af wolfram, således at stråling fra kilden begrænses maksimalt. Denne position bruges når sonden ikke er i brug, under transport samt ved opbevaring. Positionen bruges desuden under standardtællingen.
- Backscatter: Håndtaget er ét trin nede i forhold til sikker position. Wolframpladen er skubbet til siden, og kildespyddet er nede i plan med undersiden af apparatet og jordoverfladen.
- Direkte transmission: Håndtaget kan indstilles mellem 50 mm og 300 mm, med spring på 25 mm eller 50 mm.



Figur 4. Eksempel på målepositioner.

Begrænsninger i brugen samt korrektioner

Ved måling med isotopsonde er der forskellige forhold, der kan påvirke målingernes præcision. Der må ikke måles, hvor der er synligt vand på overfladen, da det vil forstyrre målingerne.

Måling i knust beton og tegl

Ved anvendelse af isotopmetoden i materialer indeholdende knust beton og tegl skal man være opmærksom på, at materialet kan indeholde krystalvand (vand der er bundet i kornene). Dette har betydning for beregning af komprimeringsgraden, idet isotopsondens vandindholdsbestemmelse skal korrigeres for indholdet af krystalvand. Korrektionen fastlægges ved en vandindholdsbestemmelse i laboratoriet efter DS/EN 1097-5.

Måling i materialer med knust asfalt

Ved anvendelse af isotopmetoden til måling af densitet og vandindhold af knust asfalt skal man være opmærksom på, at bitumenindholdet registreres som vandindhold stort set i forholdet 1:1.

For at kunne anvende tørdensiteten, som ligger til grund for beregning af komprimeringsgraden, skal man derfor reducere det målte vandindhold, svarende til bitumenindholdet. Hvis ikke bitumenindholdet er kendt, vil standardværdier kunne findes i udbudsforskrifterne.

Måling i flyveaske og forbrændingsslagger

Forbrændingsslagger indeholder tungmetaller, der forstyrrer målingen med isotopsonde. Flyveaske har en densitet, som ligger under måleområdet for isotopsonden, og den kan samtidig indeholde tungmetaller, som også forstyrrer målingen. Derfor kan der ikke udføres valide målinger med isotopsonde i flyveaske og forbrændingsslagge.

Densiteten af flyveaske og forbrændingsslagger kan bestemmes ved sandefterfyldningsmetoden efter prVI 99-4.

Måling i hydraulisk bundne bærelagsmaterialer

Ved måling med isotopsonden i hydraulisk bundne bærelagsmaterialer (cementstabiliserede materialer) skal man være opmærksom på at det er våddensiteten, der er grundlag for komprimeringskontrollen. Derfor kan isotopsondens beregning af komprimeringsgraden ikke anvendes her.

Måling i kalkstabiliseret lerjord

For kalkstabiliseret lerjord vil det være mætningsgraden, som giver udtryk for om komprimeringen er tilstrækkelig. Ved beregning af mætningsgraden anvendes vandindhold og tørdensitet bestemt ved måling med isotopsonden.

Måling nær andre kilder og andet forstyrrende materiel

Under målingen må der ikke forekomme andre radioaktive kilder inden for en afstand af 10 m fra målestedet.

Måling i ledningsgrave og nær lodrette flader

Ved måling i nærheden af lodrette flader påvirkes resultatet af refleksioner fra disse. Isotopsonden kan dog automatisk korrigere for sidestrålingen.

Da ikke alle isotopsonder er ens, skal fabrikantens brugervejledning følges, når der laves isotopsondemålinger i ledningsgrave og nær lodrette flader.

Fremgangsmåde

Forberedelse af apparat

Inden testmålingerne udføres, foretages en standardtælling. Dette gøres for at korrigere målingerne for henfald af kilden og for naturlig baggrundsstråling i det pågældende område. Desuden testes apparatets normale funktion (vær opmærksom på at der kan forekomme variation i dette afhængig af fabrikat og model; følg derfor fabrikantens anvisninger).

Isotopsonden placeres ovenpå referenceblokken, og standardtællingen sættes i gang. Isotopsonden foretager målinger for densitet og vandindhold. Disse målinger sammenlignes med de sidste fire standardtællinger. Er standardtællingen godkendt, kan testmålingerne påbegyndes. Godkendes standardtællingen ikke, følges proceduren i brugervejledningen. En ny standardtælling er nødvendig, hver gang man skifter lokalitet

Forberedelse af måleposition

På den planlagte måleposition skal overfladen afrettes, således at der opnås maksimal kontakt mellem isotopsonden, og det materiale der skal kontrolleres.

Det er vigtigt med god kontakt mellem isotopsonde og overflade for at opnå præcise målinger. Der må ikke forekomme luftlommer med en diameter over 3 mm, ligesom lagtykkelsen af evt. afretningssand ikke bør overstige 3 mm og udgøre mere end ca. 10 % af kontaktarealet. Det kan ofte være nødvendigt med flere afretninger, før disse forhold opnås.

Formning af målehul

Styrepladen placeres på den afrettede overflade. Hulspyddet føres igennem optrækningshåndtaget og ned gennem et af hullerne. Herefter placerer man en fod på styrepladen, så styrepladen holdes fast, hvorefter man hamrer hulspyddet ca. 50 mm længere ned end den ønskede måledybde. Hulspyddet trækkes op med optrækningshåndtaget; det kan eventuelt drejes, men der må ikke tippes fra side til side. Med hulspyddet markeres området af styrepladen, således at isotopsonden efterfølgende kan placeres korrekt. Styrepladen fjernes, og hullet er nu klar til måling.

Måling

Apparatet placeres nu nøjagtigt over det formede hul. Kildespyddet føres ned til den ønskede dybde og fastlåses. Apparatet forskydes i retning fra kilde mod detektor, for at sikre kontakt mellem kilde og materiale i målehullet.

Målingen igangsættes. Der skal som minimum måles i én retning i hvert hul, og hver måling skal som minimum have en varighed af 1 minut. En længere måletid vil medføre en mere præcis måling, mens en kortere måletid medfører en mere upræcis måling. Se desuden afsnittet om præcision.

For materialer som jord, sand, grus, kunst asfalt, knust beton, knust tegl eller blandinger af disse er den maksimale tørdensitet det samme som referenceværdien. Er referenceværdien fastlagt, kan denne indtastes i isotopsonden, og komprimeringsgraden vil blive beregnet automatisk. Man skal dog i materialer med knust beton og knust asfalt være opmærksom på, at den komprimeringsgrad isotopsonden beregner, ikke er korrigeret for krystalbundet vand og bitumen. Korrektion for krystalbundet vand og bitumen kan udføres som beskrevet i appendikset.

Beregninger

Isotopsonden bestemmer massen af vand i de øverste 50-70 mm af materialet samt våddensiteten af materialet mellem kilde og detektor.

Isotopsonden beregner desuden automatisk vandindholdet i procent, tørdensiteten og den tilhørende komprimeringsgrad, når materialets referenceværdi er indtastet.

Rapportering

Rapporten skal indeholde følgende generelle oplysninger:

- Operatør
- Tid og sted
- Materiale type
 - o Ved måling i råjord skal det beskrives, hvilken type råjord der er tale om, f.eks. ler, moræneler, sand eller grus
- Apparattype og serienummer
- Referenceværdi for komprimeringsgraden (dog ikke for kalkstabiliseret lerjord)
- Værdi opnået ved referencetælling
- Våddensitet, tørdensitet og vandindhold for hver måling med isotopsonden.
 - o Evt. korrektion for krystalbundet vand og/eller bitumenindhold
- Målepositionen
 - o Stationering, lagnummer og sideværts placering
 - o Evt. GPS-koordinat
- Bedømmelse af måleresultaterne
 - o Statistisk eller minimums-/gennemsnitsværdi
 - o Bedømt ud fra våddensitet, tørdensitet eller mætningsgrad.

Kalibrering og servicering

For alle radioaktive kilder gælder, at intensiteten af strålingen aftager med tiden. Til densitetsmålingen med isotopsonden benyttes normalt en kilde af Cæsium-137, og dette mate-

riale har en halveringstid på ca. 30 år. Det radioaktive materiale, der anvendes til måling af vandindholdet (f.eks. Americium-Beryllium-241) har så lang halveringstid (ca. 432 år), at det ikke har praktisk indflydelse på målingerne i apparatets levetid.

En forudsætning for at udføre eksakte målinger med isotopsonden er kalibrering af densitetsmålingen. Kalibrering af densitetsmålingen skal foretages en gang om året. Kalibrering kan enten foretages af producenten, på et eksternt laboratorium eller i eget laboratorium. Kalibrering af isotopsondens densitetsmåling skal udføres som beskrevet i ASTM D-6938, og certifikat eller kalibreringskurver skal fremvises ved forespørgsel.

Isotopsonden skal desuden til sikkerhedscheck hver andet år i henhold til retningslinjer fra SIS. (Kilde: Vejledning om brug af mobile apparater indeholdende radioaktive kilder, SIS, 2007).

Dagligt vedligehold

Udstyret er et fintfølende instrument og skal behandles som sådan for at kunne give valide data. Derfor bør instrumentet aftørres dagligt eller efter brug.

Hvis apparatet har været brugt til at måle i f.eks. lerjord, er der sandsynlighed for at der på spyddet vil sidde materiale tilbage, som vil blive trukket op i apparatet. Dette materiale vil kunne blokere for lukkemekanismen. Det er derfor meget vigtigt, at apparatet rengøres efter fabrikantens beskrivelser,

Har apparatet været brugt til målinger i hydraulisk bundne materialer er det ligeledes vigtigt, at apparatet rengøres, da hydrauliske materialer ofte er basiske og vil slide ekstra på apparatet,

Præcision

Præcisionen for en isotopsonde er opgivet af fabrikanten. Eksempelvis er præcisionen for en Troxler 3440 Plus som givet i tabel 1 og 2

Tabel 1. Præcision ved direkte transmission i 150 mm dybde og en densitet på 2000 kg/m³

Måletid	0,25 min.	1 min.	4 min.
Præcision (kg/m ³)	± 6,80	± 3,40	± 1,70

Tabel 2. Præcision ved et vandindhold på 240 kg/m³ (ca. 12%)

Måletid	0,25 min.	1 min.	4 min.
Præcision (kg/m ³)	± 10,3	± 5,1	± 2,6

Man skal som minimum måle i 1 minut, men som det fremgår af tabellerne vil man kunne opnå en højere præcision i densitet og vandindhold ved at lade isotopsonden måle over længere tid. Normalt vil den større nøjagtighed af målingen på 4 minutter ikke være nødvendig.

Lovpligtige oplysninger

Virksomheder der ønsker at anskaffe sig radioaktive kilder, herunder isotopsonder, skal først have en tilladelse til dette fra Statens Institut for Strålebeskyttelse (SIS). Alle kilder skal desuden være registreret hos SIS. Det skal desuden registreres hvem i virksomheden der er strålingsansvarlig.

Transport af isotopsonde

Ved transport af en isotopsonde er der en række regler og sikkerhedsbestemmelser, der skal overholdes.

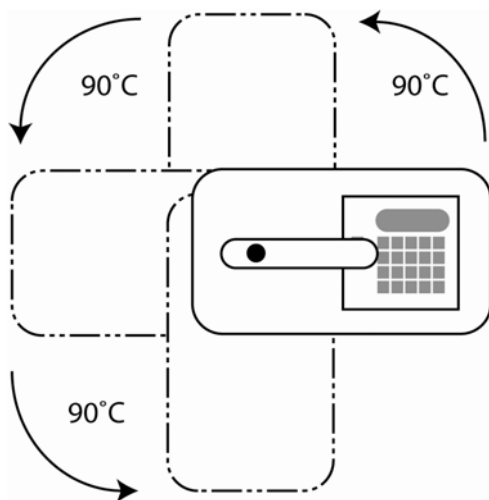
Referencer

- ASTM D-6938: Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth)
- Vejledning om brug af mobile apparater indeholdende radioaktive kilder, Statens Institut for Strålingssikkerhed (SIS), 2007
- Vejledning om lukkede radioaktive kilder, Statens Institut for Strålebeskyttelse, 2009
- DS/EN 1097-5: Bestemmelse af vandindhold i ventileret ovn
- prVI 99-4: Tørdensitetsbestemmelse i marken – sandefterfyldningsmetoden.

Appendiks. Målinger i flere retninger med isotopsonden samt korrektion for krystalbundet vand eller bitumen

Ved måling i et materiale, forudsættes det at materialet inden for måledybden er homogent. Måling over laggrænser samt forekomst af store sten i materialet har indflydelse på målingen og bør undgås.

Der er udover at lave én måling i hvert målehul også mulighed for at rotere isotopsonden omkring det samme målehul, og dermed foretage flere målinger i det omkringliggende materiale. Normalt laves der kun en måling i hver målehul, men isotopsonden kan også roteres omkring det enkelte målepunkt, f.eks. i spring af 90 grader omkring kildespyddet. Der vil derved blive målt i fire retninger omkring målepunktet og man vil kunne lave en middelværdi over de målte værdier og dermed få et mere repræsentativt udtryk for materialets komprimering. Måleprincippet er skitseret i figur 5.



Figur 5. Måling i fire retninger om det samme målehul

Standardkorrektion for bitumenindhold og krystalbundet vand

Når tørdensiteten af et materiale indeholdende knust asfalt og/eller knust beton skal bestemmes ved måling med isotopsonden, skal man huske at korrigere for bitumenindholdet og krystalbundet vand. Da isotopsonden dels registrerer det reelle frie vandindhold i materialet, og dels krystalvand/bitumen, vil man opnå for høje vandindholdsmålinger, og derved er for lav tørdensitet.

Det reelle vandindhold vil kunne fastlægges ved at foretage en traditionel vandindholdsbestemmelse ved tørring i ovn i henhold til DS/EN 1097-5. Det naturlige vandindhold fordampe, hvorimod krystalvand og bitumen vil forblive i prøvematerialet.

Beregningen af den korrigerede tørdensitet kan efterfølgende beregnes ud fra nedenstående formel (1).

$$\rho_{d,k} = \frac{\rho_m}{100 + w} \cdot 100 \quad (1)$$

Hvor

$\rho_{d,k}$ er den korrigerede tørdensitet, Mg/m³

ρ_m er våddensiteten målt med isotopsonden, Mg/m³

w er vandindholdet bestemt ved tørring i ovn, %.

Hvis ikke korrektionen for krystalbundet vand og bitumenindhold bestemmes ved ovntørring kan korrektionen også laves matematisk.

Ved isotopsondemålingen registreres bitumen som vand - næsten i forholdet 1:1. Hvis bitumenindholdet for materialet ikke er bestemt, kan den værdi der er givet for bitumenindholdet i udbudsforskriften for "Ubundne bærelag med knust asfalt" anvendes.

Mængden af krystalbundet vand i knust beton bestemmes ved tørring af en prøve i ovn efter DS/EN 1097-5. Hvis flere prøver fra samme materiale viser at mængden af krystalbundet vand er af samme størrelsesorden, kan man vælge at bruge en standard korrektionsfaktor.

Den korrigerede tørdensitet kan efterfølgende beregnes ud fra nedestående formel (2):

$$\rho_{d,k} = \frac{\rho_m}{100 + w_{iso} - \left(\frac{R_a}{100} \cdot b \right) - \left(\frac{R_c}{100} \cdot k \right)} \cdot 100 \quad (2)$$

Hvor

$\rho_{d,k}$ er den korrigerede tørdensitet, Mg/m³

ρ_m er den isotopsonden målte våddensitet, Mg/m³

w_{iso} er vandindholdet målt med isotopsonden, %

R_a er procentdelen af knust asfalt, %

b er bitumenindholdet i fraktionen knuste asfalt, %

R_c er procentdelen af knus beton, %

k er mængden af krystalbundet vand, %.

**KØBENHAVN**

Niels Juels Gade 13
Postboks 9018
1022 København K
Telefon 7244 3333

HEDEHUSENE

Vejteknisk Institut
Guldalderen 12
2640 Hedehusene
Telefon 7244 7000

SKANDERBORG

Thomas Helsteds Vej 11
Postboks 529
8660 Skanderborg
Telefon 7244 2200

vd@vd.dk
vejdirektoratet.dk

